

Mémoire de stage

présenté par

DURAND-BESSART Clémentine

pour obtenir le diplôme national de master

mention Biodiversité, écologie, évolution

parcours Biodiversité végétale et gestion des écosystèmes tropicaux
(BIOGET)

Sujet :

Etude des interactions et régulations écologiques entre les arbres
d'ombrage, les caféiers et leurs maladies foliaires, dans les systèmes
agroforestiers de La Dalia, Nicaragua

Encadrant : Dr Philippe TIXIER

Encadrante : Dr Clémentine ALLINNE

soutenu publiquement le 08 juin 2018

à Montpellier

devant le jury suivant :

Titre Prénom NOM

Rapporteur

Titre Prénom NOM

Examineur

Titre Prénom NOM

Examineur

REMERCIEMENTS

En premier lieu je tiens tout particulièrement à remercier mes deux encadrants Clémentine et Philippe, pour leur aide et leur soutien tout au long de ce stage. Merci à eux d'avoir attendu une année de plus (bon ça nous aura permis d'avoir un bon jeu de données), et puis d'avoir fait preuve de patience et pédagogie, j'ai énormément appris, merci !

Merci à toute l'unité GECO, qui m'a chaleureusement accueillie depuis Janvier. Merci à Alcide, qui m'a en grande partie remplacée pour les mesures de terrain au Nicaragua, et qui par son travail très consciencieux m'a beaucoup facilité le reste des analyses.

Merci aux équipes qui ont été là pour me remettre sur pied à temps, pour que je puisse faire ce (super) stage.

Un immense merci à mes ami.e.s de France et du bout du monde, pour ces deux années de master, et tout le reste ! Et merci à ma famille qui a été un soutien sans faille !

RESUME

Au Nicaragua, les caféicultures à base de *Coffea arabica* sont en majorité implantées dans des systèmes agroforestiers complexes. L'importante biodiversité dans ces parcelles assure le bon fonctionnement des processus de régulations, et les arbres d'ombrage ont un rôle complexe dans la gestion des bioagresseurs des caféiers. En effet, certaines maladies foliaires d'origine fongique comme l'Ojo de Gallo (*Mycena citricolor*) sont favorisées par les microclimats humides créés par les arbres d'ombrage, alors que d'autres, comme la cercosporiose (*Cercospora coffeicola*) sont amoindries par leur présence. Notre étude s'est donc focalisée sur la compréhension des mécanismes de régulations initiés par les arbres d'ombrage sur les maladies foliaires, mais aussi sur leurs interactions avec les caféiers, et particulièrement sur leurs effets sur la production. La gestion globale de l'ouverture de la canopée nous est apparue comme un facteur déterminant du niveau d'infestation par les maladies foliaires. En effet, plus la parcelle est ombragée plus les maladies foliaires y sont développées, ce qui impacte négativement la production des caféiers. Néanmoins, les espèces d'arbres ont des effets complexes et parfois antagonistes, liés à leur rôle fonctionnel, alors que certaines espèces comme les *Inga sp* favorisent les maladies foliaires, d'autres comme les bananiers (*Musa sp*) ont tendance à les réguler.

ABSTRACT

In Nicaragua, coffee crop made of *Coffea arabica* are, for the major part, implemented in complex agroforestry systems. The abundant biodiversity ensures that regulating processes are well functioning, and shade trees have a complex role in managing coffee pests and diseases. Indeed, some leaf diseases like American leaf spot of coffee (*Mycena citricolor*) favor humid microclimates such as those created by shade trees, whereas others like cercospora leaf spot (*Cercospora coffeicola*) are decreased by their presence. Our study then focused on understanding regulating mechanism initiated by shade trees on leaf diseases, and also on their interactions with coffee trees and especially their impact on coffee yield. The management of canopy openness appeared to us as a determining factor of the level of infection by leaf diseases. Indeed, the more shade there is in the plot the more leaf diseases develop, which impacts negatively coffee yield. However, tree species have complex and sometimes antagonistic effects linked to their functional role where some species like the *Inga sp* favor leaf diseases and others like banana trees (*Musa sp*) have a tendency to regulate them.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	1
RESUME	3
ABSTRACT	3
TABLE DES MATIÈRES.....	5
1. INTRODUCTION	7
2. MATERIEL ET METHODES	11
2.1. Sites et modèles d'étude	11
2.2. Stratégies d'échantillonnage et modèles d'études	12
2.2.1. Caractérisation du système de culture	12
2.2.2. Caractérisation de l'ouverture de la canopée	14
2.2.3. Caractérisation des caféiers	15
2.2.4. Caractérisation du complexe de bioagresseurs de <i>Coffea arabica</i>	17
2.2.5. Caractérisation de la litière et du sol	19
2.3. Analyse des données	20
2.3.1. Influence de l'organisation de la diversité associée des arbres d'ombrage sur les composantes de l'agrosystème	21
2.3.1.1 Méthode descriptive des interactions entre les composantes du système	21
2.3.1.2 Analyses spatiales exploratoires: effets des arbres d'ombrage sur les maladies foliaires des caféiers	22
2.3.2. Analyses du réseau d'interactions entre les composantes de l'agrosystème.....	24
3. RESULTATS.....	29
3.1. Influence de l'organisation de la diversité associée des arbres d'ombrage sur les composantes de l'agrosystème	29
3.1.1. Méthode descriptive des interactions entre les composantes du système.....	29
3.1.1.1 Construction de la typologie des arbres d'ombrage.....	29
3.1.1.2 Caractérisation de l'ombrage	30
3.1.1.3 Dynamique et développement du complexe de maladies foliaires.....	32
3.1.1.4 Les facteurs de croissance et de production des caféiers.....	34
3.1.2. Analyses spatiales exploratoires : effets des groupes d'arbres d'ombrage sur les maladies foliaires de <i>C. arabica</i>	35
3.2. Analyses du réseau d'interactions entre les composantes de l'agrosystème	36
4. DISCUSSION	40

4.1. Influence de l'organisation de la diversité associée des arbres d'ombrage sur les maladies foliaires, la croissance et la production des caféiers	40
4.1.1. Caractérisation de l'ombrage	40
4.1.2. Interactions avec les maladies foliaires	40
4.1.3. La croissance et la production des caféiers	42
4.2. Analyses du réseau d'interactions entre les composantes de l'agrosystème	43
4.2.1. Les interactions avec les maladies foliaires	43
4.2.2. Les interactions avec la croissance et la production des caféiers	43
5. CONCLUSION	46
6. REFERENCES	49
7. LISTE DES ABREVIATIONS	55
8. TABLE DES TABLEAUX	57
9. TABLE DES FIGURES	59
10. ANNEXES	61
TABLE DES ANNEXES	61
Annexe 1 : Le Nicaragua	62
Annexe 2 : Descriptif des fermes étudiées	63
Annexe 3 : Descriptif des arbres d'ombrage	64
Annexe 4 : Description des caféiers	67
Annexe 5 : Les maladies foliaires des caféiers	70
Annexe 6 : Résultats de l'analyse factorielle multiple	71
Annexe 7 : Résultats des modèles mixtes	72
Annexe 8 : La croissance des caféiers	73
Annexe 9 : La production des caféiers	74
Annexe 10 : La production en fonction de l'ouverture de la canopée	75

1. INTRODUCTION

La transition des agrosystèmes intensifs vers des systèmes agroécologiques, est une des solutions actuellement exposées pour faire face au déclin de la biodiversité, et aux problèmes de santé publics, qui découlent de l'intensification des cultures (i.e. système de production basé sur la productivité, dépendant de la mécanisation et de l'utilisation d'intrants ; Green *et al.*, 2005 ; Tschardt *et al.*, 2012). L'agroforesterie - qui est un type de système de culture associant des plantations forestières valorisables ou non, et des cultures de rentes pérennes ou annuelles, ou de l'élevage - est une des issues présentées pour pallier au déclin de la biodiversité, tout en maintenant une production de ressources alimentaires conséquentes (Evans, 1992 ; Nair, 1993 ; Bhagwat *et al.*, 2008). Alors que les systèmes agroforestiers (SAF) se développent actuellement en Europe (Rigueiro-Rodríguez *et al.*, 2009), ils sont particulièrement courants dans les zones tropicales et subtropicales, provenant de l'héritage de pratiques traditionnelles (Nair, 1993).

Ces SAF sont caractérisés par une importante biodiversité, qui est le support de multiples services écosystémiques (Rapidel, 2011). En effet, dans les SAF, notamment en milieu tropical, les producteurs n'ont généralement pas les moyens d'utiliser des intrants, et le contrôle des systèmes cultivés laisse place à des processus de régulations naturels (i.e. bénéfiques obtenues par le maintien des processus de l'écosystème ; Altieri, 1999 ; Vandermeer et Perfecto, 1995).

Les caféiers se prêtent particulièrement à la culture en SAF, de par leur nature ombrophile (Fig 1). Dans les SAF caféiers, deux types de biodiversité peuvent être distingués : i) la biodiversité planifiée qui est représentée par les caféiers (et parfois d'autres espèces cultivées) ainsi que les espèces d'arbres d'ombrage, cette diversité dépend de l'appréciation du producteur ; ii) la biodiversité associée, représentée par les espèces qui colonisent le système de culture après sa mise en place (Altieri, 1999 ; Vandermeer et Perfecto, 1995). Cette biodiversité associée peut être bénéfique à la parcelle comme les pollinisateurs ou les auxiliaires de culture ; mais aussi néfaste comme les bioagresseurs ou les adventices (Altieri, 1999 ; Vandermeer et Perfecto, 1995). Les interactions entre les espèces planifiées - qui reflètent la gestion faite par les producteurs - et les espèces associées sont à la base du maintien de ces systèmes de culture (Altieri, 1999 ; Vandermeer et Perfecto, 1995 ; Altieri et Nicholls, 2004).



Figure 1. Photo d'un système agroforestier à base de caféiers, au Nicaragua. Photo : C. Allinne.

Ces processus de régulations par les arbres d'ombrage permettent notamment de réduire le stress hydrique des caféiers, de réguler la température de l'air au niveau du feuillage en évitant des variations extrêmes, de limiter l'érosion du sol et de conserver leur fertilité et leur diversité en micro-organismes. Cette biodiversité planifiée a également un rôle complexe dans la régulation des bioagresseurs (Barradas et Fanjul, 1986 ; Staver *et al.*, 2001 ; Lin, 2007 ; Siles, Harmand, et Vaast, 2010 ; Bedimo *et al.*, 2012). De plus, l'ombrage améliore la qualité des grains de café : meilleures qualités organoleptiques, aspect, texture (Vaast *et al.*, 2006 ; Geromel *et al.*, 2008).

Au Nicaragua, les petites productions familiales sont majoritaires, les caféicultures sont principalement composées de *Coffea arabica* (Toledo et Moguel, 2012), et les arbres d'ombrage y sont très diversifiés apportant des bénéfices autant pour la faune et la flore locale, que pour les caféiers et les producteurs (Jha *et al.*, 2011 ; Cerdán *et al.*, 2012 ; Häger *et al.*, 2015). Ces arbres d'ombrage ont un rôle complexe et parfois ambivalent dans la régulation des bioagresseurs des caféiers (Bedimo *et al.*, 2012). En effet, pour les caféiers sous couvert de grands arbres d'ombrage leur feuillage est constamment à l'ombre, l'évapotranspiration en est amoindrie et les feuilles restent humides, créant ainsi des conditions microclimatiques favorables au développement de maladies foliaires d'origine fongique (Staver *et al.*, 2001 ; Avelino *et al.*, 2007 ; Bedimo *et al.*, 2012 ; Avelino *et al.*, 2018). Ces maladies foliaires entraînent une diminution de la photosynthèse, mais aussi une diminution de la croissance végétative. Quand l'affection est trop importante, elles peuvent entraîner la mort du rameau (dieback) affectant grandement la plante et donc la production de café sur plusieurs années (Staver *et al.*, 2001 ; Allinne, Savary, et Avelino, 2016 ; Avelino *et al.*, 2018).

Selon Ratnadass *et al.*, (2012), plusieurs voies d'actions peuvent être impliquées dans les processus de régulations biologiques par la diversité associée (Fig 2). En transférant ces hypothèses aux SAF,

la présence des arbres d’ombrage permettrait de réguler les maladies foliaires : (i) en diluant la densité d’hôte, ce qui entraîne des ruptures dans les cycles des ravageurs en faisant obstacles à leur dispersion ; (ii) en réduisant les pathogènes du sol grâce à l’apport de matière organique végétale, qui favorise la présence et la diversité de micro-organismes bénéfiques (Altieri, 1999 ; Ratnadass *et al.*, 2012) ; (iii) en combattant les ravageurs grâce aux effets allélopathiques ou en étant des puits d’auxiliaires de culture (Altieri, 1999 ; Muschler, 2001) ; (iv) en améliorant la nutrition des caféiers leur permettant de mieux lutter contre les maladies par une meilleure croissance et régénération des tissus ; (v) en créant des microclimats qui peuvent être défavorables au développement des maladies (Perfecto *et al.*, 1996 ; Bedimo *et al.*, 2012 ; Ratnadass *et al.*, 2012). Les espèces d’arbres, leur taille, leur morphologie foliaire et leur phénologie sont autant de facteurs qui influencent ces microclimats créés au niveau des caféiers (Avelino *et al.*, 2007 ; Bedimo *et al.*, 2012).

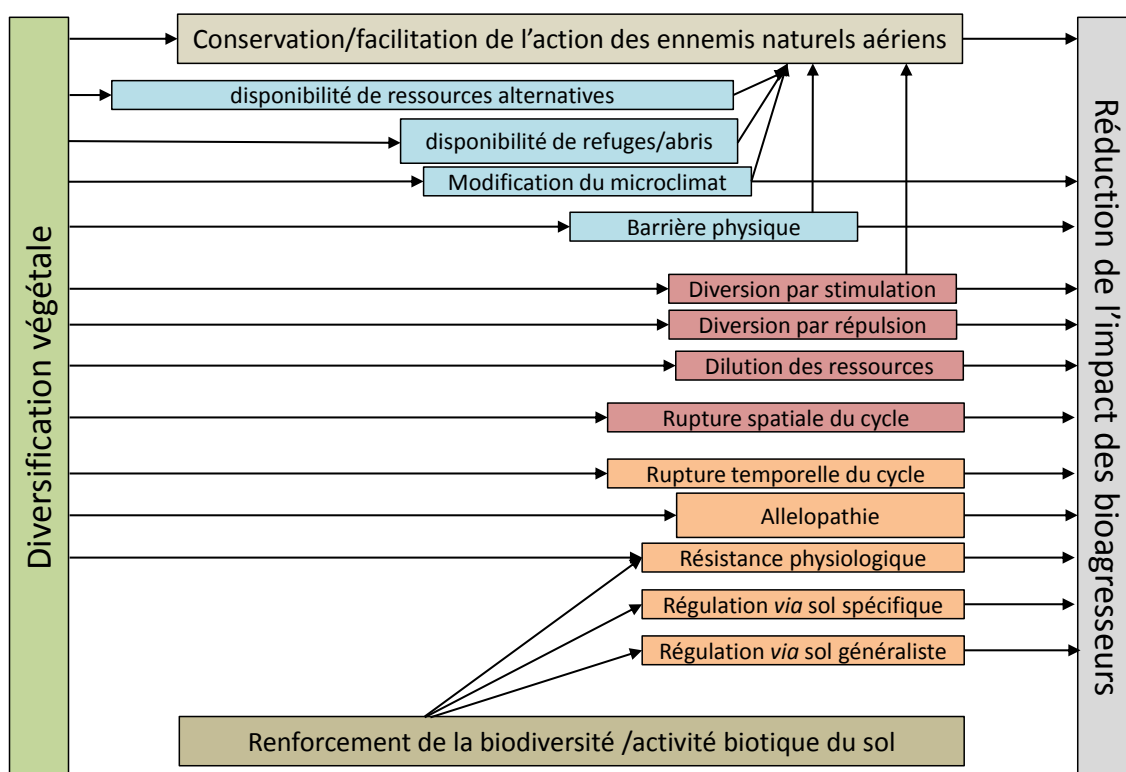


Figure 2. Représentation des services écologiques rendus par les arbres d’ombrage, dans la régulation des bioagresseurs. Traduit de Ratnadass *et al.* (2012).

Pourtant, l’utilisation de ces arbres associés est controversée, car les caféiers en agroforesterie ont des rendements plus faibles que ceux de plein soleil, du fait d’une plus faible croissance (nombre de nœuds par branches) et d’une favorisation du développement végétatif au détriment de la formation du système reproducteur (DaMatta *et al.*, 2007). Les producteurs, via leurs pratiques culturales, sont les acteurs de l’équilibre qui doit être trouvé entre un couvert suffisant pour optimiser la production des caféiers tout en régulant les bioagresseurs et les compétitions pour les

ressources entre les arbres d'ombrage et les caféiers. Cet équilibre est déterminant pour la bonne vigueur des caféiers et donc leur résistance aux ravageurs (Muschler, 2001). Pour trouver cet équilibre, il est nécessaire d'adopter une approche globale, en intégrant tous les composants de ces systèmes complexes ; la première étape étant d'identifier et de quantifier les relations entre ces composants.

Dans le cadre de mon stage au Cirad, dans les UMR System et UR GECO, qui mènent des recherches en agroécologie et sur la conception de systèmes de culture durables. L'enjeu de ce stage était de comprendre comment les arbres d'ombrages influencent les processus de régulations écologiques dans les systèmes agroforestiers à base de caféiers, et particulièrement leur rôle dans le contrôle des maladies foliaires. Dans le but d'optimiser l'utilisation de cette diversité pour améliorer le fonctionnement des caféières.

Pour ce faire, nous avons traité deux sous-questions :

1) Comment l'organisation de la diversité associée des arbres d'ombrage influence les maladies foliaires, la croissance et la production des caféiers ?

Certaines espèces d'arbres d'ombrage fournissent naturellement un pourcentage d'ombrage plus élevée de par la structure de leur canopée, l'hypothèse est que les caféiers sous couvert de ces arbres seraient plus atteints par les maladies à cause des microclimats humides créés. De même que les caféiers à proximité d'arbres d'ombrage étant des hôtes alternatifs seraient également plus infestés par les maladies foliaires.

2) Comment s'organise le réseau d'interactions entre les composantes de l'agrosystème, soit les maladies foliaires, le sol, la croissance et la production des caféiers ?

L'hypothèse testée est que la production des caféiers est diminuée par les maladies foliaires, et un ombrage trop important, mais elle est favorisée par certaines espèces d'arbres d'ombrage et un sol fertile.

Afin de tester ces hypothèses, nous avons mis en place, entre 2016 et 2018, un protocole de suivis des caféiers et de leurs maladies foliaires, ainsi qu'une caractérisation des espèces d'arbres d'ombrage, dans trois fermes de La Dalia, au Nicaragua. Nous avons ensuite analysé statistiquement les relations entre ces facteurs par des modèles mixtes, et un modèle d'équation structurelle, qui nous ont permis d'explicitier et de quantifier les différentes interactions.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. SITES ET MODELES D'ETUDE

Managua est un des dix-sept départements du Nicaragua, situé dans la région centrale montagneuse (Fig 3). L'économie principale est centrée sur l'agriculture, et principalement les plantations de café (Annexe 1).

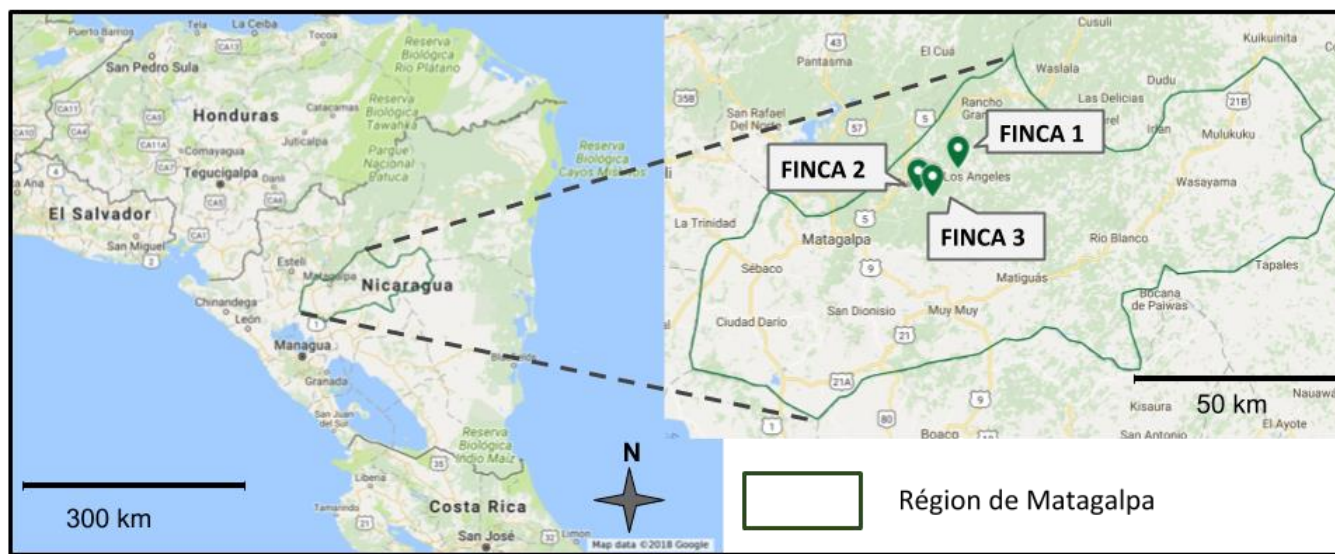


Figure 3. Cartes du Nicaragua et de la région de Matagalpa, comprenant la localisation des trois fincas étudiées, dans la commune d'El Tuma La Dalia.

Notre étude s'est portée sur trois fermes, ci-après nommées finca(s), dans la municipalité d'El Tuma La Dalia dans le département de Matagalpa (Fig 3). Ces fincas se situent entre les latitudes $13^{\circ}02'67.7''$ et $13^{\circ}08'75.6''$ Nord et les longitudes $85^{\circ}61'42.7''$ et $85^{\circ}71'48.3''$ Ouest; et leur altitude varie entre 650 et 850 m (Annexe 2). Ces SAF caféiers ont été sélectionnés pour leur diversité d'arbres d'ombrage importante et pour leur unique variété de caféiers : la variété Catimor.

Ces trois fincas appartiennent à des producteurs différents : Marvin RIVERA (finca 1), Mariano SUAZO (finca 2) et Adolfo CAJINAS (finca 3). Les parcelles font entre 1.75 ha pour les fincas 2 et 3, et 3.5 ha pour la première finca. Les modes de gestion varient du conventionnel¹ pour la finca 3, à un mode de culture plus raisonnée² pour la finca 1, à la parcelle biologique³ de Mariano (Annexe 2). Ce gradient d'intensification des cultures, nous permet de mettre en évidence les effets des modes de gestions des cultures sur les mécanismes de régulation des maladies.

¹ L'agriculture conventionnelle fait usage d'intrants, de mécanisation et autres procédés pour augmenter limiter la prolifération des ravageurs et augmenter la production.

² L'agriculture raisonnée est basée sur l'utilisation modérée d'intrants chimique.

³ L'agriculture biologique utilise des intrants d'origine naturelle, tout en limitant leur utilisation.

2.2. STRATEGIES D'ECHANTILLONNAGE ET MODELES D'ETUDES

2.2.1. CARACTERISATION DU SYSTEME DE CULTURE

Les SAF caféiers au Nicaragua sont parmi les systèmes de culture les plus complexes rencontrés (Fig 4). La diversité d'arbres d'ombrage y est très importante, avec une association d'espèces de rente - le café parfois associé aux cacaoyers et bananiers - d'espèces destinées à l'autoconsommation ou aux ventes secondaires sur les marchés locaux, mais aussi des espèces forestières natives et des plantes de services.

Parmi les espèces d'arbres associés principalement rencontrées, il y a les 'Laurel' (*Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken) - Boraginaceae, espèce indigène et forestière ; les 'Guaba roja' (*Inga oerstediana* Benth) - Leguminosae, espèce légumineuse ; et les bananiers ou 'Guineo' (*Musa spp* Jussieu) - Musaceae, espèce introduite et fruitière. Ces trois espèces abondantes dans nos trois fincas ont servis de base commune pour expliquer et comparer la diversité fonctionnelle dans les parcelles.



Figure 4. Photo du système caféier - arbres d'ombrage dans la finca 1. Photo : Clémentine Allinne.

Les unités d'échantillonnage ont été construites selon 4 situations possibles, autour d'un arbre central qui appartient soit à une des trois espèces principales: situation 1 Laurel; situation 2 Guaba roja; situation 3 Guineo. Soit il appartient à une autre espèce : situation 4 - Autres espèces.

Dans chacune des trois fermes, les unités ont été construites autour de cet arbre central, et 4 situations avec 5 répétitions sont définies, soit 20 unités d'échantillonnage par ferme (Fig 5).

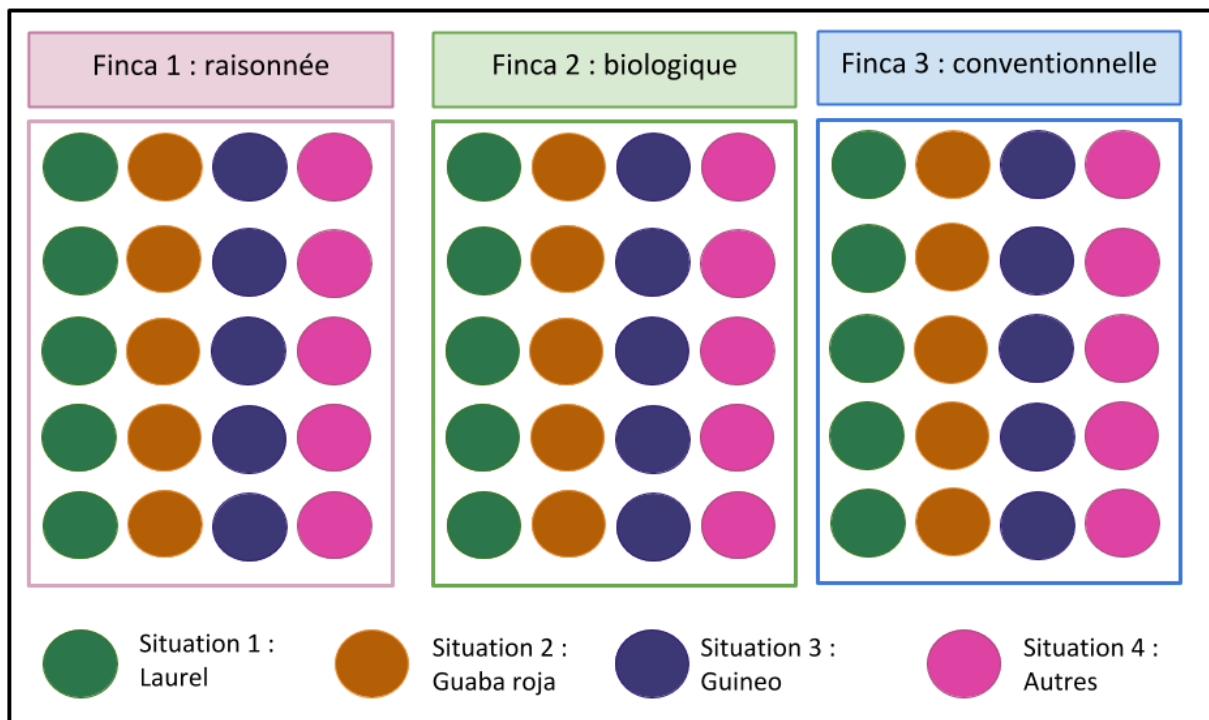


Figure 5. Répartition schématisée des situations et réplicas dans chaque ferme d'El Tuma-la-Dalia, Nicaragua.

Dans chaque unité, quatre caféiers ont été sélectionnés dans un rayon de 5 m autour de l'arbre central. Ils ont été choisis car ils se rapprochaient le plus de «l'idéotype» de la parcelle (âge, bonne vigueur, hauteur moyenne). Ensuite, dans un rayon de 7m, tous les AO d'une taille supérieure ou égale aux caféiers ont été sélectionnés. Quelques AO considérés comme important par leur hauteur et leur circonférence, et pouvant avoir une influence directe (ombrage, sol) dans l'unité ont été sélectionnés dans un rayon de 15 m (Fig 6).

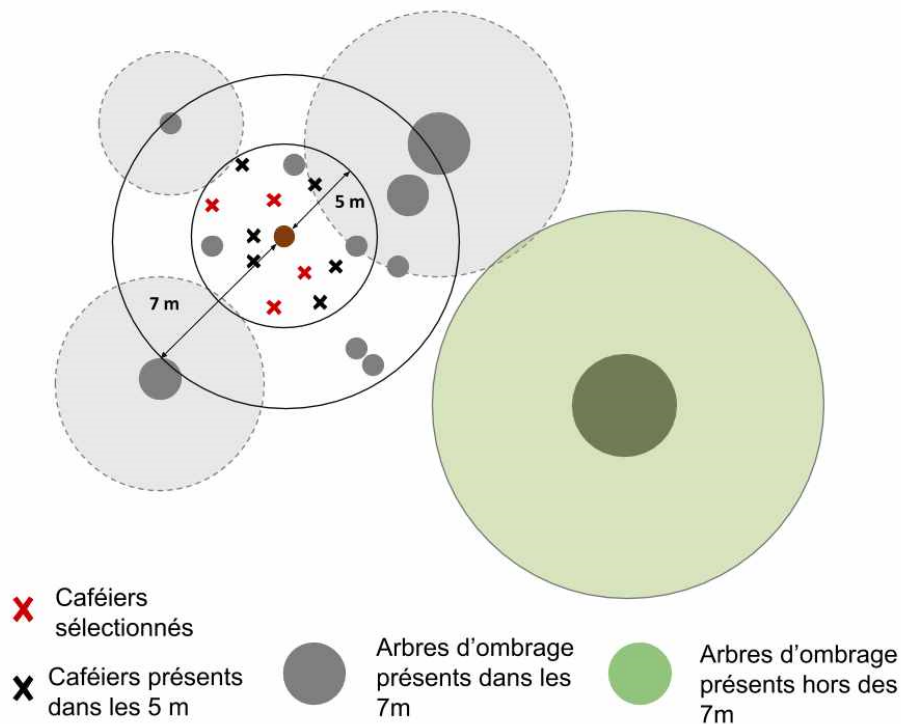


Figure 6. Schéma récapitulatif de la mise en place des unités autour de l'arbre central (point rouge), comprenant les 10 caféiers (croix) dont les 4 caféiers sélectionnés (croix rouges), et les arbres d'ombrage (points gris ou verts) avec leur influence sur le sol et le microclimat (cercles gris ou verts).

Pour chaque AO, l'espèce et la famille ont été identifiées, et des caractéristiques fonctionnelles, comme la hauteur totale h ; la circonférence, la taille des feuilles ont été mesurées (Cerdán *et al.*, 2012). Nous avons regroupé les usages des AO par les producteurs en sept catégories: 'Bois', 'Timber', 'Fruit', 'Shade', 'Soil', 'Native', 'Wild' (Pineda, 2006 ; Boshier *et al.*, 2009 ; Román *et al.*, 2012 ; Amores Contreras, 2015 ; Caceido, 2016). Les espèces qui sont des hôtes de l'Ojo de Gallo, de la cercosporiose ou de l'antracnose ; ont été renseignées par une recherche bibliographique (Annexe 3 ; Boshier *et al.*, 2009 ; Cerdán *et al.*, 2012).

2.2.2. CARACTERISATION DE L'OUVERTURE DE LA CANOPEE

Pour chaque caféier, nous avons pris une photo hémisphérique de la canopée au-dessus, à l'aide d'un appareil photo (Nikon coolpix 4500) et d'un objectif grand angle (Fisheye converter FC-E8 0.21x). Pour chaque prise, l'objectif de l'appareil était orienté verticalement vers le ciel ; au-dessus du feuillage des caféiers (Fig 7). Ces photos ont été prises à différents moments : Novembre 2016, Février, Juin et Septembre 2017. Les photos hémisphériques ont été analysées avec le logiciel Gap Light Analyzer (GPA-v2), pour évaluer l'ouverture de la canopée et donc le pourcentage d'ombrage au-dessus de chaque caféier (Frazer *et al.*, 1999).

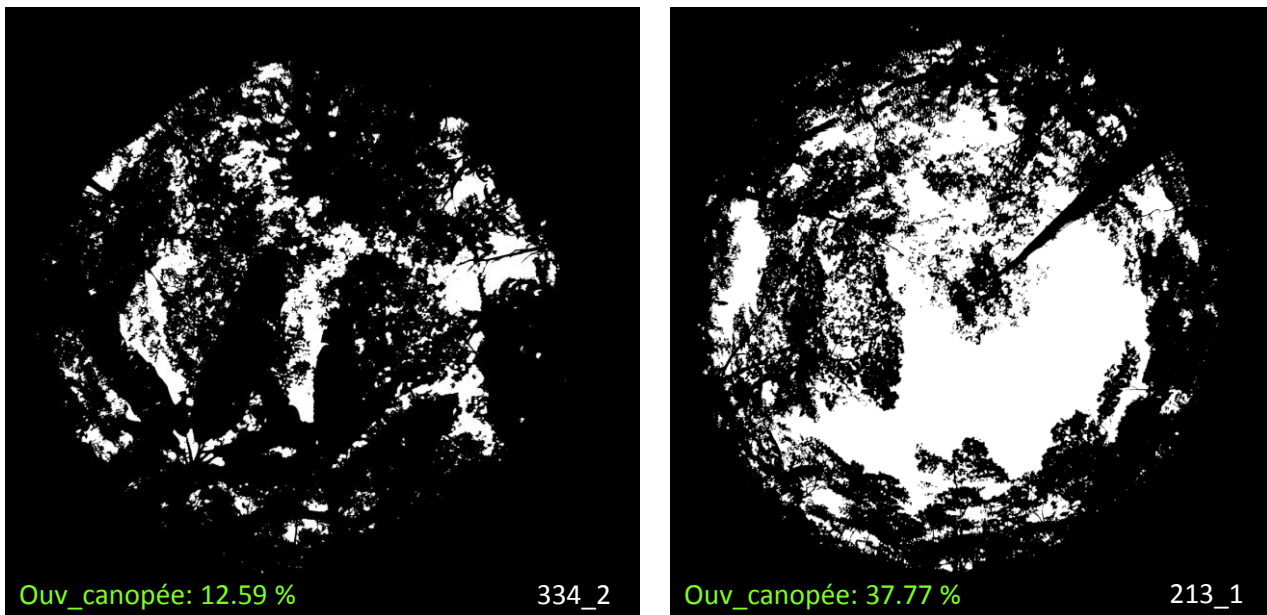


Figure 7. Photos hémisphériques prise dans la finca 3 & 2. Photo : C. Allinne

2.2.3. CARACTERISATION DES CAFEIERS

Coffea arabica L. 1753 (Rubiaceae) est une espèce ligneuse du genre *Coffea* qui regroupe plus de 80 espèces. Les caféiers de l'espèce Arabie sont de petits arbres ne dépassant pas les 9m, ombrophiles, à feuillage persistant.

Les caféiers sont reconnaissables par leurs feuilles simples, opposées alternes, de forme elliptiques, et leurs fleurs blanches, parfumées, et de forme étoilées (Fig 8 ; Charrier et Eskes A., 2008 ; Wintgens J., 2008). Les jeunes baies contiennent généralement deux graines, elles sont vertes et deviennent jaunes puis rouges à maturité (Fig. 8).

Les cycles de croissance végétative, et de floraison sont alternés : lorsque la plante alloue ces ressources à sa croissance, la floraison et donc la production de baies est amoindrie ; et inversement (Cannell, 1985 ; Camargo et Camargo, 2001 ; Wintgens J., 2008). Au Nicaragua, la floraison débute vers Mai - Juin, à la fin de la saison sèche avec les premières pluies, cette période de sécheresse est essentielle pour lever la dormance des boutons floraux (Camargo et Camargo, 2001 ; Wintgens J., 2008 ; Orwa *et al.*, 2009). La récolte des baies s'effectue en fin d'année (Décembre). Description complète en Annexe 4.



Figure 8. Dessin botanique de *Coffea arabica* : rameau, fruits, pièces florales (Köhler, 1887).

Dans nos parcelles, les caféiers sont de la variété Catimor qui est résistante à la rouille (*Hemileia vastatrix*), mais sensible à l'Ojo de Gallo (*Mycena citricolor* ; Staver *et al.*, 2001 ; Allinne, Savary, et Avelino, 2016). Les caféiers ont été caractérisés par leur âge, leur hauteur, et leur DBH (diamètre du tronc à 1.3m). Et un suivi des rameaux a été fait en suivant un protocole standardisé (Fig 9 ; Cerda *et al.*, 2017).

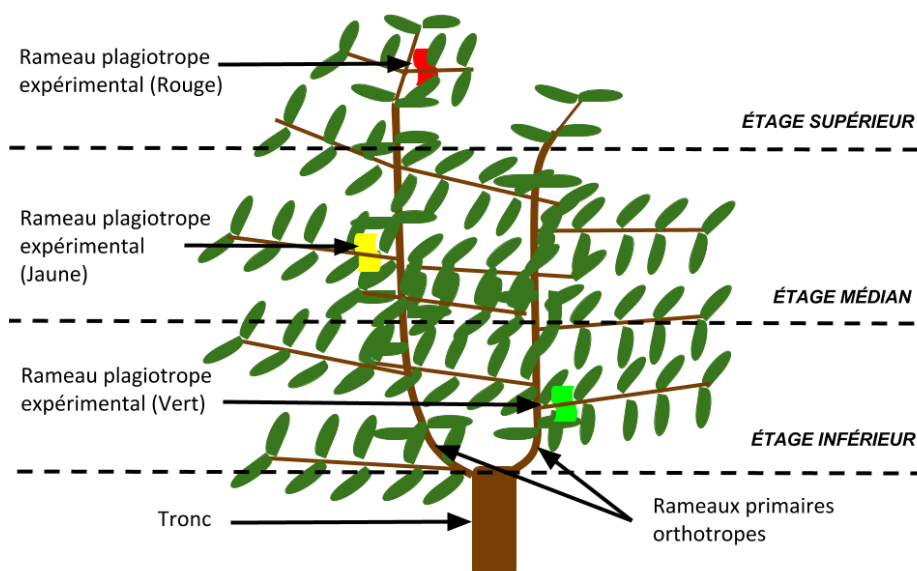


Figure 9. Positionnement des 3 branches marquées sur les caféiers. Schéma Clémentine Allinne.

En 2017, le nombre de rameaux fructifères et le nombre de nœuds fructifères ont été relevés, de même que le nombre de rameaux morts après récolte. Ces variables sont des indicateurs du rendement accessible et des pertes de rendement primaires et secondaires causées par les maladies (Allinne, Savary, et Avelino, 2016 ; Cerda *et al.*, 2017).

2.2.4. CARACTERISATION DU COMPLEXE DE BIOAGRESSEURS DE *COFFEA ARABICA*

Notre étude s'est concentrée sur le complexe de maladies foliaires (MF) induites par des champignons, soit l'Ojo de Gallo (OG ; *Mycena citricolor*), la cercosporiose (*Cercospora coffeicola* Berk. & Cooke), le Mal de hilacha (*Corticium kolegora*) et l'antracnose (*Colletotrichum sp*) qui sont les principales maladies affectant les caféiers Catimor dans les parcelles étudiées (Fig 10 ; Waller, Bigger, et Hillocks, 2007).

L'OG et le Mal de Hilacha sont favorisés par des taux élevés d'humidité, rencontrés dans les SAF caféiers (Bedimo *et al.*, 2012). Alors que l'antracnose et la cercosporiose sont moindres pour les caféiers sous ombrage (Staver *et al.*, 2001 ; Muller *et al.*, 2008). De plus, l'antracnose et le Mal de Hilacha sont des maladies opportunistes, i.e. elles surviennent quand le caféier est déjà atteint par d'autres maladies (Waller *et al.*, 1993 ; Staver *et al.*, 2001 ; Waller, Bigger, et Hillocks, 2007). Description complète en Annexe 5.



Figure 10. Photos des dégâts causés par les maladies fongiques foliaires sur *C. arabica*. A) *Mycena citricolor*; b) *Cercospora coffeicola*; c) *Corticium kolegora* ; d) *Colletotrichum* sp. (SINAVEF_LAB)

Ces maladies fongiques sont dispersées naturellement par les gouttes de pluie, le rôle de la structure du peuplement d'arbres d'ombrage est donc essentiel dans la dispersion des MF, notamment par l'effet de l'énergie cinétique (Hirst et Stedman, 1963 ; Meredith, 1973 ; Van den Meersche *et al.*, *in prep*).

Pour quantifier l'atteinte des caféiers par ces MF, nous avons mesuré la taille et la surface des nécroses, sur chaque feuille des rameaux suivis (Fig 11). Ces mesures sont des indicateurs de 1) la dispersion (i.e. l'incidence - exprimée en pourcentage) qui est le nombre de feuilles malades divisé par le nombre total de feuilles ; 2) et le développement (i.e. la sévérité) qui est la surface atteinte par les maladies divisé la surface foliaire totale. Nous avons calculé l'incidence et la sévérité pour l'OG seule, puis pour toutes les maladies additionnées.

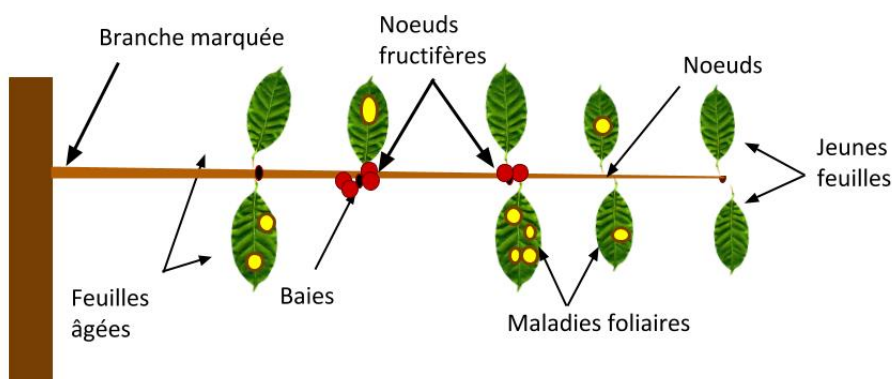


Figure 11. Présentation d'un rameau type de caféiers atteint par des maladies foliaires.

2.2.5. CARACTERISATION DE LA LITIERE ET DU SOL

Le sol est un facteur clef car il influence directement et indirectement la bonne santé des caféiers, mais aussi la production et la qualité des grains de café (Barel et Jacquet, 1994 ; Lin, 2010).

Nous disposons des données sur le sol, provenant d'un précédent stage (Andreotti, 2017). Nous avons pris en compte les résultats de l'étude de décomposition de la litière, donnant pour chaque unité un Index de litière (Nagler, Daughtry, et Goward, 2000 ; Ponge, Chevalier, et Lousot, 2002) ; et ceux de l'étude chimique qui nous donnait par unité : la valeur de Carbone organique (g/kg) ; le pH ; le pourcentage d'azote ; la quantité de Fer (Fe), de Potassium (K) et de Phosphore (P) en ppm. La capacité d'échange cationique (CIC, abréviation espagnole) qui est un bon indicateur de la fertilité du sol, par l'expression de sa capacité de rétention des éléments nutritifs d'un sol donné (Chapman, 1965).

2.3. ANALYSE DES DONNEES

L'objectif de ce stage était d'expliquer les relations d'interactions et de régulations entre les caféiers, les MF et les AO (Fig 12). L'analyse des données s'est faite en trois temps, une première partie composée d'analyses simples pour mettre en relation l'impact des différents modes de gestion sur la croissance et la production des caféiers, mais aussi sur l'ombrage et les taux d'infestations des maladies. La seconde se concentre sur une analyse spatiale pour caractériser les effets des arbres d'ombrage sur les maladies, soit est-ce que les arbres d'ombrage affectent par leur présence et leur abondance, la dispersion et le développement des maladies foliaires. Dans la dernière partie, nous analysons 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.

Au cours de notre étude, nous avons gardé à l'idée que le rendement était le paramètre le plus important pour les producteurs, la production de café étant leur principale source de revenus.

Toutes les analyses de données ont été conduites grâce au logiciel R 3.4.3.

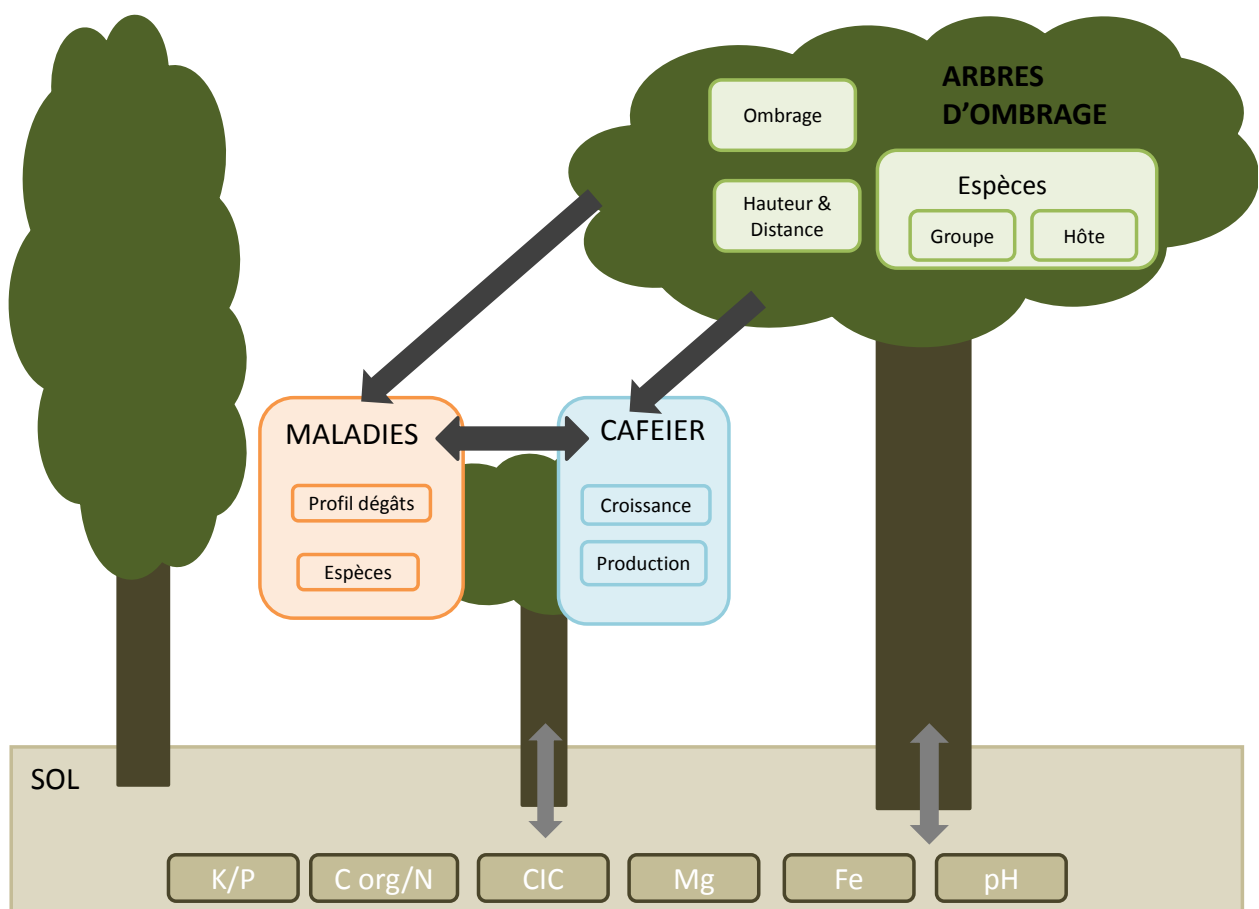


Figure 12. Schéma global des interactions entre les caféiers, les maladies foliaires, les arbres d'ombrage et le sol.

2.3.1. INFLUENCE DE L'ORGANISATION DE LA DIVERSITE ASSOCIEE DES ARBRES D'OMBRAGE SUR LES COMPOSANTES DE L'AGROSYSTEME

2.3.1.1 Méthode descriptive des interactions entre les composantes du système

Pour comprendre l'impact des pratiques de gestion de l'ombrage dans les fincas, mais aussi en fonction de l'espèce d'arbre central (situations) sur le pourcentage d'ombrage, les maladies foliaires, et la croissance et la production des caféiers. Nous avons réalisé des modèles linéaires (LM ; distribution normale) et des modèles linéaires généralisés (GLM ; distribution poissonnienne), avec les fonctions *lm* et *glm* du package *lme4* (Bates *et al.*, 2018). Ces modèles permettent de comparer les fincas et les situations, et de voir lesquelles sont les plus ombragées, celles qui sont les plus infestées, ou celles qui sont les plus productives.

Pour affiner ces études à l'échelle de l'unité, nous avons dans un premier temps, regroupés certaines espèces d'AO. En effet, de nombreuses espèces d'AO sont très peu représentées, ne nous permettant pas d'utiliser les espèces comme facteur pour la suite des analyses. Nous avons donc procédé à un regroupement de ces espèces par une Analyse Factorielle Multiple (AFM ; Morand, 2011 ; Pagès, 2013) . L'AFM permet de traiter des données, avec des variables qualitatives et quantitatives, qui sont organisées en sous-groupe. Pour utiliser l'AFM, nous avons donc structuré les caractéristiques des AO en plusieurs groupes : descriptifs (abondance, hauteur, ...), caractéristiques fonctionnelles (fixateur, hôte, ...) et usages (bois, fruitiers, ...).

Ensuite, pour nous affranchir des variations provenant des différences de gestion des parcelles, nous avons utilisé des modèles mixtes avec la variable 'finca' en facteur aléatoire (Zuur *et al.*, 2009 ; Gaudart *et al.*, 2010). Pour voir quels espèces ou groupes d'arbres influencent le plus l'ouverture de la canopée. Et, comment les espèces d'arbres, et le pourcentage d'ombrage affectent les MF, et les facteurs de production et de croissance des caféiers (Tab 1).

Tableau 1. Description des modèles mixtes, avec les variables réponses et leurs variables explicatives.

	Variable réponse	Variable explicative
Pourcentage d'ombrage	Ombrage moyen	Groupe arbre : Guaba, Laurel, Guineo, Citrus, Fruit, Timber, Service
Maladies foliaires	Sévérité OG	Ombrage
	Incidence OG	Ombrage
	Sévérité totale	Ombrage
	Incidence totale	Ombrage
Croissance végétative	Nombre de nœuds	Ombrage + Groupe d'arbres + Maladies
	Nombre nœuds nouveaux	Ombrage + Groupe d'arbres + Maladies
	Surface foliaire	Ombrage + Groupe d'arbres + Maladies
	Nombre de feuilles	Ombrage + Groupe d'arbres + Maladies
Production	Nombre rameaux fructifères	Ombrage + Groupe d'arbres + Maladies
	Nombre nœuds fructifères	Ombrage + Groupe d'arbres + Maladies
	Nombre de rameaux morts	Ombrage + Groupe d'arbres + Maladies

Nous avons utilisé des modèles linéaires mixtes (LMM ; distribution normale) et des modèles mixtes généralisés (GLMM ; distribution poissonnienne ; Bates *et al.*, 2014 ; Bolker *et al.*, 2009). Les LMM et GLMM ont été respectivement construits avec les fonctions *lmer* et *glmer* du package *lme4* (Bates *et al.*, 2018). La fonction *Drop1* du package *lme4*, nous a permis d'éliminer les variables non significatives dans nos modèles (Zuur *et al.*, 2009 ; Leandro-Muñoz *et al.*, 2017).

La validation des modèles a été faite après une analyse de la distribution des résidus. Et la représentation graphique des prédictions des modèles a été réalisée avec les packages *effects*, *lattice*, *latticeextra* et *gridExtra* (Sarkar, 2017 ; Fox *et al.*, 2018).

Les résultats seront décomposés en quatre parties :

- 1) Construction de la typologie des groupes d'arbres d'ombrage
- 2) Caractérisation de l'ombrage
- 3) Dynamique et développement du complexe de maladies foliaires
- 4) La croissance et la production des caféiers

2.3.1.2 Analyses spatiales exploratoires: effets des arbres d'ombrage sur les maladies foliaires des caféiers

Le but de cette analyse est de comprendre les effets des arbres d'ombrage (par leur présence et leur abondance) sur le complexe de MF dont l'OG. Pour cela, nous avons calculé un indice d'effets que peuvent avoir les AO, basé sur leur hauteur et leur distance aux caféiers. Pour construire cette analyse, nous nous sommes inspirés de deux études préalables, effectuées dans des systèmes agroforestiers (Leandro-Muñoz *et al.*, 2017 ; Ngo Bieng *et al.*, 2017).

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 les taux d'infestation des maladies foliaires pour chaque caféier. Pour cela, nous avons utilisé une réponse exponentielle décroissante pour représenter l'effet de chaque AO sur l'incidence et la sévérité de l'OG et des MF en fonction de leur distance au caféier (Eq. 1) :

$$\mathcal{E}_{a-c} = \beta * h_a * \exp(-\alpha * d_{ac}) \quad (eq. 1)$$

Avec \mathcal{E}_{a-c} l'effet de l'arbre a sur le caféier c , h_a la hauteur de l'arbre a , d_{ac} la distance entre a et c . Les coefficients α et β , correspondent respectivement au paramètre de décroissance avec la distance et le poids de l'espèce a .

Nous obtenons donc un coefficient α pour chaque groupe g d'arbres pour une variable maladie donnée. Un effet global du groupe d'arbres peut donc être calculé pour chaque caféier, en faisant la somme des effets pour chaque arbre d'un même groupe (Eq. 2 ; Fig 14).

$$\Sigma \text{effet}_{gi} = \Sigma \varepsilon_{a-gi} \quad (\text{eq. 2})$$

Pour chaque groupe d'arbre, le coefficient α a été estimé en fixant β à 1 et en maximisant la vraisemblance du modèle mixte généralisé (GLMM ; Eq. 3 ; Figure 13). Les GLMM ont été utilisés car les variables réponses suivaient une loi de Poisson, avec en variable aléatoire les 'fincas', ils ont été respectivement construit avec la fonction *glmer* du package *lme4* (Bates *et al.*, 2014 ; Bolker *et al.*, 2009):

$$\text{glmer} (\gamma \sim \Sigma \text{effet} + (1|\text{Finca}), \text{data}, \text{family} = \text{poisson}) \quad (\text{eq. 3})$$

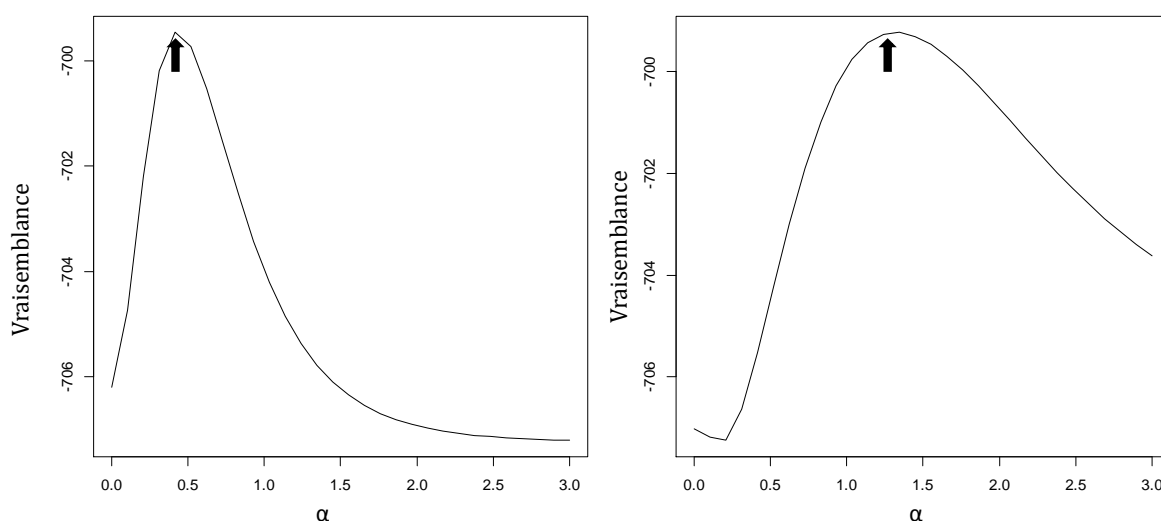


Figure 13. Graphes d'optimisation des valeurs de α possible, en fonction du maximum de vraisemblance, l'optimum atteint est représenté par la flèche noire. Pour les Guaba à gauche et les plantes de services à droite.

Ensuite, un modèle complet a été construit incluant les effets des X groupes, permettant ainsi de tester la significativité des effets des AO sur les maladies (Eq. 4 ; Fig 14).

$$\text{glmer} (\text{maladie} \sim \Sigma \text{effet}_{gp1} + \Sigma \text{effet}_{gp2} + \dots + (1|\text{Finca}), \text{data}, \text{family} = \text{poisson}) \quad (\text{eq. 4})$$

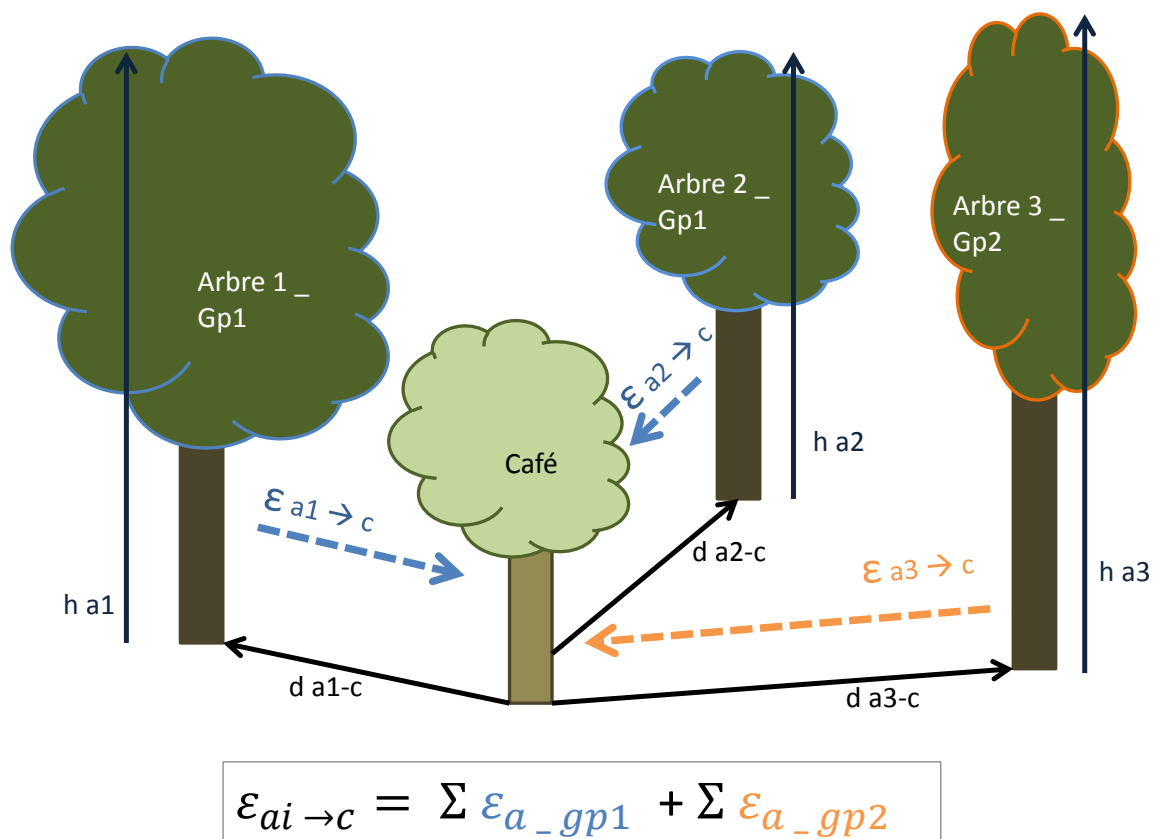


Figure 14. Schématisation des effets des arbres d'ombrage, par rapport à leur hauteur et leur distance au caféier.

2.3.2. ANALYSES DU RESEAU D'INTERACTIONS ENTRE LES COMPOSANTES DE L'AGROSYSTEME

Les modèles de type équation structurelle permettent de comprendre et de prédire le fonctionnement de systèmes complexes (Hoyle, 2012 ; Vinzi et Trinchera, 2013) ; tels que les régulations écologiques dans les systèmes agroforestiers.

Les relations entre les AO, les caféiers, et leurs MF, ont été modélisées grâce à un modèle réseau de type « partial least squares path modeling » (PLS-PM). Les PLS-PM s'appuient sur des analyses multivariées pour expliquer les relations entre différents blocs. De plus, ils n'ont pas d'exigence particulière sur la taille du jeu de données, ou sur la distribution des variables (Tenenhaus *et al.*, 2005). Ce modèle se décompose en deux sous modèles, un modèle de mesures ou externes et un modèle structurel ou interne (Fig 15).

Le modèle de mesures rend compte des relations entre des variables manifestes (VM ; variables observées) et leur variable latente (VL), qui sont construites à partir des VM.

Les VL représentent un concept et ne peuvent être mesurées directement. Un bloc est un groupe formé par une VL et ces VM (Fig 15).

Le modèle structurel décrit les relations entre les différentes VL. Le PLS-PM traite les relations entre les VL comme des régressions linéaires, de même pour les relations entre les VM et leur VL. Certaines VL sont dites endogènes comme ξ_1 et ξ_2 , et d'autres exogènes comme ξ_3 dans la Figure 15.

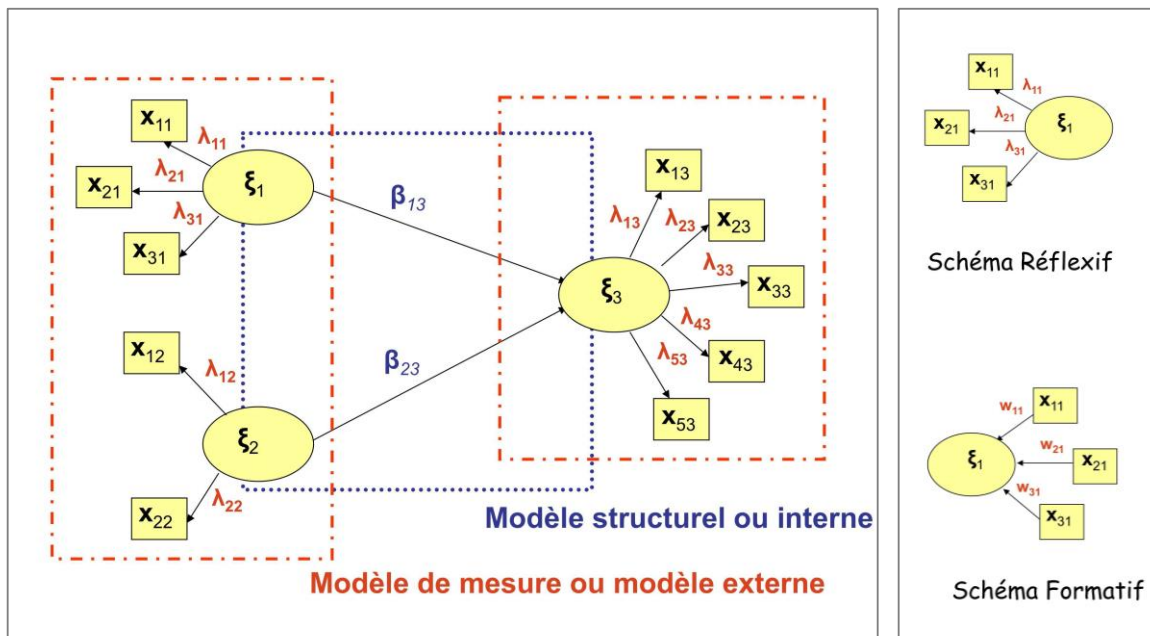


Figure 15. Représentation des sous-modèles interne et externe d'un modèle d'équations structurelles, et des différents types de sous-modèles structurels réflexifs et formatifs, d'après Vinzi et Trinchera (2013). Les variables manifestes sont représentés par les X, les variables latentes par les ξ . Les corrélations entre une VL et ses VM, dans un schéma réflexif sont nommées λ , et ω dans le schéma formatif. Les corrélations entre les VL sont représentées par les β .

Le modèle testé est composé de sept blocs, avec les VL suivantes : 'ombrage', 'caféiers', 'sol', 'maladies', 'croissance', 'production'; ces variables ont été construites sur des modèles réflexifs ou formatifs à partir des variables mesurées (Tab x). Les VL 'caféiers' et 'ombrage' sont de type exogène, alors que les autres sont endogènes (Fig 16 & Tab 2).

Tableau 2. Constructions des différentes variables latentes à partir des variables manifestes mesurées.

Variabes latentes	Variabes Manifestes	Schéma	Type
Caféiers	Age, Circonférence, Densité	Réflexif	Exogène
Ombrae	Mesures d'ombrae de Novembre, Février, Juin et Septembre + Groupe d'arbres d'ombrae ('Timber', 'Services', 'Fruit')	Formatif	Exogène
Sol	Activité biologique, pH, P, K, CEC, N, C	Formatif	Endogène
Maladies	AUDPC de la sévérité totale, de la sévérité de l'Ojo de Gallo, incidence cumulée totale et de l'Ojo de Gallo	Réflexif	Endogène
Croissance	Surface moyenne des feuilles, Nombre moyen de nœuds, Nombre moyen de nœuds nouveaux, Nombre de feuilles par rameau	Réflexif	Endogène
Production	Nombre de rameaux fructifères, Nombre de nœuds fructifères, Nombre moyen de baies par nœuds, Nombre de rameaux morts	Réflexif	Endogène

Pour construire les relations entre les variables latentes, nous nous sommes inspirés des résultats précédemment obtenus dans notre étude, mais aussi d'études antérieures (Fig 16 ; Allinne, Savary, et Avelino, 2016 ; Cerda *et al.*, 2017). Ce modèle réseau a été construit grâce à la fonction *plspm* du package *plspm* de R (Sanchez, Trinchera, et Russolillo, 2013).

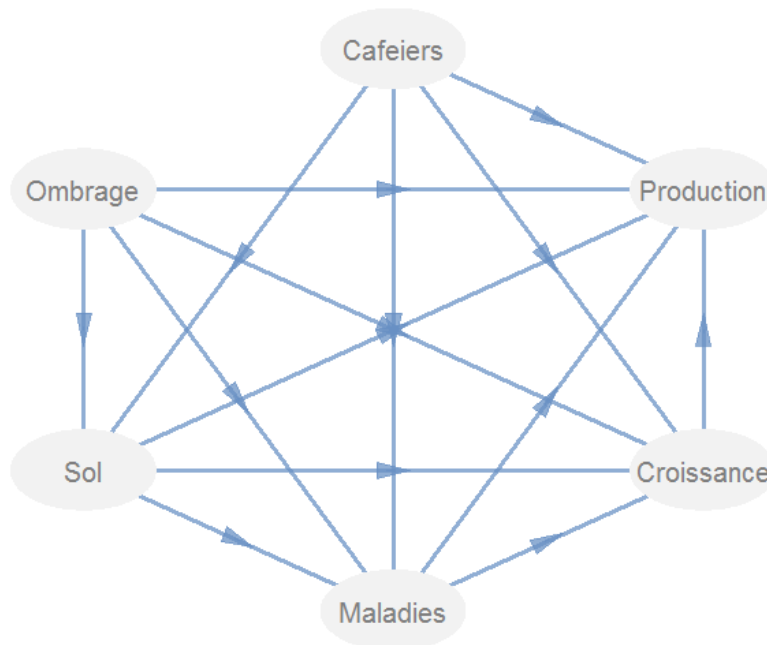


Figure 16. Relations construites entre les variables latentes du sous-modèle structurel.

Dans le cas des blocs réflexifs, les VM doivent être fortement corrélées, nous avons examiné la valeur de chaque corrélation entre les VL et les VM. D'après Sanchez (2013), les corrélations ayant un poids inférieur à 0.5 doivent être supprimées car elles ne représentent pas assez bien leur VL. Ensuite, nous avons vérifié l'unidimensionnalité des blocs avec le rho de Dillon- Goldstein's, quand le rho est supérieur à 0.7, le bloc est considéré comme unidimensionnel (Sanchez, 2013 ; Puech *et al.*, 2015).

Les blocs formatifs n'étant pas construits sur la base de corrélation entre les variables, il n'a pas été nécessaire de vérifier ces paramètres.

La robustesse du modèle a été évalué grâce au paramètre de « Goodness of fit » (Gof) et au R² des variables latentes (Sanchez, 2013).

3. RESULTATS

3.1. INFLUENCE DE L'ORGANISATION DE LA DIVERSITE ASSOCIEE DES ARBRES D'OMBRAGE SUR LES COMPOSANTES DE L'AGROSYSTEME

3.1.1. METHODE DESCRIPTIVE DES INTERACTIONS ENTRE LES COMPOSANTES DU SYSTEME

3.1.1.1 Construction de la typologie des arbres d'ombrage

Tout d'abord, l'AFM a dans les deux cas (avec et sans les espèces principales) mis en avant 3 groupes d'arbres (Fig 17).

Le premier groupe appelé « Service » regroupe majoritairement des plantes utilisées pour l'ombrage ou l'amélioration du sol, également utilisés en bois de chauffage, ce sont des arbres de hauteur relativement importante comparé aux caféiers (généralement plus de 8 m). Ce groupe est majoritairement composé de Fabaceae. Il contient les espèces du genre *Inga* dont Guaba roja. Le deuxième groupe nommé « Timber » regroupe les espèces natives forestières, ayant une hauteur généralement supérieure à 10 m, et une surface basale importante. C'est le groupe qui comprend le plus d'espèces, dont Laurel. Le dernier groupe appelé « Fruit » regroupe les arbres dont les fruits sont des productions secondaires, ils ont généralement une faible hauteur car ils sont taillés pour faciliter la récolte. Les Guineo sont présents dans ce groupe.

Lors du regroupement sans les espèces principales, le groupe 'Fruit' est très distendu avec d'un côté les espèces du genre *Citrus* et de l'autre les autres fruitiers (Annexe 6). Nous avons donc décidé de distinguer deux groupes 'Fruit' et 'Citrus', pour la suite des analyses. Pour l'analyse spatiale, nous avons donc utilisé les groupes : 'Guaba', 'Laurel', 'Guineo', 'Timber', 'Fruit', 'Services', 'Citrus'.

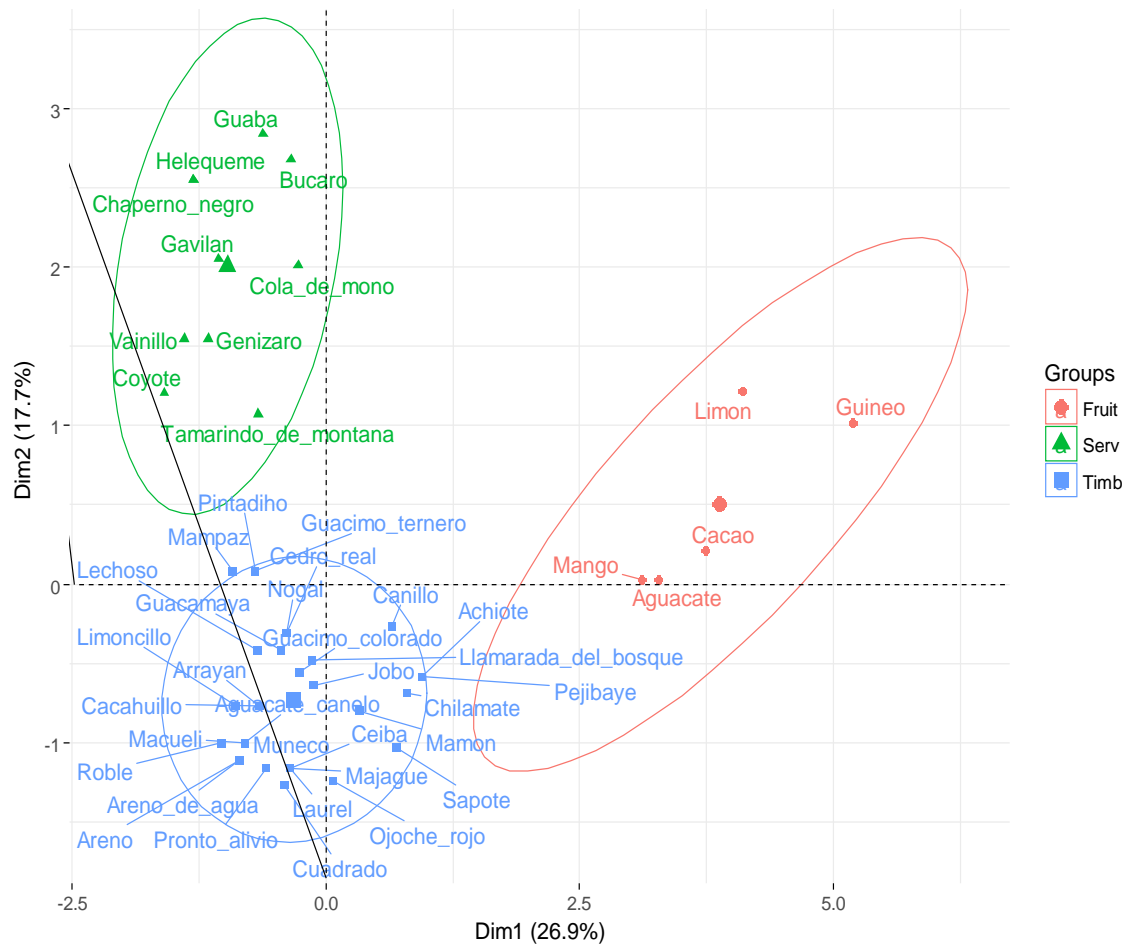


Figure 17. Résultats des regroupements par l'analyse factorielle multiple avec les espèces principales.

3.1.1.2 Caractérisation de l'ombrage

Les situations n'ont pas d'influence sur l'ouverture de la canopée : p -value = 0.48. Les fincas ont des gammes d'ombrage significativement différentes : p -value < 2^{-16} , la troisième étant beaucoup plus ombragée que les autres (Fig 18). Les variations en fonction des mois ne sont pas significatives, nous avons donc pris la moyenne de l'ombrage (Fig 18).

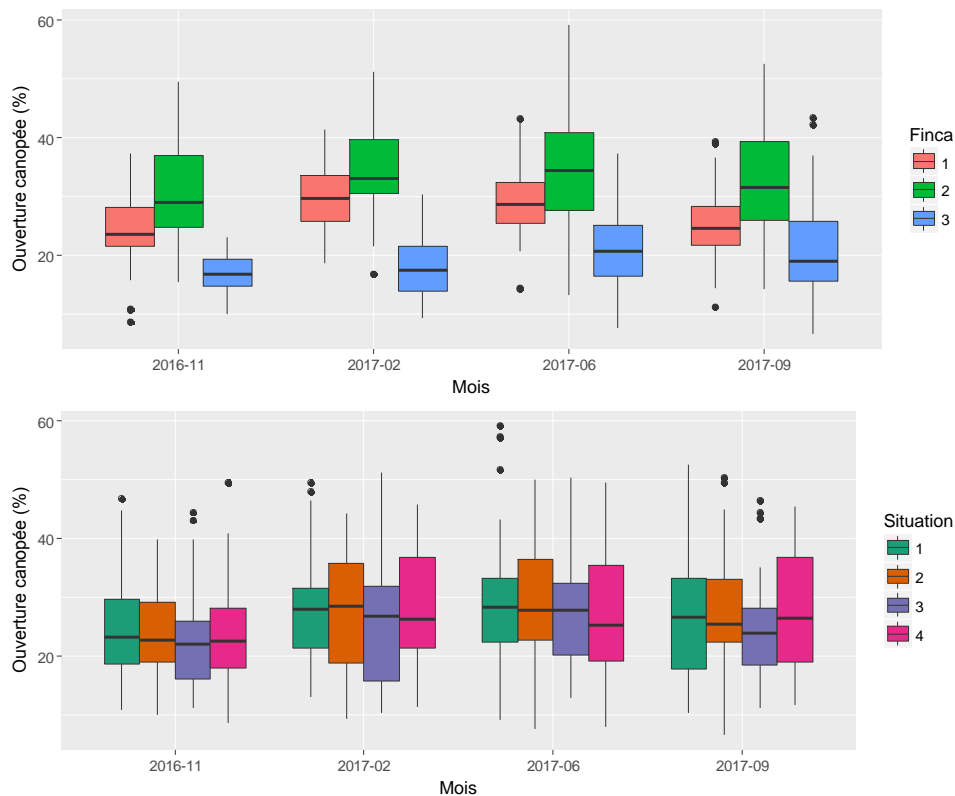


Figure 18. Evolution de l'ouverture de la canopée, en fonction des fincas (haut) et des situations : situation 1 Laurel ; situation 2 Guaba roja ; situation 3 Guineo et situation 4 autres (bas).

Concernant les résultats des modèles mixtes, les groupes d'AO n'ont pas les mêmes influences sur l'ouverture de la canopée. Les espèces d'arbres appartenant au groupe 'Fruit' et 'Guaba', n'ont pas d'effet significatif sur le taux d'ouverture de la canopée, les variations des pourcentages d'ombrage enregistrés au niveau des caféiers ombrage ne dépendent pas de ces deux groupes.

Pour les espèces des groupes 'Guineo', 'Services', 'Timber' et 'Citrus', plus l'abondance en individu est importante, plus le pourcentage d'ombrage est élevé (Fig 19). La présence des arbres du groupe 'Laurel' a un effet négatif sur l'ombrage, c'est-à-dire que leur présence et abondance ne contribue pas à augmenter le pourcentage d'ombrage (Fig 19).

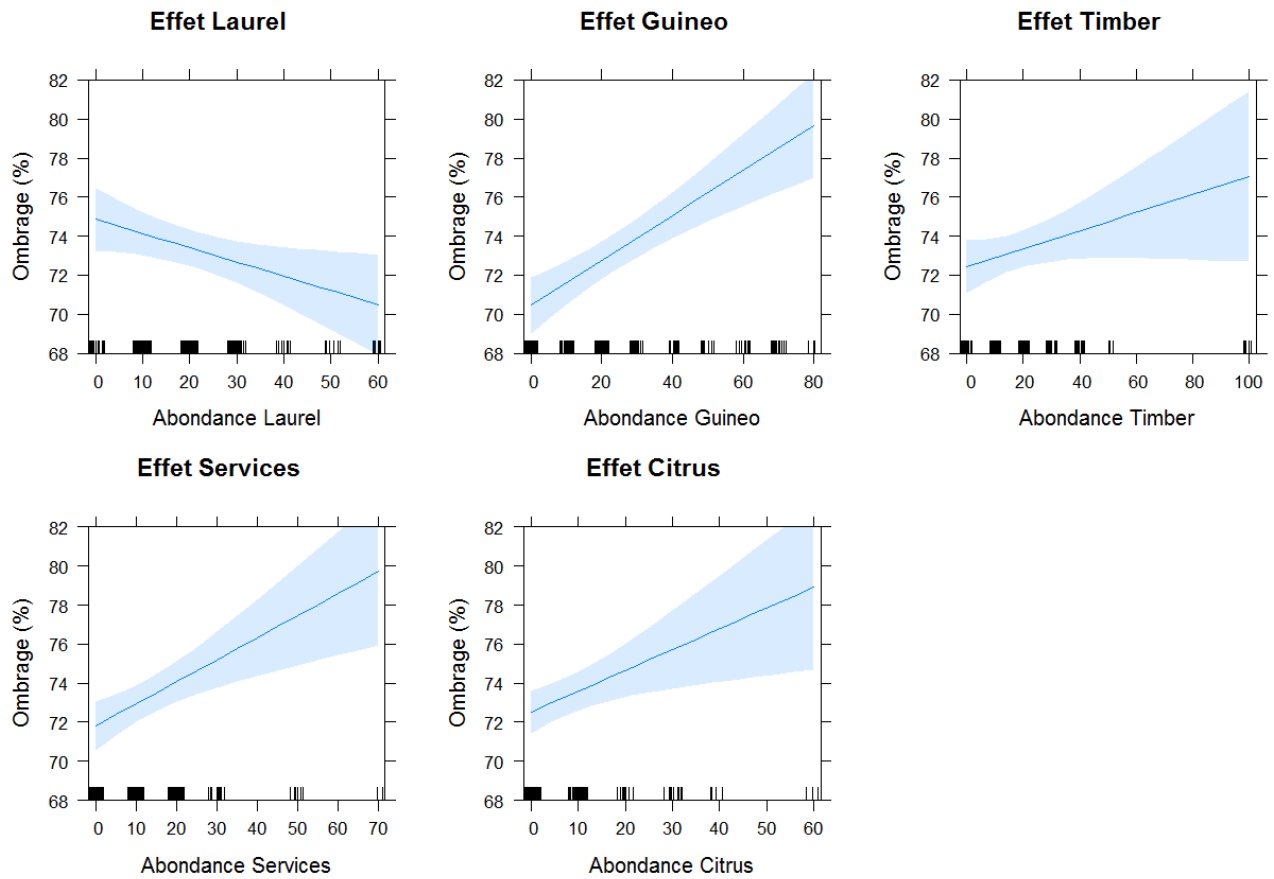


Figure 19. Effets prédits par les modèles des différents groupes d'arbres sur le pourcentage d'ombrage. La ligne pleine représente la réponse moyenne et la zone bleutée représente l'erreur de la prédiction.

3.1.1.3 Dynamique et développement du complexe de maladies foliaires

Il y avait trop peu de données pour l'antracnose et la cercosporiose, nous avons donc utilisé pour la suite de l'étude, les données sur l'OG, et sur la somme du complexe de MF.

La dispersion et le développement de l'OG ou du complexe de MF atteint un maximum lors des mois de Novembre et Février (saison des pluies), alors que le minimum est en Mai (saison sèche ; Fig 20).

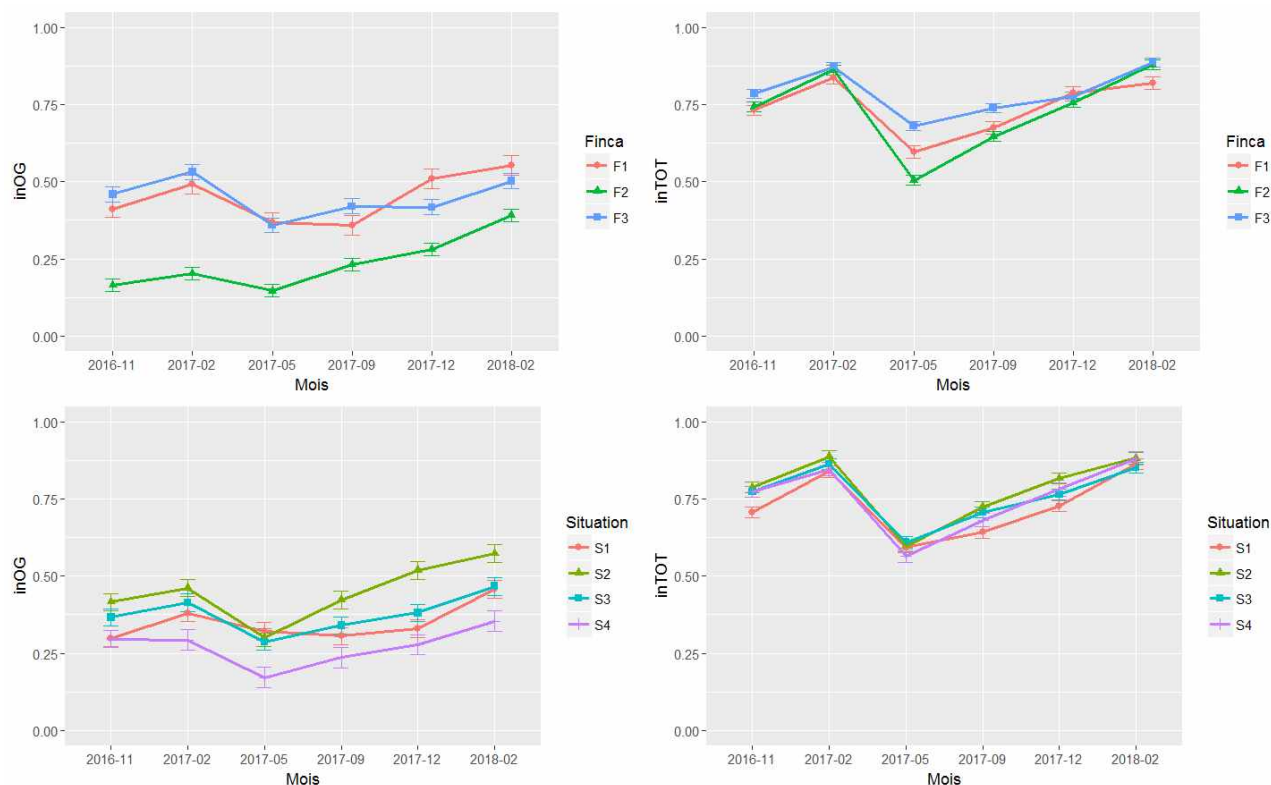


Figure 20. Incidence (ou dispersion) de l'OG (gauche) et du complexe de maladies foliaires (OG, anthracnose, cercosporiose, Otros ; droite), selon les 'fincas' en haut et les 'situations' en bas (situation 1 : Laurel, 2 : Guaba roja, 3 : Guineo, 4 : autres).

La dispersion et le développement de l'OG sont moins importants dans la finca 2, et plus important dans la finca 3 (Tab 3).

L'OG est plus présent et plus développé dans la situation 2, ou Guaba roja est l'espèce centrale. De plus, pour la situation 4 - ou l'espèce centrale n'est pas une des espèces principales - la dispersion et le développement sont moins important (Tab 3).

Tableau 3. Effets (coefficients de régression) des fincas et des situations sur la sévérité et l'incidence de l'OG, et du complexe de maladies foliaires. Avec : * p (H0) < 0,05 ; ** p (H0) < 0,01 ; *** p (H0) < 0,001

	Intercept	Finca 2	Finca3	Intercep t	Situation2	Situation3	Situation4
Sévérité OG	3.86042 ***	-0.93512 ***	0.09171 ***	3.65466 ***	0.32349 ***	-0.14579 ***	-0.67532 ***
Incidence OG	3.73767 ***	-0.55962 ***	-0.01198	3.50856 ***	0.26692 ***	0.03344	-0.30581 ***
Sévérité totale	4.73698 ***	-0.30734 ***	0.07805 ***	4.59328 ***	0.23866 ***	0.04023 *	-0.06553 **
Incidence totale	70.111 ***	-3.160	5.201 *	67.927 ***	5.727 *	3.466	2.523

Les modèles mixtes montrent qu'une augmentation de l'ombrage entraîne une augmentation significative de la dispersion et du développement de toutes les MF dont l'OG (Annexe 7).

3.1.1.4 Les facteurs de croissance et de production des caféiers

Les facteurs de récolte et de croissance montrent une bi-annualité alternée (Annexe 8 & 9). Le nombre de nœuds nouveaux, de feuilles et la surface foliaire sont réduits pendant les mois de saison sèche Février et Mai (Annexe 8).

Les caféiers de la finca 2 ont une croissance moins importante que dans les autres fincas, et la finca 3 a les taux de croissance les plus élevés (Tab 4).

Tableau 4. Résultats des modèles mixtes : représentation des coefficients de régression, et leur significativité; entre les facteurs de la croissance et les variables 'fincas' et 'situations' (situation 1 : Laurel, 2 : Guaba roja, 3 : Guineo, 4 : autres).

	Intercept	Finca 2	Finca3	Intercept	Situation2	Situation3	Situation4
Surface foliaire	3.86042 ***	-0.93512 ***	0.09171 ***	3.65466 ***	0.32349 ***	-0.14579 ***	-0.67532 ***
Nombre feuille	3.73767 ***	-0.55962 ***	-0.0119	3.50856 ***	0.26692 ***	0.03344	-0.30581 ***
Nombre nœuds	4.73698 ***	-0.30734 ***	0.07805 ***	4.59328 ***	0.23866 ***	0.04023 *	-0.06553 **
N nœuds nvx	70.111 ***	-3.160	5.201 *	67.927 ***	5.727 *	3.466	2.523

En 2017, les facteurs de la production ont été meilleurs dans les fincas 2 & 3, dans les unités étudiées. Les variations entre les situations sont faibles, cependant les situations 2 - Guaba roja et 3 - Guineo ont eu une récolte plus faible, mais également moins de rameaux morts après récolte, donc moins de perte au final. La récolte a été légèrement meilleure dans la situation 4 (Tab 5).

Tableau 5. Résultats des modèles mixtes : représentation des coefficients de régression, et leur significativité; entre les facteurs de production des caféiers et les variables 'fincas' et 'situations' (situation 1 : Laurel, 2 : Guaba roja, 3 : Guineo, 4 : autres).

	Intercept	Finca 2	Finca3	Intercept	Situation2	Situation3	Situation4
N rameau fructif 17	2.10745 ***	1.82182 ***	1.29290 ***	3.54805 ***	-0.07234 *	-0.16996 ***	0.08676 *
N nœud fructif 17	3.03801 ***	2.19484 ***	1.69586 ***	4.78673 ***	0.01496	-0.10632 ***	0.18070 ***
N rameau mort 17	1.29721 ***	0.62618 ***	- 0.068	1.70969 ***	-0.19935 *	-0.25194 **	-0.14327

Les modèles mixtes montrent que les variables relatives à la croissance des caféiers - qui sont la surface moyenne des feuilles, le nombre de feuille et de nœuds et le nombre de nœuds nouveaux - sont faiblement défavorisés par le pourcentage d'ombrage. Pour autant certaines tendances sont visibles, par exemple un fort ombrage a tendance à réduire la croissance végétative. De plus, les caféiers atteints par les MF ont globalement une croissance végétative amoindrie. A contrario, même si les effets sont faibles, l'ombrage a un effet positif sur le nombre de rameaux et de nœuds fructifères (Annexe 7).

3.1.2. ANALYSES SPATIALES EXPLORATOIRES : EFFETS DES GROUPES D'ARBRES D'OMBRAGE SUR LES MALADIES FOLIAIRES DE *C. ARABICA*

L'analyse spatiale exploratoire nous a permis de mettre en avant les effets des arbres d'ombrage sur les MF.

Pour les modèles basés sur l'incidence des MF, l'estimation du coefficient α de l'équation, n'a pas pu toujours être validée car certains modèles ne convergeaient pas. Notamment, pour le cas de l'incidence totale ou aucun des effets n'a pu être mis en évidence.

Plus, les coefficients α sont élevés, plus l'effet du groupe d'AO est restreint à une faible distance, comme pour les groupes 'Guineo' et 'Fruit', dans le cas de la sévérité de l'OG. A contrario, un coefficient α 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' (Fig 21).

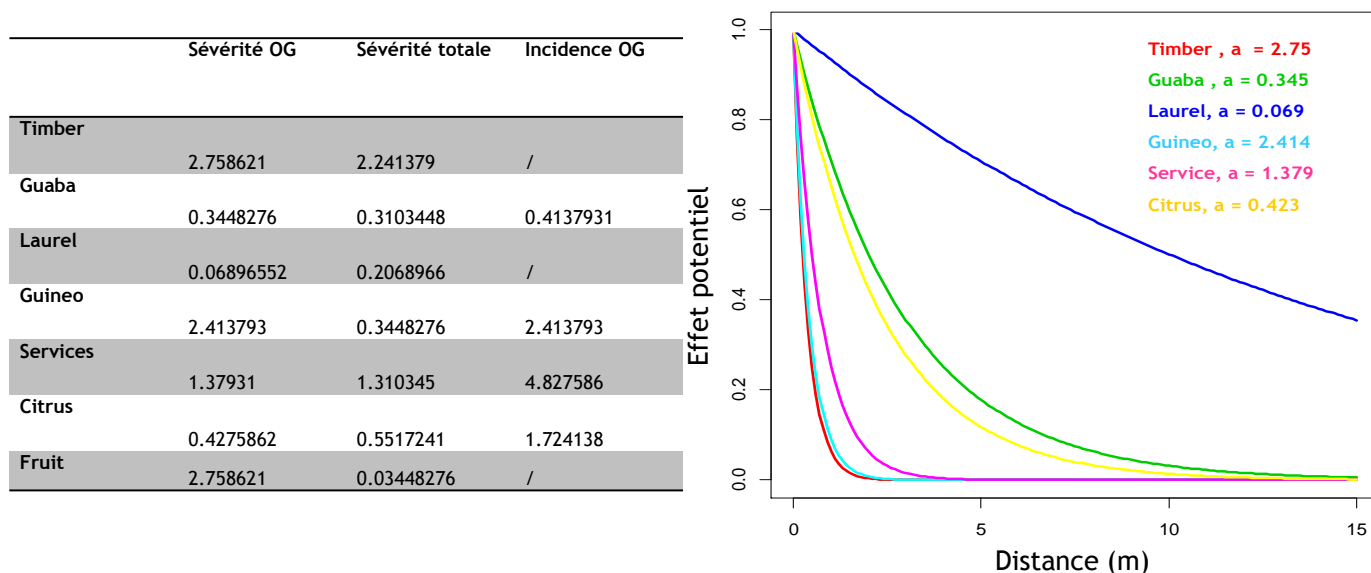


Figure 21. Tableau présentant les différentes valeurs des coefficients α , en fonction de la sévérité de l'OG, de la sévérité totale et de l'incidence de l'OG (Gauche). Le graphe de droite représente les effets potentiels des arbres d'ombrage (avant pondération par la hauteur) sur la sévérité de l'OG, en fonction de leur distance aux caféiers.

Concernant la sévérité et l'incidence de l'OG, les effets des 'Citrus' et des 'Guaba' sont 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, 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 MF. Les autres groupes ont un coefficient de régression positif, c'est-à-dire que leur présence

favorise le développement des MF. Pour les 'Guineo' et les 'Fruit' ces effets sont opposés à leur effet sur l'OG (Fig 22).

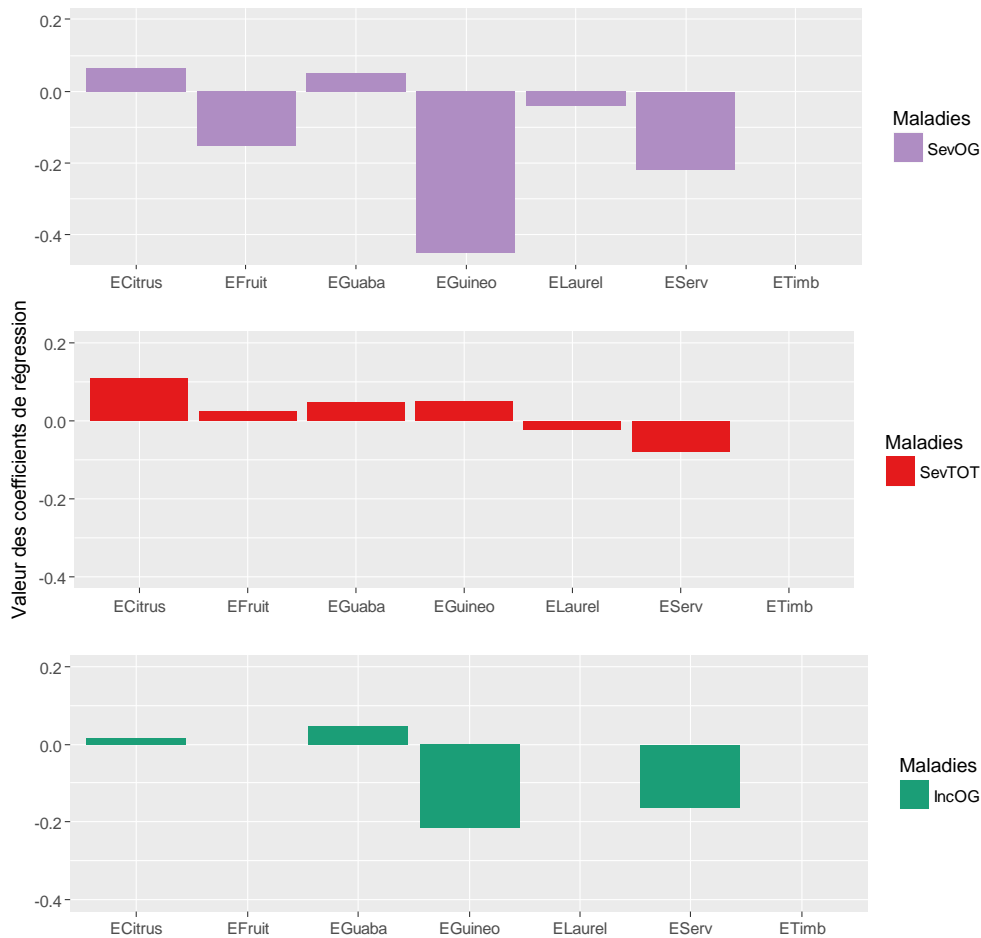


Figure 22. Coefficient de régression des effets de chaque groupe d'arbres sur la sévérité ou l'incidence des MF, du modèle GLMM final.

3.2. ANALYSES DU RESEAU D'INTERACTIONS ENTRE LES COMPOSANTES DE L'AGROSYSTEME

Le modèle structurel PLS-PM, qui est un modèle réseau nous a permis de mettre en évidence les relations complexes entre les caféiers, les AO, les MF et le sol. Des vérifications du sous-modèle de mesures et du sous-modèle structurel sont nécessaires pour valider le modèle global, et comprendre les différentes interactions.

Cette vérification, nous a indiqué que nos blocs étaient bien construits. Dans le cas des blocs réflexifs, le rho de Dillon-Goldstein's était toujours supérieur à 0,7, et les valeurs des corrélations étaient supérieures à 0,5 (Fig 23).

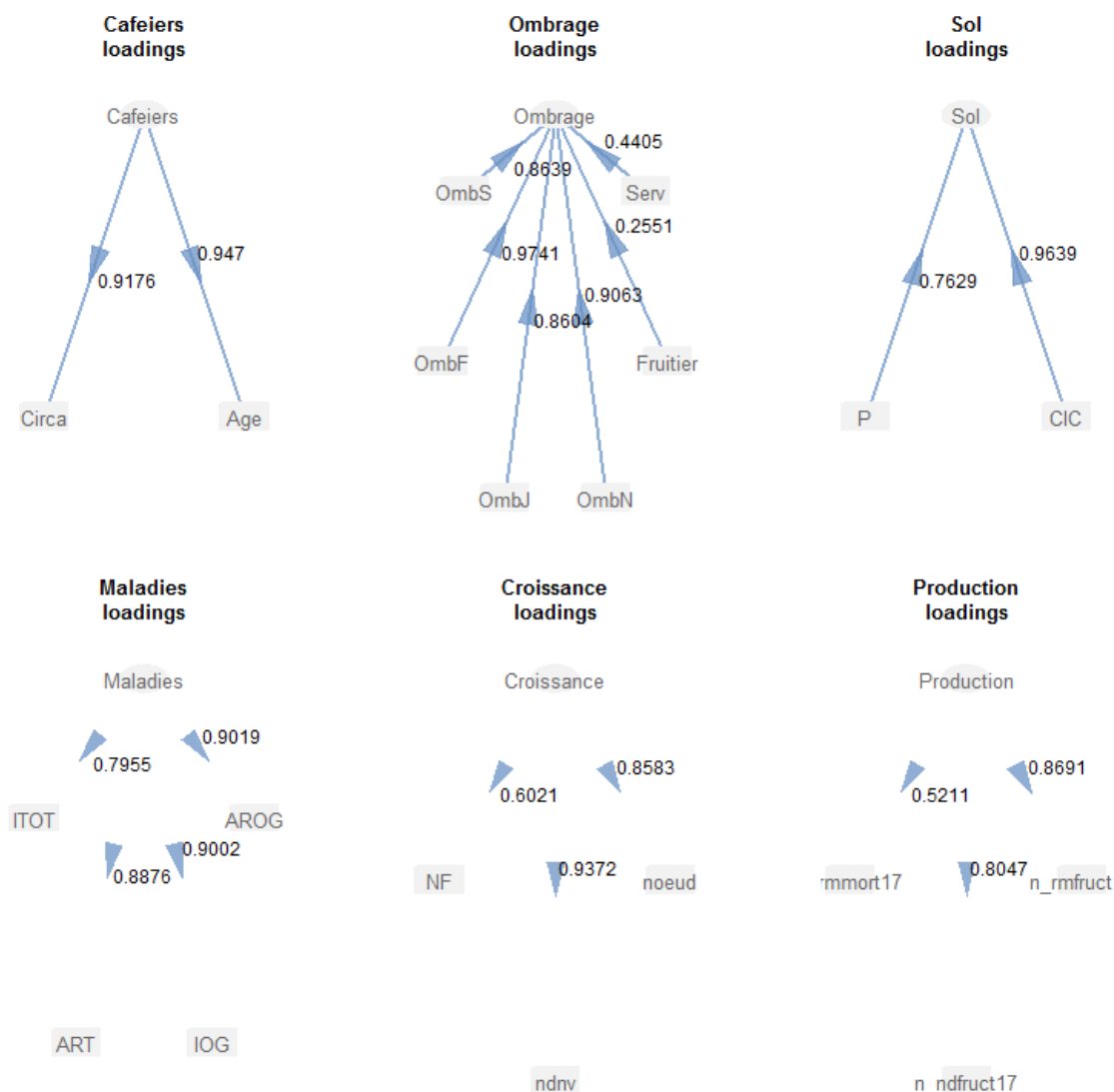


Figure 23. Sous-modèle de mesures du PLS-PM, représentant le poids des corrélations entre les variables latentes et leurs variables manifestes associés. La VM ‘Caféier’ est expliquée par la circonférence et l’âge des caféiers ; la VM ‘Ombrage’ est expliquée par le pourcentage d’ombrage en Novembre, Février, Juin et Septembre, et par la présence et l’abondance des groupes d’AO ‘Fruit’ et ‘Services’ ; le ‘Sol’ est expliqué par le taux de phosphore et la capacité d’échange cationique ; la VM ‘Maladies’ contient les mesures de sévérité et d’incidence de l’OG et du complexe de maladies ; la ‘Croissance’ est expliquée par le nombre de feuilles, de nœuds et de nœuds nouveaux ; la ‘Production’ est expliquée par le nombre de rameaux et de nœuds fructifères, et le nombre de rameaux morts.

Ensuite, nous avons vérifié la validité du sous-modèle structurel (liens entre les variables latentes), grâce aux coefficients de détermination R^2 , et au paramètre de Goodness of fit. Ce dernier, nous indiquait une valeur de 0.5235, qui est une valeur correcte, au vue de la complexité du modèle d’étude (Puech *et al.*, 2015).

Les coefficients de détermination R^2 des variables latentes endogènes : ‘maladies’, ‘production’ ont une valeur modérée, soit comprise entre 0.2 et 0.5 ; contrairement au R^2 des VL ‘sol’ et ‘croissance’ qui ont une valeur élevée, soit supérieure à 0.5 (Tab 6).

Tableau 6. Résultat du PLS-PM, présentant les R² qui expriment la part de variance expliquée d'une variable latente par les autres variables latentes.

	Type	R2
Caféiers	Exogène	0.000
Ombrage	Exogène	0.000
Sol	Endogène	0.519
Maladies	Endogène	0.230
Croissance	Endogène	0.564
Production	Endogène	0.354

Toutes les corrélations mises en avant par le modèle PLS-PM sont significatives, néanmoins les valeurs de ces dernières sont très variables (Fig 24).

Les MF sont favorisées par un ombrage important et la présence des groupes 'Fruit' et 'Services' (comprenant les Guaba). Et plus l'intensité de l'infestation par les MF est forte, plus la croissance et la production vont être diminuées (Fig 24).

Un sol avec des taux de phosphore élevé, et une capacité d'échange cationique élevé diminue le développement et la dispersion des MF (-0.0578). Le sol est affecté positivement par la VL 'ombrage' (+0.58) mais négativement par les caféiers les plus âgés (-0.28), ce qui veut dire que plus les caféiers sont âgés plus ils ont tendance à appauvrir le sol (Fig 24).

Les caféiers les plus âgés et/ou avec des axes orthotropes bien développés ont eu une meilleure croissance en 2017 (+0.54), mais de moins bonne production (-0.34). Ces caféiers sont également plus sensibles aux maladies (+0.15 ; Fig 24). Enfin, les caféiers qui ont eu une forte croissance en 2017, n'ont pas eu un bon rendement.

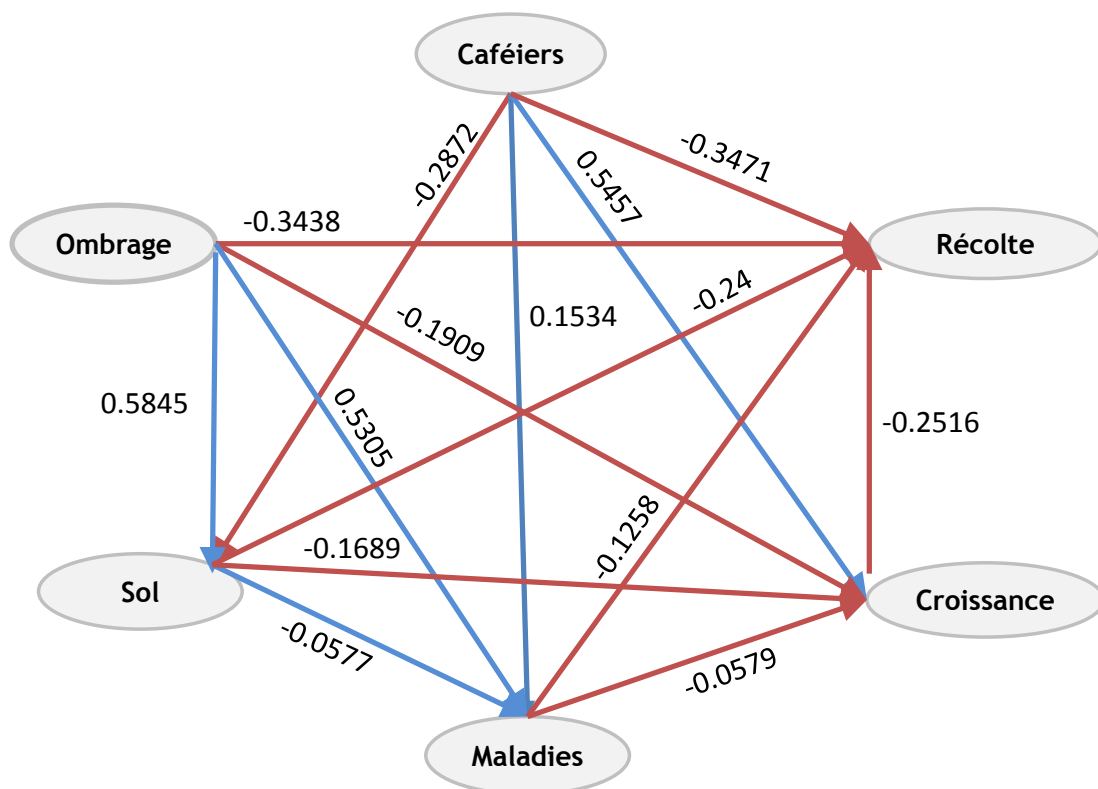


Figure 24. Représentation du sous-modèle structurel du PLS-PM, comprenant l'intensité et le sens des effets entre chaque variable latente.

4. DISCUSSION

4.1. INFLUENCE DE L'ORGANISATION DE LA DIVERSITE ASSOCIEE DES ARBRES D'OMBRAGE SUR LES MALADIES FOLIAIRES, LA CROISSANCE ET LA PRODUCTION DES CAFEIERS

4.1.1. CARACTERISATION DE L'OMBRAGE

Les gammes d'ombrage sont significativement différentes entre les trois fincas (Fig 18). La troisième est celle avec le pourcentage d'ombrage moyen le plus élevé, alors que la seconde a le plus faible (Fig 18). Ces résultats montrent que les modes de gestion (i.e. le choix des espèces associées, leur organisation dans l'espace et l'élagage) influencent directement l'ouverture de la canopée à l'échelle de la parcelle. A contrario, l'espèce d'arbre central n'influence pas l'ouverture de la canopée, cela vient du fait que l'organisation spatiale des arbres d'ombrage dans les unités n'est pas dépendant de l'espèce d'arbre central.

L'ouverture de la canopée est également dépendante des groupes d'arbres d'ombrage présent dans les unités, comme le montre le GLMM mettant en relation le pourcentage d'ombrage et les groupes d'arbres (Fig 19). Ce modèle montre que la présence et l'abondance des arbres appartenant aux groupes 'Guineo', 'Services', 'Citrus' et 'Timber' augmente le pourcentage d'ombrage. Ce résultat est dépendant de la structure des canopées de ces arbres, et de leur hauteur. A contrario, la présence et l'abondance des 'Laurel' permet de maintenir une canopée plus ouverte, qui peut s'expliquer par l'architecture de ces arbres (arbres hauts avec une faible surface basale et une structure de canopée compacte) qui fournit naturellement un ombrage moins important que d'autres espèces (MacCarter et Greaves, 1990). C'est une espèce assez abondante, et leur présence empêche sûrement d'autres espèces qui produisent plus d'ombrage de s'installer.

En résumé, l'ouverture de la canopée est dépendante du mode de gestion de la parcelle : le choix des espèces d'arbres d'ombrage ainsi que l'élagage, mais aussi de l'organisation spatiale des arbres et leur structure dans l'unité.

4.1.2. INTERACTIONS AVEC LES MALADIES FOLIAIRES

A l'échelle des fincas, la seconde est celle avec le niveau le plus bas de maladies, alors que la troisième a les niveaux les plus hauts (Tab 3). Ce résultat peut être mis en parallèle avec les taux d'ouverture de canopée présent dans les parcelles, la finca 2 qui a la canopée la plus ouverte à également des niveaux d'infestations par les MF globalement plus bas que les autres fincas. Contrairement à la finca 3, qui a une canopée plus fermée et des niveaux de MF plus haut. L'ouverture de la canopée dans les parcelles a donc un effet direct sur la dispersion et le développement des MF, plus elle est ouverte moins il y a de maladies (Avelino *et al.*, 2007).

L'espèce d'arbre central (les situations) a un effet variable sur les niveaux d'infestation des maladies (Tab 3). Par rapport à la situation 1 (Laurel), la situation 2 (Guaba) augmentent le développement de l'OG et du cortège de maladies. Alors que les 'Guineo' (situation 3) régulent l'OG, mais favorisent le complexe de maladies. Dans la situation 4 (ou l'espèce n'est pas une des espèces principales), l'OG est diminué par la présence et l'abondance de ces AO, de même que le complexe de maladies. Ces effets ne sont pas liés à l'ouverture de la canopée, car celle-ci n'est pas influencée par les situations, mais plutôt par les espèces d'arbres.

L'analyse spatiale nous a permis d'approfondir ces résultats, et de les confronter aux méthodes plus 'classiques' qui sont les modèles linéaires. Cette analyse a pu mettre en avant les effets des trois espèces principales Laurel, Guaba, Guineo, et des groupes 'Citrus', 'Fruit', 'Services' et 'Timber' sur les MF.

Le groupe 'Laurel' composé de l'espèce *Cordia alliodora*, a un effet régulateur sur la dispersion et le développement des MF (Fig 22). Ce résultat peut être mis en relation avec l'effet négatif des Laurel sur le pourcentage d'ombrage, leur structure de canopée compacte aurait donc un effet régulateur sur les MF en limitant une humidité trop importante (MacCarter et Greaves, 1990). Ce résultat conforte notre hypothèse de départ sur l'importance de l'ouverture de la canopée dans la réduction des MF, par un microclimat moins humide.

Le groupe 'Guaba' composé des espèces du genre *Inga*, ont un effet positif sur le niveau d'infestation des maladies foliaires, ce qui rejoint les résultats des modèles précédents. Cet effet positif, est lié au fait que les *Inga sp* sont des hôtes alternatifs de l'Ojo de Gallo, cela valide notre hypothèse de départ concernant les niveaux d'infestation plus élevés pour les caféiers sous couvert d'espèces étant des hôtes alternatifs (Sequeira, 1958 ; Bedimo *et al.*, 2012).

Le groupe 'Guineo' (bananiers) a un effet régulateur sur l'OG, mais favorise légèrement le complexe de MF (Fig 22), ce qui rejoint les résultats des modèles mixtes précédents. Cet effet régulateur de l'OG pourrait venir d'un effet de barrière, dû aux feuillages importants des bananiers. Au contraire, l'effet positif sur le complexe de MF pourrait venir d'une transmission d'une maladie foliaire des bananiers vers les caféiers, ou à cause de l'ombrage trop important.

Les espèces du groupe 'Citrus', favorisent le complexe de maladies foliaires, dont l'OG (Fig 22). Ce résultat est lié au fait que les *Citrus sp*, sont des hôtes alternatifs de nombreuses MF qui affectent également les caféiers (Sequeira, 1958 ; Bedimo *et al.*, 2012). De plus, ce sont des espèces de faible hauteur, qui peuvent donc entrer en contact direct avec les caféiers, ce qui facilite la dispersion des maladies.

Le groupe 'Fruitier' comme les 'Guineo' régulent le développement de l'OG mais favorise le développement du complexe de MF. Certaines espèces du groupe 'Fruit' peuvent être des hôtes alternatifs de certaines maladies foliaires comme l'antracnose et l'OG.

L'analyse spatiale ne démontre pas d'effets significatifs du groupe 'Timber', sur la dispersion et le développement des MF. Ce qui est dû au fait que ce groupe est composé d'un grand nombre d'espèces, qui ne sont que peu abondantes dans les parcelles. Ces espèces ont sûrement des effets divergents ce qui ne permet pas de dégager un effet global du groupe. Il serait intéressant d'aller plus loin dans la constitution des groupes d'arbres, pour affiner les effets de ces espèces forestières.

4.1.3. LA CROISSANCE ET LA PRODUCTION DES CAFÉIERS

A l'échelle des fincas, la finca 3 a globalement une meilleure croissance et une meilleure production que la finca 1. Et la finca 2 possède des caféiers ayant une croissance plus faible que les deux autres mais une production plus élevée. Concernant la finca 3, les résultats vont à l'encontre de notre hypothèse de départ, qui prédisait que plus le niveau d'infestation est haut plus la croissance et la production sont diminuées (Tab 3 & 4). Ces résultats contredisent les modèles mixtes qui montrent que les facteurs de croissance et de productions sont négativement affectés par les MF. Cette différence est due au fait que le point de comparaison dans les modèles linéaires simples, et la première finca, or celle-ci a eu une production en 2017 très basse comparait aux années antérieures (recépage et élagage des caféiers). Il est donc difficile de conclure sur l'effet des MF sur la production des caféiers avec ces résultats.

A l'échelle des situations, la croissance et la production sont plus faible dans la situation 3 avec les bananiers, ce résultat est en lien avec la compétition pour les ressources avec les bananiers (Wairegi *et al.*, 2014).

Dans la situation 2 (Guaba), avec les *Inga sp*, la croissance est meilleure (Tab 3). Ce résultat est lié à la caractéristique fixatrice d'azote de ces espèces, qui améliore la qualité du sol, et donc la composition en nutriments disponibles pour les caféiers (Ferrandino, 2008 ; Hergoualc'h *et al.*, 2008 ; Bedimo *et al.*, 2012). Par contre, la production est moins bonne, ce qui est lié au niveau élevé de MF présent dans ces situations, les MF affectent la bonne vigueur des caféiers, et donc leur production finale (Cerdeira *et al.*, 2017). Le schéma inverse est présenté dans la situation 4 (avec des espèces différentes des trois principales) ou les caféiers ont une croissance plus faible mais une production plus élevée. La meilleure production est sûrement due au niveau plus faible de maladies présent dans ces situations.

A l'avenir, il serait intéressant de réaliser une analyse spatiale avec les paramètres de croissance et de production des caféiers, pour les confronter à ces résultats.

L'organisation spatiale des arbres d'ombrage a un effet complexe et parfois ambivalent sur la bonne vigueur générale des caféiers. Pour résumer, les Guineo ont un effet global sur les caféiers antagonistes, car ils régulent les MF mais entrent en compétition pour les ressources avec les

caféiers. Les Laurel ont un effet moyen sur la croissance et la production, et un effet régulateur sur les MF. Leur présence est donc favorable aux caféiers. Les Guaba (*Inga sp*) ont un effet plutôt négatif sur les caféiers, car ils favorisent les MF, ce qui amène à une réduction indirecte de la production des caféiers. Sur les espèces forestières et fruitières (Situation 4 - groupe 'Fruit' et 'Timber'), régulent les MF, tout en augmentant la production, il serait donc intéressant d'approfondir les analyses sur ces groupes.

Pour comprendre, le fonctionnement global du système, il faut donc se placer dans un contexte d'analyse du réseau d'interactions pour avoir une vue d'ensemble sur les relations complexes entre tous les composants de ces SAF café.

4.2. ANALYSES DU RESEAU D'INTERACTIONS ENTRE LES COMPOSANTES DE L'AGROSYSTEME

4.2.1. LES INTERACTIONS AVEC LES MALADIES FOLIAIRES

Le PLS-PM s'accorde avec les résultats précédents sur le fait que les maladies foliaires sont largement favorisées par de fort pourcentage d'ombrage (Fig 25).

Un sol avec un taux de phosphore élevé et une capacité d'échange cationique élevée (CEC), diminue le niveau d'infestation des maladies foliaires. Les caféiers présents dans ces sols ont une meilleure résistance aux maladies, du fait d'une plus grande disponibilité des nutriments (Avelino *et al.*, 2007 ; Descroix et Snoeck, 2008).

4.2.2. LES INTERACTIONS AVEC LA CROISSANCE ET LA PRODUCTION DES CAFEIERS

La VL 'ombrage' diminue la croissance et la production (Fig 25). C'est-à-dire qu'un pourcentage d'ombrage élevé diminue les facteurs de croissance et de production (DaMatta, 2004) ; mais ce résultat va à l'encontre d'une étude récente et serait donc à approfondir (Charbonnier *et al.*, 2017).

Les effets des GLMM sont contradictoires sur ce point, ce qui peut être en lien avec la relation non linéaire qui existe entre le pourcentage d'ombrage et les facteurs production des caféiers. En effet, l'effet de l'ombrage serait plutôt caractérisé comme un « effet dose », ou un pourcentage d'ombrage trop fort ou trop faible affecterait négativement la production de baies. Dans les parcelles étudiées, les optimums de production sont autour de 70 % d'ombrage (Annexe

10). Cela mériterait donc une analyse plus approfondie, par exemple en quantifiant les optimums pour chaque finca et situation.

Une forte intensité d'infestation par les MF diminue la croissance et la production, ce qui valide notre hypothèse de départ sur l'effet négatif des maladies sur le rendement des caféiers (Cerdea *et al.*, 2017).

La production est plus fortement affectée par la croissance. En effet, les caféiers qui ont eu une forte croissance en 2017, n'ont pas eu un bon rendement, ce qui est dû à la bi annualité et à l'alternance de l'allocation des ressources, chez *C. arabica* (Cannell, 1985 ; Wintgens J., 2008).

La variance expliquée des taux de croissance est supérieure à 50%. Par contre, la variance expliquée pour la production est moins élevée (<40%). Nous pensons donc que ce modèle pourrait être amélioré en ajoutant les pertes secondaires (nombre de rameaux morts en 2016) qui est une variable qui impacte directement le nombre de rameaux disponibles pour produire des baies et donc la production de 2017. De plus, les caféiers alternent l'allocation de leur ressource d'un cycle sur l'autre, la croissance enregistrée en 2016 aurait pu également affecter la production de 2017.

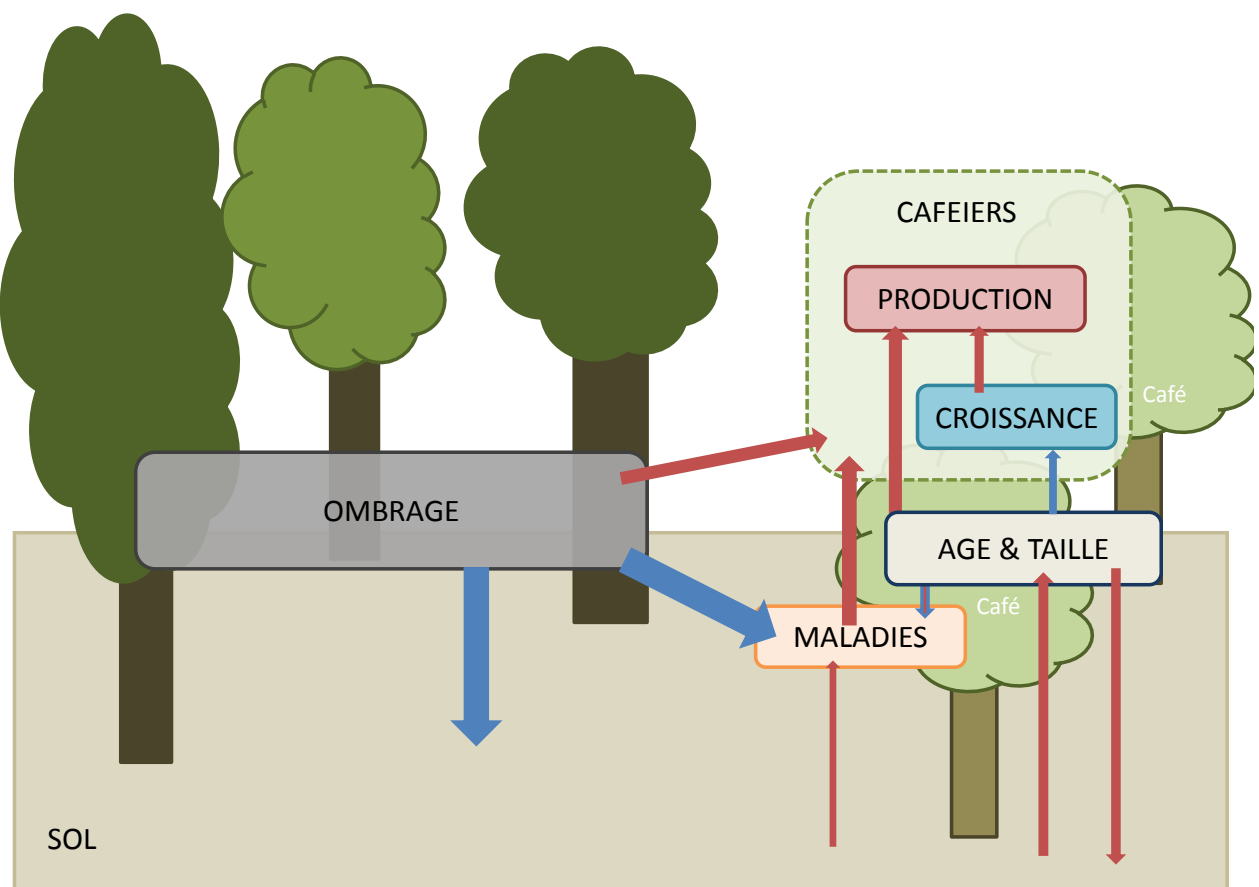


Figure 25. Schéma des résultats issus du sous-modèle structurel, présentant les liens directs entre les variables latentes, les relations positives étant représentées en bleu, et les relations négatives en rouge. La taille des flèches indique l'importance de la corrélation.

Dans le PLS-PM, la part de variance expliquée (R^2) a une valeur moyenne, c'est-à-dire que le modèle n'explique pas complètement les variations des facteurs croissance et production observés. Ces résultats sont en lien avec la complexité des systèmes agroforestiers, et qu'il n'est pas possible d'intégrer de manière exhaustive tous les paramètres pouvant influencer ces facteurs (Puech *et al.*, 2015). Les fluctuations de températures, et les régimes de précipitations ont par exemple un impact fort sur la croissance et la production des caféiers. De même que la qualité du sol, autant de paramètres que nous n'avons pas pu intégrer dans nos modèles mais qui mériteraient d'être testés.

Le PLS-PM est un modèle très peu utilisé en écologie, pourtant il a l'avantage d'avoir peu d'exigence sur la taille du jeu de données et sur la distribution des variables. L'utilisation de PLS-PM soulève tout de même quelques limites, notamment au niveau de l'impossibilité d'ajouter des effets aléatoires, ce qui dans notre étude a probablement induit quelques biais, dus aux variations importante entre les fincas.

5. CONCLUSION

Notre étude a permis de mettre en avant l'importance de la gestion par les producteurs de l'ouverture de la canopée sur les taux d'infestations par les maladies et sur la production des caféiers. L'ouverture de la canopée dépend des espèces d'arbres d'ombrage, de leur structure, et de leur gestion (élagage). Les différentes analyses démontrent que chaque groupe ou espèces d'arbres a un effet unique sur la régulation des maladies mais aussi sur les facteurs de production des caféiers. Leurs effets sur les caféiers peuvent être antagonistes, comme les *Inga sp* (Guaba) qui favorisent les maladies foliaires mais améliorent la qualité du sol.

Nous n'avons pas pu mesurer les paramètres permettant d'identifier les différents types de structure de canopée. D'après nos résultats nous pensons qu'ajouter ces mesures apporterait un niveau de compréhension supérieur sur l'effet des arbres d'ombrage dans la dispersion des maladies foliaires des caféiers.

L'analyse du réseau d'interactions, nous a permis d'avoir une compréhension globale des SAF caféiers étudiées, et l'analyse spatiale nous a apporté un niveau de précision élevé sur les effets que peuvent avoir les espèces d'arbres sur la bonne vigueur des caféiers. Ces résultats couplés, nous permettent d'imaginer de nouveaux indicateurs : intégrant les relations interspécifiques entre arbres d'ombrage, caféiers et maladies. Ces indicateurs pourraient être appliqués à d'autres systèmes agroécologiques et apporteraient une meilleure compréhension des régulations qui opèrent dans ces systèmes de cultures.

Ce travail s'inscrit dans l'élaboration d'une méthode permettant de voir quelle est la composition de la diversité d'arbres d'ombrage optimale permettant d'assurer la meilleure production possible des caféiers. Ces premiers résultats sont une première brique, dans le processus d'échanges avec les producteurs afin de les aider à mieux gérer ces systèmes complexes (gestion de l'ombrage pour maximiser la production des caféiers).

6. REFERENCES

- Allinne C., Savary S., et 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 & Environment*. 222, p. 1-12.
- Altieri M. et Nicholls C. 2004. *Biodiversity and Pest Management in Agroecosystems, Second Edition*. CRC Press, 259 p.
- Altieri M.A. 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. , p. 13.
- Amores Contreras M.. 2015. Contribución de los árboles en finca a los medios de vida de familias rurales en dos sitios contrastantes de Nicaragua.
- Avelino J., Allinne C., Cerda R., Willocquet L., et Savary S. 2018. Multiple Disease System in Coffee: From Loss Assessment to Sustainable Management. *Annual Review of Phytopathology*. 56, in press.
- Avelino J., Cabut S., Barboza B., Barquero M., Alfaro R., Esquivel C., Durand J.-F., et Cilas C. 2007. Topography and Crop Management Are Key Factors for the Development of American Leaf Spot Epidemics on Coffee in Costa Rica. *Phytopathology*. 97(12), p. 1532-1542.
- Avelino J., Cristancho M., Georgiou S., Imbach P., Aguilar L., Bornemann G., Läderach P., Anzueto F., Hruska A.J., et Morales C. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*. 7(2), p. 303-321.
- Bacon C. 2005. Confronting the Coffee Crisis: Can Fair Trade, Organic, and Specialty Coffees Reduce Small-Scale Farmer Vulnerability in Northern Nicaragua? *World Development*. 33(3), p. 497-511.
- Barel M. et Jacquet M. 1994. La qualité du café : ses causes, son appréciation, son amélioration. *Plantations, Recherche, Développement*. 1, p. 5-13.
- Barradas V.L. et Fanjul L. 1986. Microclimatic characterization of shaded and open-grown coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*. 38(1), p. 101-112.
- Bates D., Mächler M., Bolker B., et Walker S. 2014. Fitting Linear Mixed-Effects Models using lme4. *arXiv:1406.5823 [stat]*.
- Bates D., Maechler M., Bolker B., et Walker S. 2018. *Linear Mixed-Effects Models using « Eigen » and S4*.
- Bedimo J.A.M., Dufour B.P., Cilas C., et Avelino J. 2012. Effets des arbres d'ombrage sur les bioagresseurs de *Coffea Arabica*. *Cahiers Agricultures*. 21(2-3), p. 89-97 (1).
- Belachew K. 2015. Coffee Thread Blight (*Corticium koleroga*): a Coming Threat for Ethiopian Coffee Production. *Journal of Plant Pathology & Microbiology*. 06(09).
- Bhagwat S.A., Willis K.J., Birks H.J.B., et Whittaker R.J. 2008. Agroforestry: a refuge for tropical biodiversity? *Trends in Ecology & Evolution*. 23(5), p. 261-267.
- Boshier D., Salvado J., et Detlefsen G. 2009. Mesoamerican tree species: a source book for farm planting and ecological restoration. Final Technical Report.

- Caceido A. 2016. Diversidad y almacenamiento de carbono, en dos sitios con diferente grado de intensificación de uso de suelo de Nicaragua.
- Camargo Ângelo P.D. et Camargo M.B.P.D. 2001. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia*. 60(1), p. 65-68.
- Cannell M.G.R. 1985. Physiology of the Coffee Crop. Dans : *Coffee*. Springer, Boston, MA, p. 108-134.
- Cerda R., Avelino J., Gary C., Tixier P., Lechevallier E., et Allinne C. 2017. Primary and Secondary Yield Losses Caused by Pests and Diseases: Assessment and Modeling in Coffee. *PLOS ONE*. 12(1), p. e0169133.
- Cerdán C.R., Rebolledo M.C., Soto G., Rapidel B., et Sinclair F.L. 2012. Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. *Agricultural Systems*. 110, p. 119-130.
- Chapman H.D. 1965. Cation-Exchange Capacity 1. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. agronomymonogra(methodsofsoilnb), p. 891-901.
- Charbonnier F., Roupsard O., Maire G. le, 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., Meersche K.V.D., Aguilar A.B., Lehner P., et Dreyer E. 2017. Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. *Plant, Cell & Environment*. 40(8), p. 1592-1608.
- Charrier A. et Eskes A. B. 2008. Botany and Genetics of Coffee. Dans : *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*. Wiley-Blackwell, p. 25-56.
- DaMatta F.M. 2004. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Research*. 86(2), p. 99-114.
- DaMatta F.M., Ronchi C.P., Maestri M., et Barros R.S. 2007. Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 19(4), p. 485-510.
- Descroix F. et Snoeck J. 2008. Environmental Factors Suitable for Coffee Cultivation. Dans : *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*. Wiley-Blackwell, p. 164-177.
- Evans J. 1992. *Plantation Forestry in the Tropics: Tree Planting for Industrial, Social, Environmental, and Agroforestry Purposes*. Clarendon Press, 422 p.
- Ferrandino F.J. 2008. Effect of Crop Growth and Canopy Filtration on the Dynamics of Plant Disease Epidemics Spread by Aerially Dispersed Spores. *Phytopathology*. 98(5), p. 492-503.
- Fox J., Weisberg S., Friendly M., et Hong J. 2018. *Effect Displays for Linear, Generalized Linear, and Other Models*.
- Frazer G.W., Kenneth D., Lertzman P., Charles D., Canham D., Sallaway D.P., et Marinakis D. 1999. *Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation*. Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York.
- Gaudart J., Giorgi R., Thalabard J., Thiam D., et Whegang S. 2010. *Modèles linéaires à effets mixtes*.

- Geromel C., Ferreira L.P., Davrieux F., Guyot B., Ribeyre F., Brígida dos Santos Scholz M., Protasio Pereira L.F., Vaast P., Pot D., Leroy T., Filho A.A., Esteves Vieira L.G., Mazzafera P., et Marraccini P. 2008. Effects of shade on the development and sugar metabolism of coffee (*Coffea arabica* L.) fruits. *Plant Physiology and Biochemistry*. 46(5), p. 569-579.
- Green R.E., Cornell S.J., Scharlemann J.P.W., et Balmford A. 2005. Farming and the Fate of Wild Nature. *Science*. 307(5709), p. 550-555.
- Häger A., Fernández Otárola M., Stuhlmacher M.F., Acuña Castillo R., et Contreras Arias A. 2015. Effects of management and landscape composition on the diversity and structure of tree species assemblages in coffee agroforests. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 199, p. 43-51.
- Hergoualc'h K., Skiba U., Harmand J.-M., et Hénault C. 2008. Fluxes of greenhouse gases from Andosols under coffee in monoculture or shaded by *Inga densiflora* in Costa Rica. *Biogeochemistry*. 89(3), p. 329.
- Hirst J.M. et Stedman O.J. 1963. Dry Liberation of Fungus Spores by Raindrops. *Microbiology*. 33(2), p. 335-344.
- Hoyle R.H. 2012. *Handbook of Structural Equation Modeling*. Guilford Press, 754 p.
- Jena P.R., Stellmacher T., et Grote U. 2017. Can coffee certification schemes increase incomes of smallholder farmers? Evidence from Jinotega, Nicaragua. *Environment, Development and Sustainability*. 19(1), p. 45-66.
- Jha S., Bacon C.M., Philpott S.M., Rice R.A., Méndez V.E., et Läderach P. 2011. A Review of Ecosystem Services, Farmer Livelihoods, and Value Chains in Shade Coffee Agroecosystems. Dans : Campbell W.B., Ortiz S.L. (éd.). *Integrating Agriculture, Conservation and Ecotourism: Examples from the Field*. Springer Netherlands, p. 141-208.
- Leandro-Muñoz M.E., Tixier P., Germon A., Rakotobe V., Phillips-Mora W., Maximova S., et Avelino J. 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), p. e0184638.
- Lin B.B. 2007. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*. 144(1), p. 85-94.
- Lin B.B. 2010. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*. 150(4), p. 510-518.
- MacCarter P.S. et Greaves A. 1990. *Cordia alliodora: a promising tree for tropical agroforestry*. Oxford : Oxford Forestry Institute, Department of Plant Sciences, Univ. of Oxford, 37 p. (Tropical forestry papers, 22)
- Meredith D.S. 1973. Significance of Spore Release and Dispersal Mechanisms in Plant Disease Epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*. 11(1), p. 313-342.
- Metereau R. et Figuière C. 2014. Système coopératif localisé, stratégies collectives paysannes et agroécologie au Nicaragua: prétexte pour une Économie politique de l'Écologie industrielle. , p. 10.
- Morand E. 2011. Une introduction à l'Analyse Factorielle Multiple (AFM). , p. 55.
- Muller R., Berry D., Avelino J., et Bieysse D. 2008. Coffee Diseases. Dans : *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*. Wiley-Blackwell, p. 491-545.

- Muschler R.G. 2001. Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica. *Agroforestry Systems*. 51(2), p. 131-139.
- Nagler P.L., Daughtry C.S.T., et Goward S.N. 2000. Plant Litter and Soil Reflectance. *Remote Sensing of Environment*. 71(2), p. 207-215.
- Nair P.K.R. 1993. *An Introduction to Agroforestry*. Springer Science & Business Media, 524 p.
- Nelson S.C. 2008. Cercospora Leaf Spot and Berry Blotch of Coffee. , p. 6.
- Ngo Bieng Marie Ange, Alem Laudine, Curtet Chloé, et Tixier Philippe. 2017. Tree spacing impacts the individual incidence of *Moniliophthora roreri* disease in cacao agroforests. *Pest Management Science*. 73(11), p. 2386-2392.
- Orwa C., Mutua A., Kindt R., Jamnadass R., et Anthony S. 2009. *Coffea_arabica*.
- Pagès J. 2013. *Analyse factorielle multiple avec R*. EDP Sciences, 269 p.
- Perfecto I., Rice R.A., Greenberg R., et van der Voort M.E. 1996. Shade Coffee: A Disappearing Refuge for Biodiversity. *BioScience*. 46(8), p. 598-608.
- Pineda A.G. 2006. *Flora Util Ethnonotánica de Nicaragua*. Gobierno de Nicaragua, Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales
- Ponge J.-F., Chevalier R., et Lousot P. 2002. Humus Index. *Soil Science Society of America Journal*. 66(6), p. 1996-2001.
- Puech C., Poggi S., Baudry J., et Aviron S. 2015. Do farming practices affect natural enemies at the landscape scale? *Landscape Ecology*. 30(1), p. 125-140.
- Rapidel B. 2011. *Ecosystem Services from Agriculture and Agroforestry: Measurement and Payment*. Routledge, 450 p.
- Ratnadass A., Fernandes P., Avelino J., et Habib R. 2012. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 32(1), p. 273-303.
- Rigueiro-Rodríguez A., Fernández-Núñez E., González-Hernández P., McAdam J.H., et Mosquera-Losada M.R. 2009. Agroforestry Systems in Europe: Productive, Ecological and Social Perspectives. Dans : *Agroforestry in Europe*. Springer, Dordrecht, p. 43-65.
- Román F., De Liones R., Sautu A., Deago J., Hall J.S., Environmental Leadership & Training Initiative, Proyecto de Reforestación con Especies Nativas, Smithsonian Tropical Research Institute, Yale University, et School of Forestry and Environmental Studies. 2012. *Guía para la propagación de 120 especies de árboles nativos de Panamá y el neotrópico*. New Haven, CT : Environmental Leadership and Training Initiative--ELTI, Yale School of Forestry & Environmental Studies
- Sanchez G. 2013. *PLS_Path_Modeling_with_R.pdf*. Trowchez Editions.
- Sanchez G., Trinchera L., et Russolillo G. 2013. Introduction to the R package plsmp. , p. 10.
- Sarkar. 2017. *Package 'lattice'*.
- Sequeira L. 1958. The host range of *Mycena citricolor* (Berk C Curt) Sacc. *Turrialba*. 8, p. 136-147.

- Siles P., Harmand J.-M., et Vaast P. 2010. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforestry Systems*. 78(3), p. 269-286.
- Staver C., Guharay F., Monterroso D., et Muschler R.G. 2001. Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: shade-grown coffee in Central America. *Agroforestry Systems*. 53(2), p. 151-170.
- Tenenhaus M., Vinzi V.E., Chatelin Y.-M., et Lauro C. 2005. PLS path modeling. *Computational Statistics & Data Analysis*. 48(1), p. 159-205.
- Toledo V.M. et Moguel P. 2012. Coffee and Sustainability: The Multiple Values of Traditional Shaded Coffee. *Journal of Sustainable Agriculture*. 36(3), p. 353-377.
- Tscharntke T., Clough Y., Wanger T.C., Jackson L., Motzke I., Perfecto I., Vandermeer J., et Whitbread A. 2012. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation*. 151(1), p. 53-59.
- Vaast P., Bertrand B., Perriot J.-J., Guyot B., et 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), p. 197-204.
- Valio I.F.M. 1976. Germination of Coffee Seeds (*Coffea arabica* L. cv. Mundo Novo). *Journal of Experimental Botany*. 27(5), p. 983-991.
- Vandermeer J. et Perfecto I. 1995. Breakfast of biodiversity: the truth about rain forest destruction. *Breakfast of biodiversity: the truth about rain forest destruction*.
- Vinzi V.E. et Trinchera L. 2013. Modèles à équations structurelles, approches basées sur les composantes. Dans : *Modèles à variables latentes et modèles de mélange*, p. 27.
- Wairegi L., van Asten P., Giller K., et Fairhurst T. 2014. *Guide du système de culture banane-café*. Nairobi :
- Waller J.M., Bigger M., et Hillocks R.J. 2007. *Coffee Pests, Diseases and Their Management*. CABI, 450 p.
- Waller J.M., Bridge P.D., Black R., et Hakiza G. 1993. Characterization of the coffee berry disease pathogen, *Colletotrichum kahawae* sp. nov. *Mycological Research*. 97(8), p. 989-994.
- Wintgens J. N. 2008. The Coffee Plant. Dans : *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*. Wiley-Blackwell, p. 1-24.
- Zuur A., Ieno E.N., Walker N., Saveliev A.A., et Smith G.M. 2009. *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. New York : Springer-Verlag(Statistics for Biology and Health).

7. LISTE DES ABREVIATIONS

AO : Arbres d'ombrage

GLMM : Modèle mixte généralisé

LMM : Modèle linéaire mixte

MF : maladies foliaires

OG : Ojo de Gallo

PLS-PM : Partial Least Square Path Modeling

SAF : Systèmes agroforestiers

SAF caféiers : Systèmes agroforestiers à base de caféiers

SEM : Structural Equation Modeling (anglais) ou Modèle d'Equation Structurel (français)

8. TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1. Description des modèles mixtes, avec les variables réponses et leurs variables explicatives.	21
Tableau 2. Constructions des différentes variables latentes à partir des variables manifestes mesurées.	26
Tableau 3. Effets (coefficients de régression) des fincas et des situations sur la sévérité et l'incidence de l'OG, et du complexe de maladies foliaires.	33
Tableau 4. Résultats des modèles mixtes : représentation des coefficients de régression, et leur significativité; entre les facteurs de la croissance et les variables 'fincas' et 'situations' (situation 1 : Laurel, 2 : Guaba roja, 3 : Guineo, 4 : autres).	34
Tableau 5. Résultats des modèles mixtes : représentation des coefficients de régression, et leur significativité; entre les facteurs de la récolte et les variables 'fincas' et 'situations' (situation 1 : Laurel, 2 : Guaba roja, 3 : Guineo, 4 : autres).	34
Tableau 6. Résultat du PLS-PM, présentant les R^2 qui expriment la part de variance expliquée d'une variable latente par les autres variables latentes.	38

9. TABLE DES FIGURES

Figure 1. Photo d'un système agroforestier à base de caféiers, au Nicaragua. Photo : C. Allinne.....	8
Figure 2. Représentation des services écologiques rendus par les arbres d'ombrage, dans la régulation des bioagresseurs. Traduit de Ratnadass <i>et al.</i> (2012).	9
Figure 3. Cartes du Nicaragua et de la région de Matagalpa, comprenant la localisation des trois fincas étudiées, dans la commune d'El Tuma La Dalia.	11
Figure 4. Photo du système caféier - arbres d'ombrage dans la finca 1. Photo : Clémentine Allinne.	12
Figure 5. Répartition schématisée des situations et répliques dans chaque ferme d'El Tuma-la-Dalia, Nicaragua.....	13
Figure 6. Schéma récapitulatif de la mise en place des unités autour de l'arbre central (point rouge), comprenant les 10 caféiers (croix) dont les 4 caféiers sélectionnés (croix rouges), et les arbres d'ombrage (points gris ou verts) avec leur influence sur le sol et le microclimat (cercles gris ou verts).....	14
Figure 7. Photos hémisphériques prise dans la finca 3 & 2. Photo : C. Allinne.....	15
Figure 8. Dessin botanique de <i>Coffea arabica</i> : rameau, fruits, pièces florales (Köhler, 1887).....	16
Figure 9. Positionnement des 3 branches marquées sur les caféiers. Schéma Clémentine Allinne. ..	17
Figure 10. Photos des dégâts causés par les maladies fongiques foliaires sur <i>C. arabica</i> . A) <i>Mycena citricolor</i> ; b) <i>Cercospora coffeicola</i> ; c) <i>Corticium kolegora</i> ; d) <i>Colletotrichum sp.</i> (SINAVEF_LAB)	18
Figure 11. Présentation d'un rameau type de caféiers atteint par des maladies foliaires.	18
Figure 12. Schéma global des interactions entre les caféiers, les maladies foliaires, les arbres d'ombrage et le sol.	20
Figure 13. Graphes d'optimisation des valeurs de α possible, en fonction du maximum de vraisemblance, l'optimum atteint est représenté par la flèche noire. Pour les Guaba à gauche et les plantes de services à droite.	23
Figure 14. Schématisation des effets des arbres d'ombrage, par rapport à leur hauteur et leur distance au caféier.	24
Figure 15. Représentation des sous-modèles interne et externe d'un modèle d'équations structurelles, et des différents types de sous-modèles structurels réflexifs et formatifs, d'après Vinzi et Trinchera (2013). Les variables manifestes sont représentés par les X, les variables latentes par les ξ . Les corrélations entre une VL et ses VM, dans un schéma réflexif sont nommées λ , et ω dans le schéma formatif. Les corrélations entre les VL sont représentées par les β	25
Figure 16. Relations construites entre les variables latentes du sous-modèle structurel.	26
Figure 17. Résultats des regroupements par l'analyse factorielle multiple avec les espèces principales.	30
Figure 18. Evolution de l'ouverture de la canopée, en fonction des fincas (haut) et des situations : situation 1 Laurel ; situation 2 Guaba roja ; situation 3 Guineo et situation 4 autres (bas).	31
Figure 19. Effets prédits par les modèles des différents groupes d'arbres sur le pourcentage d'ombrage. La ligne pleine représente la réponse moyenne et la zone bleutée représente l'erreur de la prédiction.	32
Figure 20. Incidence (ou dispersion) de l'OG (gauche) et du complexe de maladies foliaires (OG, anthracnose, cercosporiose, Otros ; droite), selon les 'fincas' en haut et les 'situations' en bas (situation 1 : Laurel, 2 : Guaba roja, 3 : Guineo, 4 : autres).	33
Figure 21. Tableau présentant les différentes valeurs des coefficients a, en fonction de la sévérité de l'OG, de la sévérité totale et de l'incidence de l'OG (Gauche). Le graphe de droite 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.....	35
Figure 22. Coefficient de régression des effets de chaque groupe d'arbres sur la sévérité ou l'incidence des MF, du modèle GLMM final.	36
Figure 23. Sous-modèle de mesures du PLS-PM, représentant le poids des corrélations entre les variables latentes et leurs variables manifestes associés. La VM 'Caféier' est expliquée par la circonférence et l'âge des caféiers ; la VM 'Ombrage' est expliquée par le pourcentage d'ombrage en Novembre, Février, Juin et Septembre, et par la présence et l'abondance des groupes d'AO 'Fruit' et 'Services' ; le 'Sol' est expliqué par le taux de phosphore et la capacité d'échange cationique ; la VM 'Maladies' contient les mesures de sévérité et d'incidence de l'OG et du complexe de maladies ; la 'Croissance' est expliquée par le nombre de feuilles, de nœuds et de	

nœuds nouveaux ; la 'Production' est expliquée par le nombre de rameaux et de nœuds fructifères, et le nombre de rameaux morts. 37

Figure 24. Représentation du sous-modèle structurel du PLS-PM, comprenant l'intensité et le sens des effets entre chaque variable latente. 39

Figure 25. Schéma des résultats issus du sous-modèle structurel, présentant les liens directs entre les variables latentes, les relations positives étant représentées en bleu, et les relations négatives en rouge. La taille des flèches indiquent l'importance de la corrélation. 44

Figure 26. Présentation de la répartition de la végétation et l'utilisation des terres au Nicaragua. . 62

Figure 1. Graphes montrant l'évolution de la production de café et du nombre d'hectare qui y est dédié au Nicaragua, de 1994 à 2016. 69

10. ANNEXES

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : LE NICARAGUA	62
ANNEXE 2 : DESCRIPTIF DES FERMES ETUDIEES	63
ANNEXE 3 : DESCRIPTIF DES ARBRES D'OMBRAGE	64
ANNEXE 4 : DESCRIPTION DES CAFEIERS	67
ANNEXE 5 : LES MALADIES FOLIAIRES DES CAFEIERS	70
ANNEXE 6 : RESULTATS DE L'ANALYSE FACTORIELLE MULTIPLE	71
ANNEXE 7 : RESULTATS DES MODELES MIXTES	72
ANNEXE 8 : LA CROISSANCE DES CAFEIERS	73
ANNEXE 9 : LA PRODUCTION DES CAFEIERS	74
ANNEXE 10 : LA PRODUCTION EN FONCTION DE L'OUVERTURE DE LA CANOPEE .	75

ANNEXE 1 : LE NICARAGUA

Le Nicaragua est un pays d'Amérique Centrale, encadré au Nord par le Honduras, au Sud par le Costa Rica, à l'Ouest par l'Océan Pacifique et à l'Est par la mer des Caraïbes. Une chaîne montagneuse s'étend du Nord-Ouest au Sud-Est du pays, séparant le Nicaragua en trois zones géographiques : les plaines de la côte Caraïbennes, la région centrale montagneuse et les plaines de la côte Pacifique qui abrite les nombreux volcans du pays - dont un grand nombre est encore en activité - et les deux grands lacs : le lac de Managua et le lac Nicaragua. Du à cette topographie, les climats de ces trois régions sont différents, les plaines de l'Est sont considérée comme une zone tropicale humide, alors qu'à l'Ouest c'est une zone néo tropicale avec une saison sèche marquée de Janvier à Mai. Les plaines de l'Est qui reçoivent de fortes précipitations, sont recouvertes de forêts tropicales humides et sont très peu peuplé. La région montagneuse centrale est la plus froide, on y retrouve des forêts semi-décidues, des plantations pérennes mais aussi des pâturages et autres cultures. Les plaines de l'Ouest sont les plus peuplés et outre les grandes villes on y trouve des plaines agricoles et des forêts semi-décidues plus ou moins ouvertes.

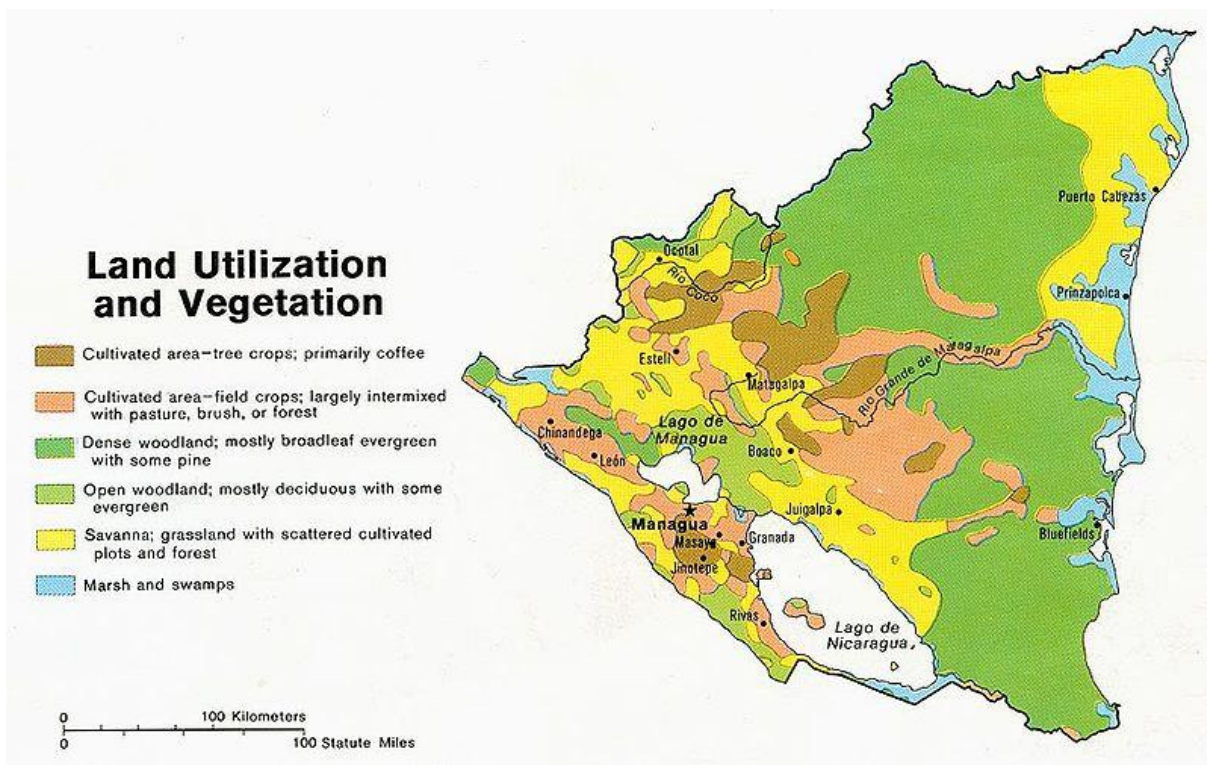


Figure 26. Présentation de la répartition de la végétation et l'utilisation des terres au Nicaragua.

ANNEXE 2 : DESCRIPTIF DES FERMES ETUDIEES

		<u>Finca 1</u>	<u>Finca 2</u>	<u>Finca 3</u>
<u>Commune</u>		Yale 3	Hilipo 2	Aguas Amarillas
<u>Nom du producteur</u>		Marvin Rivera	Mariano	Adolfo Cajina
<u>Coordonnées GPS</u>		13.08756, -85.61427	13.03735; -85.71483	13.02677,- 85.67999
<u>Altitude (m)</u>		750 - 800	850	650 - 700
<u>Superficie (ha)</u>		3,5	1,75	1,75
<u>Pente</u>		Faible	Faible	Faible
<u>Caféiers</u>	<i>Âge (année)</i>	8-9 ou 15	5-6	5-6
	<i>Hauteur</i>	2 à 3 m	2 à 3 m	2 à 3 m
	<i>Variété(s)</i>	Catimor	Catimor	Catimor
	<i>Densité (m entre caféiers / m entre rang)</i>	1.3 m / 1.5 m	1 m / 1.6 à 2 m	1 m / 1.7 m
	<i>Recépage</i>	Partiel	Partiel	Partiel
<u>Arbres d'ombrage</u>	<i>Hauteur</i>	Accessibles à élevés	Accessibles à élevés	Accessibles à élevés
	<i>Chevauchement canopée</i>	Oui	Oui	Oui
	<i>Diversité</i>	Élevée	Très élevée	Élevée
	<i>Espèces les plus présentes</i>	Laurel; Areno; Guaba negra; Chaperón; Guineo; Guaba roja; Ojoche Blanco; Cedro; ...	Nogal; Laurel; Helequeme; Limon; Guineo; Guaba negra; Guaba roja; Pejibaye; ...	Guaba roja; Laurel; Cacahuillo; Majague; Guineo; ...
<u>Herbicides</u>		Glifosato	/	Pantek (1x) + Gramoxon (1x)
<u>Fongicides</u>		Caldo bordoles + Sulfocal	/	Carbendazime (2x)
<u>Insecticides</u>		<i>Beauvaria bassiana</i>	/	Foliares de azúcar + Cipermetrin (1x)
<u>Fertilisants</u>		Ferticafé (0,5 onz/pl)	Biofertilisants maison (4 x - sol et feuilles)	Ferti 18-5-18 (2 x 2 onz/pl)

ANNEXE 3 : DESCRIPTIF DES ARBRES D'OMBRE

Nom	Ab	Espec	Famille	FixN	SB	TailleF	H_OG	H_CK	H_A	Wood	Timber	Fruit	Shade	Native	Wild
Achiote	3	Bixa_orellana	Bixacea	0	101.5	L	0	0	0	0	0	1	1	1	0
Aguacate	2	Persea_americana	Lauracea	0	500.9	L	1	0	1	0	0	1	1	1	0
Aguacate_canelo	9	Nectandra_reticulata	Lauracea	0	350.4	M	0	0	0	0	1	0	1	1	0
Areno	8	Homalium_racemosum	Salicaceae	0	5508.1	M	0	0	0	0	1	0	0	1	0
Areno_de_agua	5	Vochysia_guatemalensis	Vochysiaceae	0	304.3	M	0	0	0	0	1	0	0	1	0
Arrayan	5	Myrcianthes_fragrans	Myrtaceae	0	257.8	M	0	0	0	1	0	0	0	1	0
Balona	2	Vitex_gaumeri	Verbenaceae	0	122.3	M	0	0	0	0	1	0	0	1	1
Bucaro	2	Erythrina_poepigiana	Fabaceae	1	886.9	S	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Cacahuillo	19	Cupania_latifolia	Sapindaceae	0	1865.2	M	0	0	0	1	0	0	0	1	0
Cacao	2	Theobroma_cacao	Malvaceae	0	31.6	L	1	0	1	0	0	1	0	0	0
Canillo	1	Miconia_trinervis	Melastomataceae	0	114.9	L	1	0	0	1	0	0	0	1	0
Cedro_real	9	Cedrela_odorata	Meliaceae	0	233.3	S	0	0	0	0	1	0	1	1	0
Ceiba	1	Ceiba_pentandra	Malvaceae	0	3957.3	M	0	0	0	0	1	0	1	1	0
Chaperno_negro	6	Lonchocarpus_minimiflorus	Fabaceae	1	1319.5	S	0	0	0	1	0	0	1	1	0
Chilamate	11	Ficus_trigonata	Moraceae	0	1068.4	M	1	0	0	0	1	0	0	0	0
Cola_de_mono	8	Inga_edulis	Fabaceae	1	295.1	M	0	0	0	1	0	1	1	0	0
Coyote	18	Platymiscium_dimorphandrum	Fabaceae	1	82	S	0	0	0	0	1	0	0	1	1
Gavilan	3	Albizia_adinocephala	Fabaceae	1	408.1	S	0	0	0	0	1	0	1	1	0
Granadillo	1	Dalbergia_cubilquitzensis	Fabaceae	1	198.9	S	0	0	0	0	1	0	0	1	1
Guaba_ceniza	4	Inga_samanensis	Fabaceae	1	799.8	S	1	0	0	1	0	0	1	1	0
Guaba_negra	25	Inga_punctata	Fabaceae	1	273.8	M	1	0	0	1	0	0	1	1	0
Guaba_quadrada	2	Inga_sapindoides	Fabaceae	1	201.7	S	1	0	0	1	0	0	1	1	0
Guaba_roja	210	Inga_oerstediana	Fabaceae	1	388.9	S	1	0	0	1	0	0	1	1	0
Guacamaya	1	Astronium_graveolens	Anacardiaceae	0	13.4	S	0	0	0	0	1	0	0	1	0

Guacimo_colorado	2	Luehea_seemanni	Tiliaceae	0	1620.2	L	0	0	0	1	0	0	0	1	1
Guacimo_ternero	2	Guazuma_ulmifolia	Sterculiac eae	0	905.8	S	0	0	0	1	0	0	0	1	0
Guarumo	1	Cecropia_peltata	Cecropiac eae	0	175.8	L	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Guayabo	1	Terminalia_amazonia	Combret aceae	0	223.5	M	0	0	0	0	1	0	1	1	1
Guineo	131	Musa_sp	Musaceae	0	200	G	0	1	1	0	0	1	1	0	0
Helequeme	10	Erythrina_fusca	Fabaceae	1	12838.9	S	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Jobo	2	Spondias_mombin	Anacardi aceae	0	6409.6	M	0	0	0	1	0	1	1	1	0
Laurel	138	Cordia_alliodora	Boraginac eae	0	672.4	M	0	0	0	0	1	0	1	1	0
Leche_de_sapo	1	Mabea_occidentalis	Euphorbi aceae	0	1493.6	M	0	0	0	0	1	0	0	1	1
Lechoso	2	Sapium_macrocarpum	Euphorbi aceae	0	485.4	S	0	0	0	0	1	0	0	1	1
Limon_dulce	8	Citrus_limetta	Rutaceae	0	262.9	S	1	1	1	0	0	1	0	0	0
Limon_real	1	Citrus_limon	Rutaceae	0	331.2	S	1	1	1	0	0	1	0	0	0
Limoncillo	2	Trichilia_havanensis	Meliaceae	0	168.7	M	0	0	0	1	0	0	0	1	1
Llamarada_del_bosque	1	Spathodea_campanulata	Bignonia ceae	0	1184.4	M	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Macueli	1	Tabebuia_rosea	Bignonia ceae	0	748.7	M	0	0	0	0	1	0	1	1	0
Majague	7	Heliocarpus_appendiculatus	Malvaceae	0	3198.6	M	0	0	0	0	1	0	1	1	0
Mamon	1	Melicoccus_bijugatus	Sapindac eae	0	1515.5	M	0	0	0	0	0	1	1	1	0
Mampaz	6	Lippia_myriocephala	Verbenac eae	0	410.8	S	0	0	0	1	0	0	0	1	1
Mango	5	Mangifera_indica	Anacardi aceae	0	1154	L	0	0	1	0	0	1	1	0	0
Manzana_de_agua	1	Syzygium_jambos	Myrtaceae	0	108.9	L	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Matapalo	1	Ficus_cotinifolia	Moraceae	0	9.6	M	0	0	0	1	0	0	0	1	0

Muneco	1	<i>Cordia_collococca</i>	Boraginaceae	0	1263.4	M	0	0	0	1	1	0	1	1	0
Naranja	27	<i>Citrus_sinensis</i>	Rutaceae	0	276.5	S	1	1	1	0	0	1	0	0	0
Nogal	19	<i>Juglans_olanchana</i>	Juglandaceae	0	1299.1	S	0	0	0	0	1	0	1	1	0
Ojoche_rojo	12	<i>Pseudolmedia_spuria</i>	Moraceae	0	333.4	M	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Pejibaye	11	<i>Bactris_gasipaes</i>	Arecaceae	0	216.3	L	0	0	0	0	0	1	1	1	0
Pronto_alivio	6	<i>Guarea_grandifolia</i>	Meliaceae	0	1086.5	M	0	0	0	0	1	0	1	1	1
Roble	8	<i>Quercus_segoviensis</i>	Fagaceae	0	4942.1	M	0	0	0	1	1	0	1	1	1
Sapote	2	<i>Pouteria_sapota</i>	Sapotaceae	0	1428.9	L	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Tamarindo_de_montana	4	<i>Dialium_guianensis</i>	Fabaceae	1	7117.6	S	0	0	0	0	1	1	0	1	1
Vainillo	1	<i>Caesalpinia_nicaraguensis</i>	Fabaceae	1	1428.9	S	0	0	0	1	0	0	0	1	1

ANNEXE 4 : DESCRIPTION DES CAFÉIERS

Description botanique :

Coffea arabica L. 1753 est un petit arbre ou arbuste persistant, mesurant en moyenne 5 m quand il n'est pas élagué, et entre 2 et 3 m en plantation.

Les caféiers suivent un modèle architectural de Roux, c'est-à-dire que les axes primaires sont orthotropes et les axes secondaires sont plagiotropes, la croissance est rythmique. Les inflorescences se développent latéralement au niveau des nœuds sur les axes secondaires plagiotropes. Chaque nœud plagiotrope peut éventuellement produire un autre axe plagiotrope, mais généralement chaque nœud produit une paire de feuilles et une inflorescence (Charrier et Eskes A., 2008 ; Orwa *et al.*, 2009).

Les feuilles sont simples, glabres, coriaces, brillantes avec un pétiole court. Elles sont opposées alternes, de forme elliptiques, acuminées, ondulées à nervures marquées et bord lisse et possèdent parfois des stipules interpétiolaires (Fig. x).

Les bourgeons axillaires et sub-axillaires donnent généralement des inflorescences, composées de 2 à 9 boutons floraux, qui donnent autant de fleurs agencées en glomérules. Chaque nœud produit de 4 à 12 inflorescences, soit 16 à 48 fleurs. Les fleurs sont blanches, parfumées, de forme étoilées. Les sépales et les pétales sont fusionnés, formant une corolle tubulaire ou epicalice, et 5 lobes allongés donnent aux fleurs leur forme étoilée. Les 5 étamines sont insérées au niveau de la corolle tubulaire, et les anthères sont portées par de minces filaments. Les fleurs sont hermaphrodites et *C. arabica* ne possédant pas de système d'auto-incompatibilité l'autofécondation est le principal mode de reproduction : 90 à 95%, les grains de pollen très léger peuvent être transportés par le vent et l'anémophilie est le principal mode de pollinisation chez les autres espèces de *Coffea*, une partie de la pollinisation peut également être assurée par des insectes (principalement des abeilles) qui sont attirés par le parfum sucré et le nectar des fleurs (Charrier et Eskes A., 2008 ; Wintgens J., 2008).

L'ovaire est infère, et constitué de deux carpelles uniloculés, chacun contenant un seul ovule attaché à la base de la paroi carpellaire. L'ovaire porte un unique style qui se termine par un stigma bifide. Les fruits sont des drupes ou baies, également appelés « cerises », l'exocarpe est fin, le mésocarpe est charnu mais peu épais contrairement en l'endocarpe qui renferme les graines. Les jeunes baies qui contiennent généralement deux graines, sont vertes et deviennent jaunes puis rouges à maturité (Fig. x). Les graines font entre 8.5 et 12.5 mm de long, sont de forme ellipsoïde, les deux graines possèdent une surface plate qui se fait face, et sont entourées d'un fin épisperme ou tégument argenté qui recouvre l'endosperme corné. L'embryon est très petit 3 à 4 mm de long, composé de l'hypocotyle et des deux cotylédons cordiformes. Les graines sont commercialisées après que le tégument argenté ait été retiré et qu'elles aient été séchées. Quand les baies ne sont pas récoltées elles sont disséminées principalement par les oiseaux, et certains mammifères (Charrier et Eskes A., 2008 ; Wintgens J., 2008 ; Orwa *et al.*, 2009).

Germination & phénologie :

La germination des caféiers est rapide, les radicules émergent en premier après plus ou moins 25 jours quand les conditions de température et humidité sont optimales (température d'environ 20°C et plus de 50% d'humidité dans le sol), les graines sont donc non-dormantes (Valio, 1976). Les premières floraisons et fructifications sont observables à partir de 3 ans (après la germination), et le caféier peut être productif pendant environ 80 ans s'il est bien entretenu et que la parcelle est bien gérée ; même si généralement les plantations de caféiers ont une durée de vie d'une trentaine d'année (DaMatta *et al.*, 2007 ; Wintgens J., 2008).

La feuillaison des caféiers est étendue sur l'année entière, mais il y a une certaine périodicité dans l'apparition du nombre de nouveaux nœuds. Ce nombre est plus faible quand les facteurs climatiques sont les moins favorables : manque d'humidité dans le sol, manque de radiation (Wintgens J., 2008 ; Orwa *et al.*, 2009).

Dans les régions Néotropicales, les caféiers ont un cycle annuel unique de croissance végétative et de fructification, la croissance végétative est la plus efficiente pendant la saison des pluies alors que la floraison apparaît pendant la saison sèche. Cependant, le cycle phénologique complet du caféier est étalé sur deux cycles, en effet les baies sont portées par les nœuds du cycle précédent (Camargo et Camargo, 2001). De plus, les cycles de croissance végétative, et de floraison sont alternés, c'est-à-dire que lorsque la plante alloue ces ressources à sa croissance végétative, la floraison et donc la production de baies est amoindrie ; et inversement (Wintgens J., 2008)

Au Nicaragua, la floraison débute vers Mai - Juin, à la fin de la saison sèche avec les premières pluies, cette période de sécheresse est essentielle. En effet, une période de dormance est observée pour les boutons floraux, dormance qui ne prend fin qu'avec les premières pluies mettant un terme à la saison sèche - soit une réhydratation importante après un stress hydrique - ou par une chute brutale des températures. Ces périodes de floraisons sont très courtes, 2 à 3 jours seulement, car les anthères ont une durée de vie limitée à quelques jours pendant lesquels la reproduction est possible (Camargo et Camargo, 2001 ; Wintgens J., 2008 ; Orwa *et al.*, 2009).

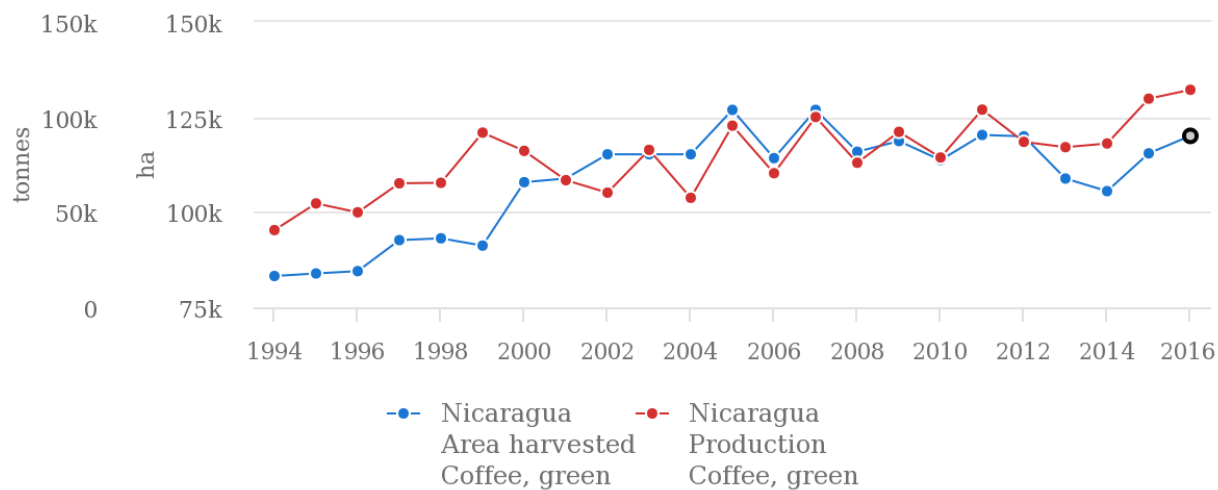
La phénologie reproductive des caféiers est caractérisée par l'asynchronie de la floraison et de la fructification. Cette asynchronie dans la fructification se répercute sur la maturation des fruits et donc sur la période de récolte, qui s'étale sur plusieurs semaines vers la fin de l'année pour la région de Matagalpa (Camargo et Camargo, 2001 ; Orwa *et al.*, 2009).

Les caféiers : importance économique

Le café est la boisson la plus consommée dans le monde, et il est après le pétrole la matière première la plus exportée, avec plus de 10 milliards \$US de transaction chaque année. Son commerce a une dimension particulière car la production de café est localisée dans les pays en développement, mais sa consommation est mondiale et les pays « industrialisés » consomment 70% de cette production. De ce fait, de nombreux pays en développement sont dépendants économiquement de l'exportation du café, et plus de 25 millions de familles sont présentes de la production à la transformation et reposent sur ce marché mondial (Bacon, 2005). Néanmoins près de 70 % des baies récoltées proviennent de productions locales et familiales de moins de 10 hectares, et appartiennent majoritairement (64%) à l'espèce : *Coffea arabica* L., Rubiaceae qui est la plus commercialisée de par l'ancienneté des productions du fait de ses arômes (DaMatta *et al.*, 2007).

Au Nicaragua, l'exportation de café principalement vers les Etats-Unis représente une grande partie de l'économie du pays et spécialement de la région de Matagalpa dont l'économie s'appuie essentiellement sur l'agriculture. Le Nicaragua a connu deux crises économiques successives d'importance, la première dans les années 2000 avec une baisse des prix des grains de café (Bacon, 2005) ; puis dans les années 2008-2013 avec une épidémie de rouille du café venant d'Amérique du Sud (*Hemileia vastatrix* ; Avelino *et al.*, 2015). *Ces deux crises du café ont fragilisé le marché et accéléré l'exode rural dans les régions agricoles comme Matagalpa.* Pourtant la production de café et la proportion de terres qui y sont allouées, sont globalement en augmentation depuis 1994, dû à la demande mondiale croissante (Fig x ; Bacon, 2005).

Pour enrayer l'importante pauvreté du pays et particulièrement des régions rurales, le gouvernement et certaines coopératives paysannes ont amené les producteurs de café à se tourner vers le commerce équitable, faisant du Nicaragua le pays ayant le taux le plus important de caféicultures en commerce équitable (plus de 20 % ; Metereau et Figuière, 2014 ; Jena *et al.*, 2017).



Source: FAOSTAT (Mar 29, 2018)

Figure 27. Graphes montrant l'évolution de la production de café et du nombre d'hectare qui y est dédié au Nicaragua, de 1994 à 2016.

ANNEXE 5 : LES MALADIES FOLIAIRES DES CAFÉIERS

L'Ojo de gallo ou *Mycena citricolor* est la maladie foliaire majoritaire dans les parcelles de caféiers de la région de La Dalia. *M. citricolor* est un champignon basidiomycète de la famille des *Mycenaceae*, il est reconnaissable aux taches jaunâtres qu'il forme sur les feuilles bordées d'un cercle généralement brun, plus rarement l'Ojo de Gallo s'attaque aux baies et aux jeunes rameaux (Sequeira, 1958). Son développement est favorisé par une humidité importante, et une forte densité de caféiers. L'Ojo de gallo est un champignon pouvant s'attaquer à plusieurs familles, et plus de 150 espèces domestiquées ou non (Sequeira, 1958 ; Waller *et al.*, 2007).

La Mancha de hierro (*Cercospora coffeicola*) est un champignon de la famille des *Mycosphaerellaceae*, qui s'attaque essentiellement au genre *Coffea* (Nelson, 2008). C'est une maladie opportuniste qui s'attaque principalement aux caféiers stressés par des conditions climatiques défavorables (température élevée, humidité supérieure à 98% pendant plus de 36h) ou par d'autres maladies (Nelson, 2008). Deux phases sont observables : la première ou des taches brunes circulaires sont observables sur la face supérieure des feuilles ; et la seconde ou la maladie forme des lésions brunes, creuses sur les baies entraînant généralement des pertes (Nelson, 2008).

Le Mal de hilacha (*Corticium koleroga*) fait partie de la famille des *Ceratobasidiaceae*, cause de nombreux dégâts dans les plantations de caféiers du fait de son impact sur la production, indirectement en provoquant la mort de rameaux (i.e. dieback ; Belachew, 2015). En effet, au début de l'infection, un mycélium blanc se développe sur les parties jeunes de la plantes (feuilles, tiges), recouvrant petit à petit la partie abaxiale des feuilles et prenant une teinte de plus en plus foncée (marron-noir) avec l'avancement de la dispersion, entraînant la mort des feuilles mais aussi des rameaux. Le développement de l'infection augmente avec l'humidité, un pourcentage d'ombrage (> 50 %) et une plantation dense en caféiers. Le Mal de hilacha est un pathogène généraliste pouvant s'attaquer à d'autres espèces domestiquées comme les *Citrus*, mais aussi forestière comme les *Inga* présentent dans les caféicultures (Bedimo *et al.*, 2012 ; Belachew, 2015).

Colletotrichum sp., champignon ascomycète de la famille des *Glomerellaceae*, est responsable de l'Anthracnose chez les caféiers ; plusieurs espèces de *Colletotrichum* affecteraient *C. arabica* mais sont difficilement identifiables (Waller *et al.*, 1993). L'Anthracnose est une maladie affectant principalement les baies, elle est identifiable par les lésions superficielles foncées, creuses et nécrotiques, qui entraînent une chute prématurée des fruits. Cette maladie peut également toucher les rameaux, les feuilles et les fleurs, et causer des dieback entraînant des pertes importantes au niveau de la production. L'Anthracnose est favorisée par des températures supérieures à 20°C, un pourcentage d'humidité élevée et de hautes altitudes. C'est également une espèce « opportuniste » qui s'installe après l'arrivée d'autres maladies (Waller *et al.*, 1993).

ANNEXE 6 : RESULTATS DE L'ANALYSE FACTORIELLE MULTIPLE

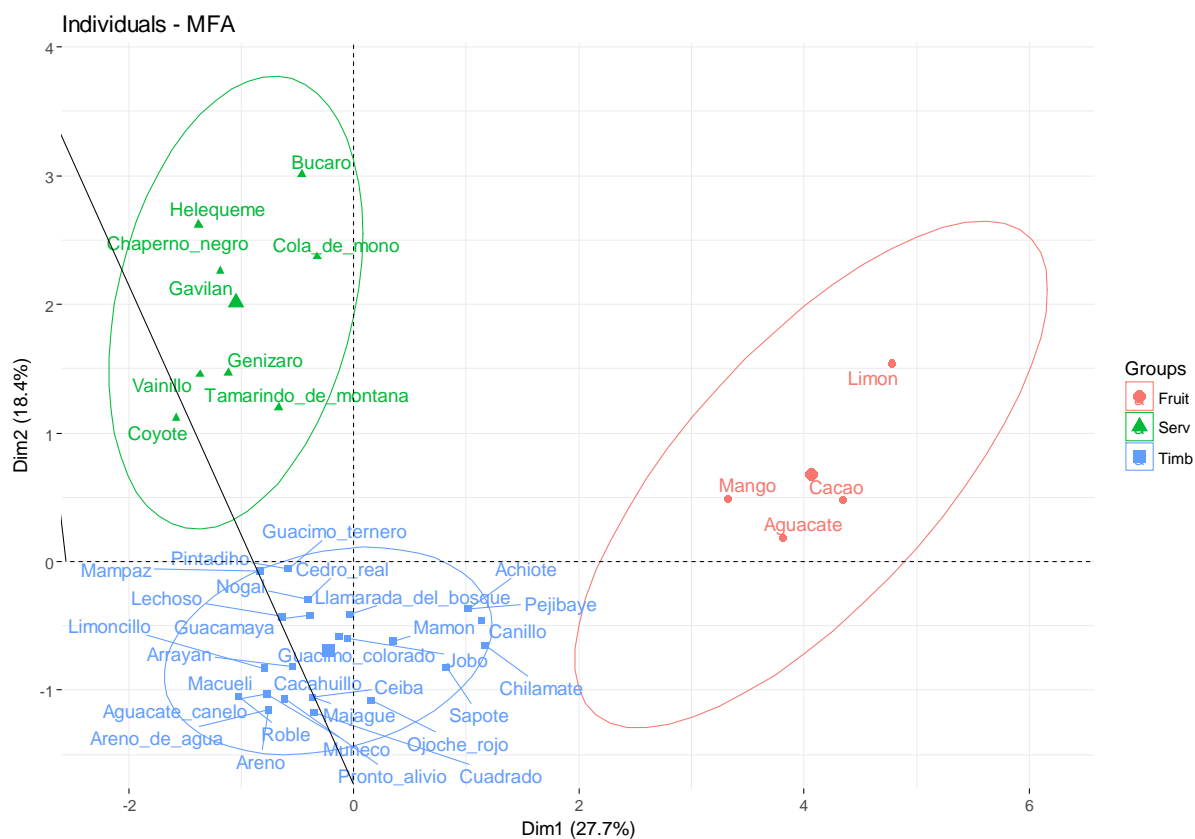


Figure 28. Résultats de l'AFM, sans les espèces principales. On remarque la distansion entre les Citrus et les autres arbres du groupe 'Fruit'.

ANNEXE 7 : RESULTATS DES MODELES MIXTES

	Ombrage	Sévérité OG	Incidence OG	Sévérité TOT	Incidence TOT
Sévérité OG	0.06728 ***				
Incidence OG	0.04106 ***				
Sévérité TOT	0.03123 ***				
Incidence TOT	0.05202 ***				
Nb feuilles	-0.0007981 ***	0.0004614 ***	0.0002478 ***	0.0004 ***	-0.0006487 ***
Surf feuilles	-0.03627 ***	-0.02380 ***	0.01031 *	0.02385 ***	-0.02409 ***
Nb nœuds nvx	-0.032663 ***	-0.005542 ***	0.003977 ***	NS	NS
Nb nœuds	NS	NS	NS	NS	-0.05731 ***
Nb ram fruct	0.009589 ***	NS	0.002848 ***	NS	-0.005981 ***
Nb nd fruct	0.003511 **	NS	0.002492 ***	0.001046 ***	-0.010724 ***
Nb ram mort	NS	0.006023 ***	-0.009696 ***	-0.005981 ***	NS

Figure 29. Tableau des résultats des modèles mixtes LM et GLMM.

ANNEXE 8 : LA CROISSANCE DES CAFEIERS

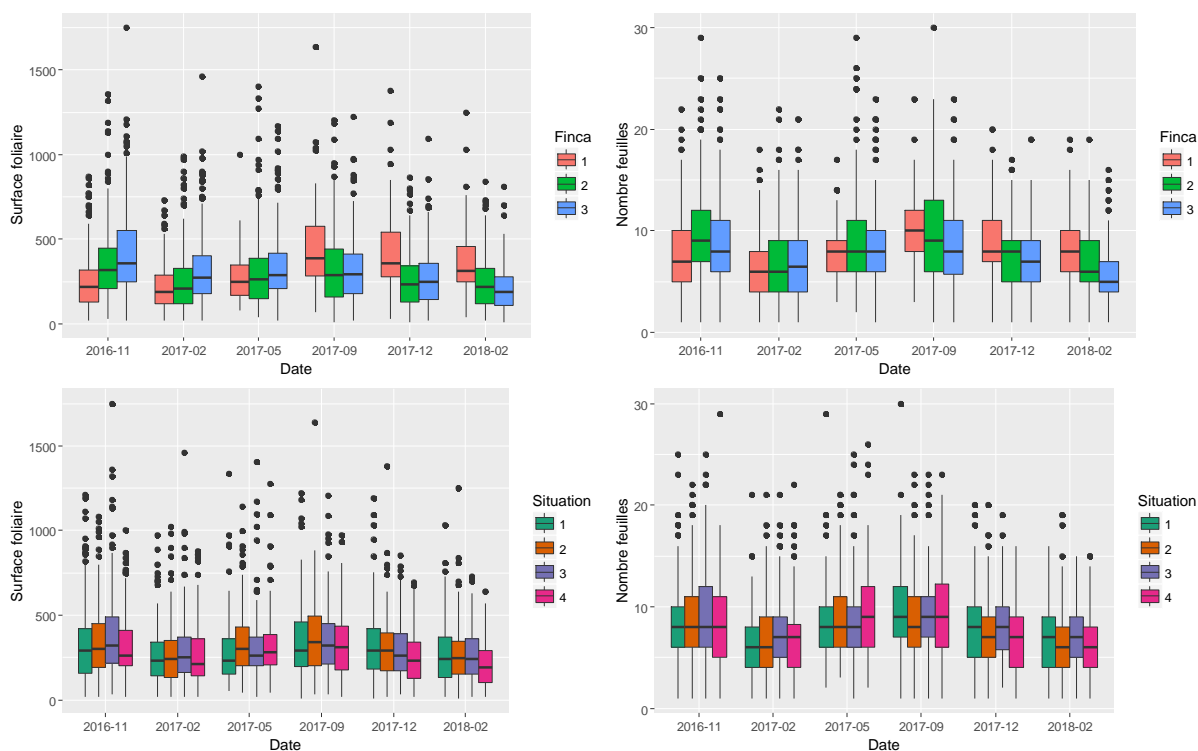


Figure 30. La croissance des caféiers représentée par la surface foliaire (gauche) et le nombre de feuilles (droite) ; en fonction des mois de mesures, et des fincas (haut) ou des situations (bas).

ANNEXE 9 : LA PRODUCTION DES CAFEIERS

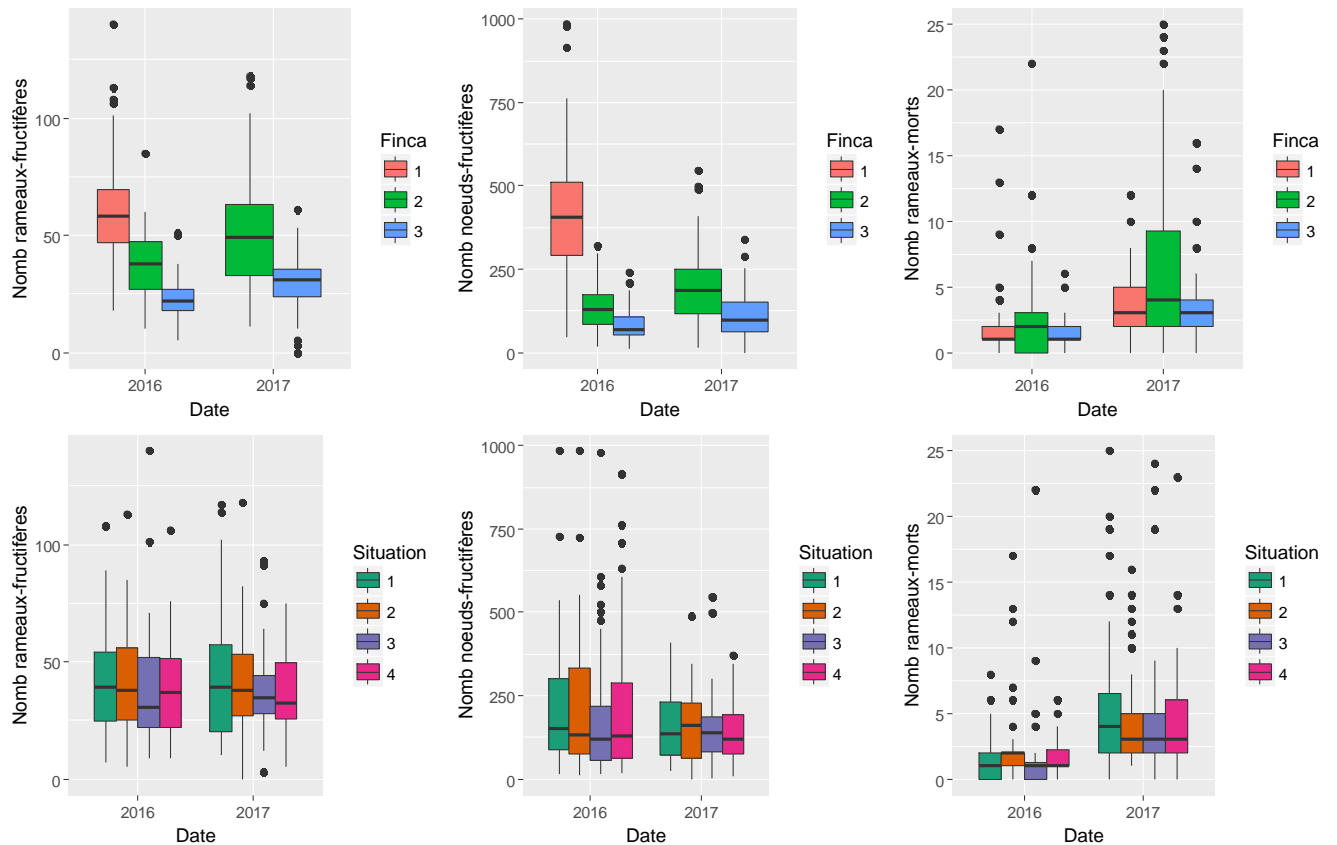


Figure 31. La production des caféiers, représentée par le nombre de rameaux fructifères (gauche), le nombre de nœuds fructifères (centre), et le nombre de rameaux morts (droite); en fonction mois et des fincas (haut) ou des situations (bas).

ANNEXE 10 : LA PRODUCTION EN FONCTION DE L'OUVERTURE DE LA CANOPEE

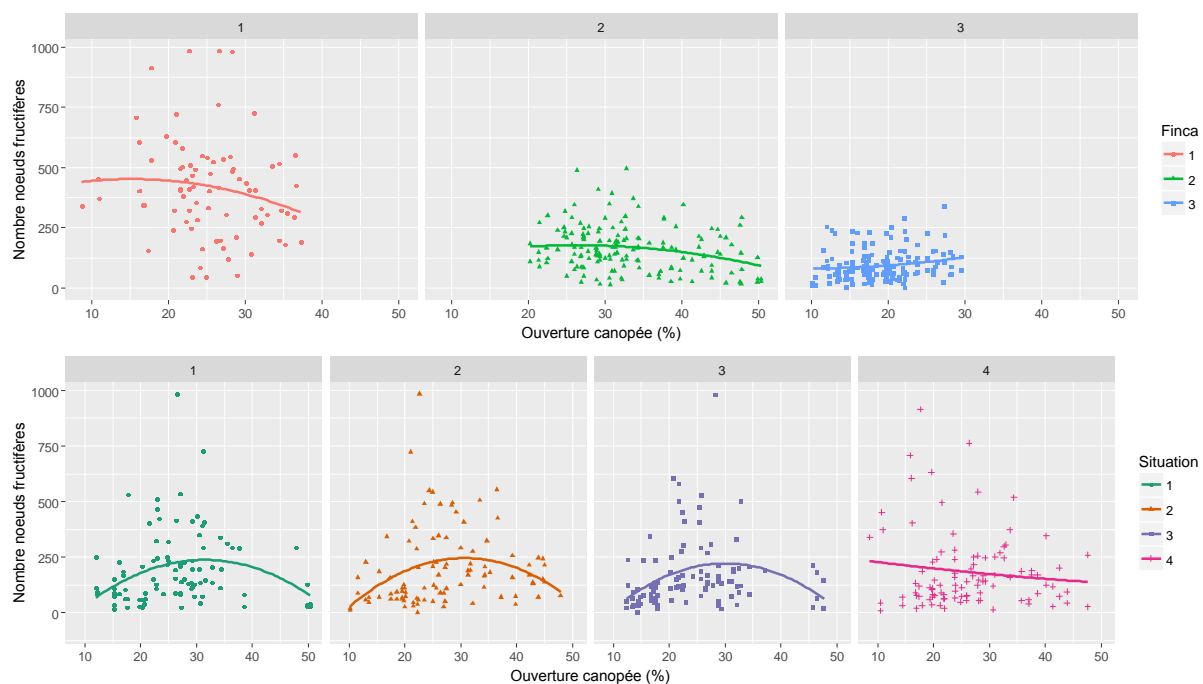


Figure 32. LA production des caféiers, ici représentée par le nombre de rameaux fructifères, en fonction des différents pourcentage d'ouverture de la canopée