

SIGLES ET ABREVIATIONS

CIRAD :	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CATIE :	Centre de recherche et d'enseignement agronomique tropical
GLMM :	Modèle Linéaire Mixte Généralisé
LMM :	Modèle Linéaire Mixte
SAF :	Système Agroforestier
SLA :	Specific Leaf Area (Aire foliaire spécifique)

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

SIGLES ET ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE 1

CONTEXTE DE L'ETUDE..... 3

I- Le CIRAD : un centre de recherche à portée internationale 3

II- Le changement climatique : une menace pour la caféiculture ? 4

1. Le café : une production de grande importance économique et sociale en Amérique Latine 4

2. La caféiculture malmenée par l'augmentation en fréquence et puissance des aléas climatiques 5

III-La rouille : une maladie qu'il faut apprendre à maîtriser..... 6

1. *Hemileia vastatrix* : responsable de la rouille du caféier 6

2. Le cycle de la rouille 8

3. Epidémiologie de la rouille orangée et les facteurs l'influençant 12

IV-L'ombrage : une solution de biocontrôle 14

1. La monoculture de café : un système productif mais non durable..... 14

2. Les arbres d'ombrage : un outil de lutte face au changement climatique 14

3. Non « un » sinon « des » agrosystèmes caféiers sous ombrage 15

V- Les premiers effets de l'ombrage mis à jour..... 16

1. Effets directs de la mise en place d'arbres d'ombrage..... 16

2. Modification du microclimat 16

3. Fournitures de services écosystémiques 16

4. Effets sur la rouille 17

HYPOTHESES ET ETAPES DE TRAVAIL..... 20

MATERIEL ET METHODES 22

I- Matériel et plan expérimental 22

1. Localisation et description physique et biologique de la zone étudiée 22

2. Choix du réseau de parcelles 22

3. Taille des parcelles de caféiers..... 24

4. Caractérisation du système d'ombrage..... 26

5. Caractérisation du microclimat 28

6. Suivi de la croissance de la rouille et du caféier 32

II- Variables analysées et méthodes d'analyse 35

1. Caractérisation de l'ombrage..... 35

2. Caractérisation du microclimat	35
3. Croissance de la rouille et du caféier	37
4. Charge fructifère des caféiers.....	41
RESULTATS	43
I- Caractérisation des systèmes d'ombrage.....	43
1. Caractérisation des feuilles d'ombrage	43
2. Caractérisation du microclimat	44
II- Progression de la rouille sous ombrage	50
1. Degré d'infection des caféiers selon le système d'ombrage.....	50
2. Degré de colonisation des caféiers selon le système d'ombrage	50
3. Etude de la dynamique foliaire (croissance et défoliation)	51
4. Charge fructifère.....	51
DISCUSSION	54
I- Originalité et limites de l'étude	54
1. Plus-value de l'étude	54
2. Domaine de validité de l'expérimentation	54
II- Analyse critique des résultats et conclusion pratiques	55
1. Modification de l'énergie cinétique des gouttes de pluie par les arbres d'ombrage	55
2. Etude des températures au sein de la parcelle selon le système d'ombrage	56
3. Impact de l'ombrage sur l'abondance de rouille.....	56
4. Conception d'un système agroforestier luttant contre le réchauffement climatique et luttant contre la rouille	58
III-Suite de l'étude	59
CONCLUSION	60
BIBLIOGRAPHIE	I
FIGURES.....	IX
TABLEAUX.....	IX

INTRODUCTION GENERALE

Le changement climatique en cours génère des augmentations de températures et une intensification des événements climatiques extrêmes. Ces modifications du climat affectent la production du café et favorisent le développement des pathogènes comme *Hemileia vastatrix*, le champignon responsable de la rouille orangée du café. Ces évolutions climatiques, bien qu'épisodiques actuellement, sont attendues plus nombreuses dans les années à venir, menaçant directement la production du café. En effet, une augmentation « définitive » de la température de 2-3°C écarterait le caféier de ses températures optimales de production et à l'inverse, rapprocherait *H. vastatrix* de ses températures optimales de développement. De fait, si les systèmes de production actuels du café n'évoluent pas, la culture de ces cerises – pourtant si prisées – sera mise en péril. L'enjeu est grand. Il est certes de haute importance économique puisque le café représente le deuxième produit mondialement exporté après le pétrole, mais il est surtout de grande importance sociale. Plus de vingt millions de producteurs et leurs familles vivent de la production du café.

La solution la plus soutenue par la communauté scientifique est l'implantation d'arbres d'ombrage dans les parcelles de caféiers. L'ombrage, visant à tamponner les températures extrêmes mais aussi à augmenter la résistance et la résilience des agrosystèmes, permettrait à la fois aux caféiers d'évoluer dans des conditions thermiques plus proches de leurs conditions optimales de production et de défavoriser la rouille orangée, cette maladie si difficile à maîtriser.

De ce constat est né le projet CASCADE qui vise à identifier des stratégies pour aider les petits producteurs d'Amérique Centrale à s'adapter au changement climatique. La présente étude, menée par le CIRAD, s'intègre dans ce projet et s'attache à identifier quelles sont les caractéristiques des différents systèmes d'ombrage qui permettent de lutter contre la rouille orangée du café. Dans un premier temps nous détaillerons le contexte dans lequel s'inscrit la présente étude, le fonctionnement de la rouille ainsi que l'intérêt d'employer l'ombrage pour limiter le développement de la maladie. Puis nous aborderons la méthodologie retenue pour évaluer les systèmes d'ombrage avant d'en révéler les résultats puis de les discuter.

CONTEXTE DE L'ETUDE

I- Le CIRAD¹ : un centre de recherche à portée internationale

Issu en 1984 de l'union des neuf instituts français spécialisés en recherche agricole tropicale, le CIRAD a vocation à répondre, avec les pays du Sud, aux enjeux internationaux de l'agriculture et du développement (CIRAD, 2010). Dédié à la recherche finalisée, l'organisme public travaille prioritairement sur les six thématiques suivantes : (1) l'agriculture écologiquement intensive, (2) la valorisation de la biomasse, (3) l'alimentation durable via la sécurité alimentaire, (4) la santé des animaux et des plantes, (5) l'action publique pour le développement et (6) l'accompagnement des sociétés dans la gestion durable des territoires (CIRAD, 2014a) (Figure I).

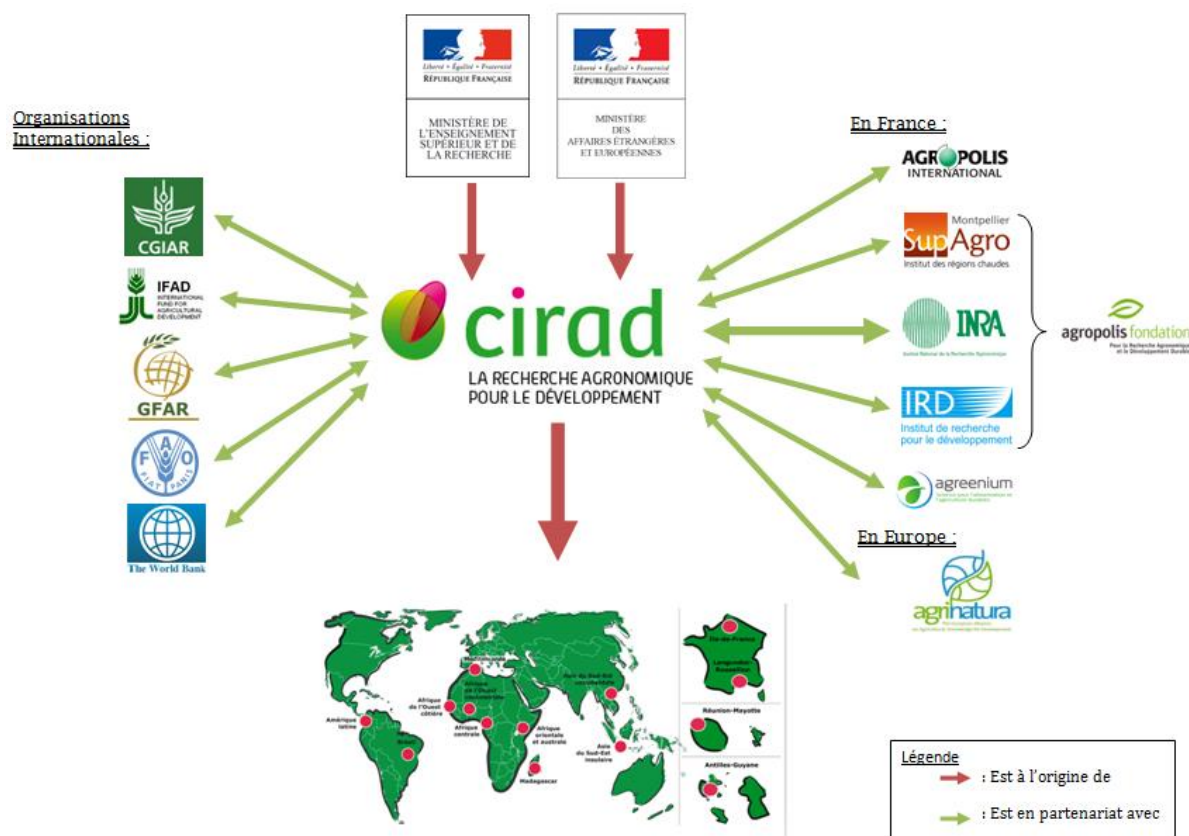


Figure I : Partenariats et lieux d'actions du CIRAD à travers le monde (CIRAD, 2014b, 2014d)

¹ CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

Le Costa Rica compte parmi les 100 pays partenaires du CIRAD et accueille au sein du centre de recherche et d'enseignement agronomique tropical² l'une de ses sections de recherche. Les quatorze chercheurs du CIRAD mettent en commun leurs compétences autour de l'étude des systèmes agroforestiers, sous différents angles, en particulier, la lutte intégrée contre les maladies et les ravageurs du caféier (Ambassade de France, 2014; CIRAD, 2014c).

II- Le changement climatique : une menace pour la caféiculture ?

1. LE CAFE : UNE PRODUCTION DE GRANDE IMPORTANCE ECONOMIQUE ET SOCIALE EN AMERIQUE LATINE

Le caféier est un petit arbre **ombrophile** de la famille des Rubiaceae (Coffee Research Institute, 2006; Mouen Bedimo, Dufour, Cilas, & Avelino, 2012). L'espèce la plus cultivée, à hauteur de 70 à 80% de la production mondiale, est le *Coffea arabica* (Coffee Research Institute, 2006). Elle est originaire des sous-bois des forêts tropicales d'**Ethiopie**, situées entre **1600 et 2800m d'altitude**. Dans cette région, la température moyenne annuelle est de **20°C** avec de faibles fluctuations, et les pluies varient de **1600 à plus de 2000 mm** en dehors de la saison sèche qui dure 3-4 mois (Sylvain, 1955). Les conditions optimales pour cultiver le caféier sous ombrage s'étendent de 18 à 21°C en température moyenne annuelle, de 1200 à 1800 mm de pluie annuelle (Alègre, 1959) et de 600 à 1600 m d'altitude (Toledo & Moguel, 2012). Le caféier a une production dite « biennal », après une année de forte production, la récolte suivante est généralement bien moindre.

Le *C. arabica* s'est exporté vers les pays d'Asie et d'Amérique Latine. Notamment sur le continent américain, sa culture s'est développée selon un système intensif de type « plein soleil ». La culture sans ombrage permettant d'accroître les rendements dans un premier temps bien que cela requière davantage d'intrants (Mouen Bedimo et al., 2012).

La culture du café revêt aujourd'hui de grands enjeux économiques et sociaux. Le café est la **première marchandise d'exportation légale au monde**, après le pétrole et ses dérivés. Ce commerce satisfait la consommation régulière de plus de deux milliards de personnes (Toledo & Moguel, 2012) et **fait vivre pas moins de vingt millions de producteurs et leurs familles** (Eccardi & Sandalj, 2002). Il est estimé que 70% de la production mondiale de café est réalisée par de petits producteurs implantés dans 85 pays d'Asie, d'Afrique, d'Amérique Latine, d'Amérique Centrale et d'Océanie (Toledo & Moguel, 2012). Beaucoup de ces producteurs sont d'origine indigène. Environ 820 cultures indigènes réparties dans 17 pays, vivent dans des régions productrices de café où la culture sous ombrage reste encore majoritaire (Toledo & Moguel, 2012).

² CATIE : Centre de recherche et d'enseignement agronomique tropical

L'instabilité de la culture du café peut donc non seulement mettre à mal une économie florissante, dans les pays producteurs et dans les pays consommateurs, mais aussi et surtout mettre en péril vingt millions de personnes.

2. LA CAFEICULTURE MALMENEE PAR L'AUGMENTATION EN FREQUENCE ET PUISSANCE DES ALEAS CLIMATIQUES

De par les changements démographiques, économiques, technologiques et sociaux, les activités humaines jouent un rôle majeur dans les **changements climatiques**. Ces derniers **affectent** les plantes dans leurs écosystèmes naturels et agricoles mais favorisent le développement des **pathogènes**. De fait, **il en résulte une augmentation des épidémies** (Sukumar Chakraborty, 2005; Coakley, Scherm, & Chakraborty, 1999; Grulke, 2011) mettant en danger la sécurité alimentaire (Anderson et al., 2004; S Chakraborty, Tiedemann, & Teng, 2000) et la fourniture de services écosystémiques (Bergot et al., 2004).

En 2012, l'Amérique Centrale fut frappée par l'épidémie de rouille la plus grave que la région ait connue jusqu'alors (Cressey, 2013). Survenue précocement, elle causa défoliation et mort de jeunes branches, assèchement du café avant la récolte et pertes de production l'année-même. Trois pays, dont le Costa Rica, se déclarèrent en état d'urgence (Jacques Avelino & Rivas, 2013).

Une **épidémie** résulte de l'interaction entre une population d'hôtes, de pathogènes, un environnement et des interventions du producteur. Dans le cas de la rouille, l'environnement est en relation avec les conditions climatiques et dans une moindre mesure avec le sol (Jacques Avelino, 1999; Lamouroux, Pellegrin, Nandris, & Kohler, 1995). Les caractéristiques des plantes, comme leur résistance, mais aussi les techniques culturales avec en particulier l'entretien des arbres d'ombrage, sont d'autres facteurs jouant sur le développement des épidémies (J. Avelino, Willocquet, & Savary, 2004; F. M. DaMatta, 2004).

Dans le cas présent, les producteurs d'Amérique Centrale étaient parvenus à vivre avec la rouille orangée, surtout par l'emploi de fongicides et par l'application de techniques permettant d'augmenter la productivité, compensant ainsi les coûts et les pertes générés par la rouille (Mccook, 2009) et dans une moindre mesure par l'utilisation de variétés résistantes. Mais cela ne fût plus suffisant en 2012 lorsque l'épidémie se déclencha. D'une part, le risque était présent dans ces agrosystèmes, du fait de leur faible biodiversité végétale et animale les rendant hautement vulnérables aux pathogènes, au regard des écosystèmes naturels. D'autre part, cette année-là les conditions climatiques étaient davantage favorables aux bioagresseurs. Les températures étaient plus élevées et les pluies plus précoces. Enfin, les producteurs ont pu montrer un excès de confiance et/ou manque de connaissances : négligence des parcelles de caféiers pour raison économique et modification d'emploi des intrants (Villarreyra, 2014).

Les conditions climatiques de 2012 – pluies abondantes et températures élevées - ont des similitudes avec celles attendues à l'avenir, du fait du changement climatique. De fait, les observations réalisées en 2012 peuvent refléter les événements à venir. **Il est alors attendu une réduction de la qualité du café ainsi que des problèmes de production** dus à la physiologie du café. D'autre part, ces observations mettent à jour la grande fragilité socioéconomique du secteur du café. La crise de la rouille orangée a mis en péril la survie

de centaine de milliers de familles, travailleurs agricoles et petits producteurs d'Amérique Centrale (Jacques Avelino & Rivas, 2013).

Les spécialistes s'accordent aujourd'hui à dire qu'il faut réintégrer de la biodiversité dans les agroécosystèmes, aussi bien à l'échelle de la parcelle que du paysage, afin de mieux réguler les bioagresseurs (Altieri, 1999; Andow, 1991; Bianchi, Booij, & Tscharntke, 2006; Cheatham et al., 2009; Malezieux et al., 2009; Ratnadass, Fernandes, Avelino, & Habib, 2012; Tilman, Cassman, Matson, Naylor, & Polasky, 2002). Cependant, cela doit être entrepris selon les caractéristiques des maladies et ravageurs ainsi que de leurs besoins, afin de ne pas favoriser leur développement (J Avelino, ten Hoopen, & DeClerck, 2011; Ratnadass et al., 2012; Schroth, Krauss, Gasparotto, & Duarte, 2000)

C'est dans ce contexte que le programme de recherche international CASCADE a vu le jour, dans lequel s'intègre la présente étude, visant à identifier des stratégies pour aider les petits producteurs d'Amérique Centrale à s'adapter au changement climatique (Conservation International, 2014).

III- La rouille : une maladie qu'il faut apprendre à maîtriser

La rouille orangée est la plus grave maladie foliaire du caféier connue à ce jour (Muller, Berry, Avelino, & Bieysse, 2014). De par sa forte capacité à se disperser à de grandes distances, la rouille est difficile à contrôler. Les solutions d'éradication de la maladie par l'arrachage de tous les caféiers, comme cela a été tenté au Nicaragua, ne fonctionnent pas (Jacques Avelino & Rivas, 2013). D'autre part, les caféiers Arabica sont les plus vulnérables et représentent 4/5 des caféiers au monde ainsi que la quasi-totalité des caféiers d'Amérique Centrale (Muller et al., 2014). Pour diminuer les impacts de la rouille, il est nécessaire de comprendre comment la maladie fonctionne et quelles sont les conditions favorables à son développement et à sa dispersion afin de les contrer.

1. *HEMILEIA VASTATRIX* : RESPONSABLE DE LA ROUILLE DU CAFEIER

La rouille est détectée pour la première fois en 1869 sur l'île de Ceylan, aujourd'hui appelée Sri Lanka (Jacques Avelino & Rivas, 2013). Dès 1881, Ward démontre que le champignon *Hemileia vastatrix* est à l'origine de la rouille orangée du caféier (Waller, 1982). Parmi les 50 espèces du genre *Hemileia*, deux sont inféodées au caféier : *H. vastatrix* et *H. coffeicola*, causant respectivement la rouille orangée et la rouille farineuse (Jacques Avelino & Rivas, 2013). Le travail présenté ici s'intéresse au premier champignon, le second n'étant présent qu'en Afrique.

Ce champignon se classifie comme suit (Jacques Avelino & Rivas, 2013) :

Phylum: *Basidiomycète*
Classe: *Urediniomycetes*
Ordre: *Puccinales*
Famille: *Chaoniaceae*
Genre: *Hemileia*
Espèce: *H. vastatrix*

Hemileia vastatrix est un parasite obligatoire. En d'autres termes c'est un champignon qui se développe uniquement sur les feuilles vivantes de caféier. Il ne survivrait pas sur un milieu nutritif (Jacques Avelino & Rivas, 2013; INRA, 2015). Les premiers symptômes de la maladie sont de petites lésions jaunes sur la face inférieure des feuilles, où se trouvent les stomates, portes d'entrée du champignon. Puis les lésions grossissent et produisent les urédospores de couleur orange, caractéristiques de la maladie. A terme, les lésions fusionnent et se nécrosent, causant la chute des feuilles (Figure II, Figure III).

Lorsque l'attaque est sévère, les grains sont de plus petites tailles et défectueux (aptitudes à la transformation). Ils perdent de leur qualité (Osorio Rivillas, Serna Giraldo, Cristancho Ardila, & Gaitan Bustamante, 2011). Les branches défoliées finissent par mourir, réduisant de fait la capacité à produire (Jacques Avelino & Rivas, 2013; Boudrot et al., 2015; Waller, 1982).



Figure II: Photographie de cinq jeunes urédospores d'*H. vastatrix* (lésions orangées) (Garrido, 2015)



Figure III: Photographie de lésions coalescentes et nécrosées d'*H. vastatrix* (Garrido, 2015)

2. LE CYCLE DE LA ROUILLE

Le cycle de la rouille est l'enchaînement d'un dépôt de spores sur les feuilles de caféier (la pollution), de la germination, de la pénétration du tissu foliaire avant colonisation, suivi par la sporulation puis la dissémination pour qu'à ce que, de nouveau, d'autres dépôts se réalisent (Figure IV).

a. Etat libre du champignon : de la libération à la germination

Chaque lésion de *Hemileia vastatrix* peut produire **des centaines de milliers de spores, chacune capable de se disperser sur de longues distances** (Jacques Avelino & Rivas, 2013). Les urédospores sont produites sur un sporophore mais peuvent facilement être séparées par de faibles forces telles que le choc d'une goutte de pluie frappant les feuilles de caféier (Waller, 1982).

Selon Nutman *et al.*, la libération des urédospores est uniquement possible en présence d'eau libre (Nutman, Roberts, & Bock, 1960). Cette libération serait permise grâce aux impacts des gouttes de pluie (Nutman, Roberts, & Clarke, 1963). Il a été montré qu'entre 0.8 et 1 mm de pluie, les urédospores commencent à se libérer (Bock, 1962a; Kushalappa *et al.*, 1984; Nutman *et al.*, 1963) et se dispersent à courte distance (Jacques Avelino & Rivas, 2013). A la saison des pluies, la probabilité qu'une spore atteigne une feuille est élevée. Les spores sont déposées dans un premier temps sur la face supérieure des feuilles avant d'heurter dans un second temps la face inférieure de la feuille du dessus par splashing (Bock, 1962a; Nutman *et al.*, 1963; Rayner, 1961a, 1961b). Nutman, Roberts et Bock (1960) affirment que les spores sont essentiellement dispersées par les gouttes de pluie (in Waller,

1982). En revanche, si les pluies sont trop fortes, les spores peuvent être lessivées (Kushalappa, 1989). Les arbres d'ombrage jouent probablement un rôle dans la dispersion de la rouille, en interceptant et restituant des gouttes de pluie de plus haute énergie cinétique (Boudrot et al., 2015).

Rayner, quant à lui, défend davantage une libération à sec des spores via le vent ou les vibrations des feuilles provoquées par les gouttes de pluie (Rayner, 1961a, 1961b). Entre 12 et 20 km/h, la quantité de spores dispersées est maximale. Et c'est entre 10h et 15h que le plus de spores sont transportées, lorsque l'humidité est faible et les températures élevées (Waller, 1982). Le vent intervient essentiellement dans la dispersion des spores à moyennes et longues distances (Becker & Kranz, 1977; Bowden, Gregory, & Johnson, 1971). D'après Becker *et al.*, la dispersion par l'eau intervient dans une moindre mesure par rapport au vent (Becker & Kranz, 1977). D'autres agents interviennent dans la dispersion des spores. A petites et moyennes distances, les vecteurs majeurs de spores sont les insectes (Becker & Kranz, 1977) et les humains (Becker & Kranz, 1977; Kushalappa & Eskes, 1989; Waller, 1972).

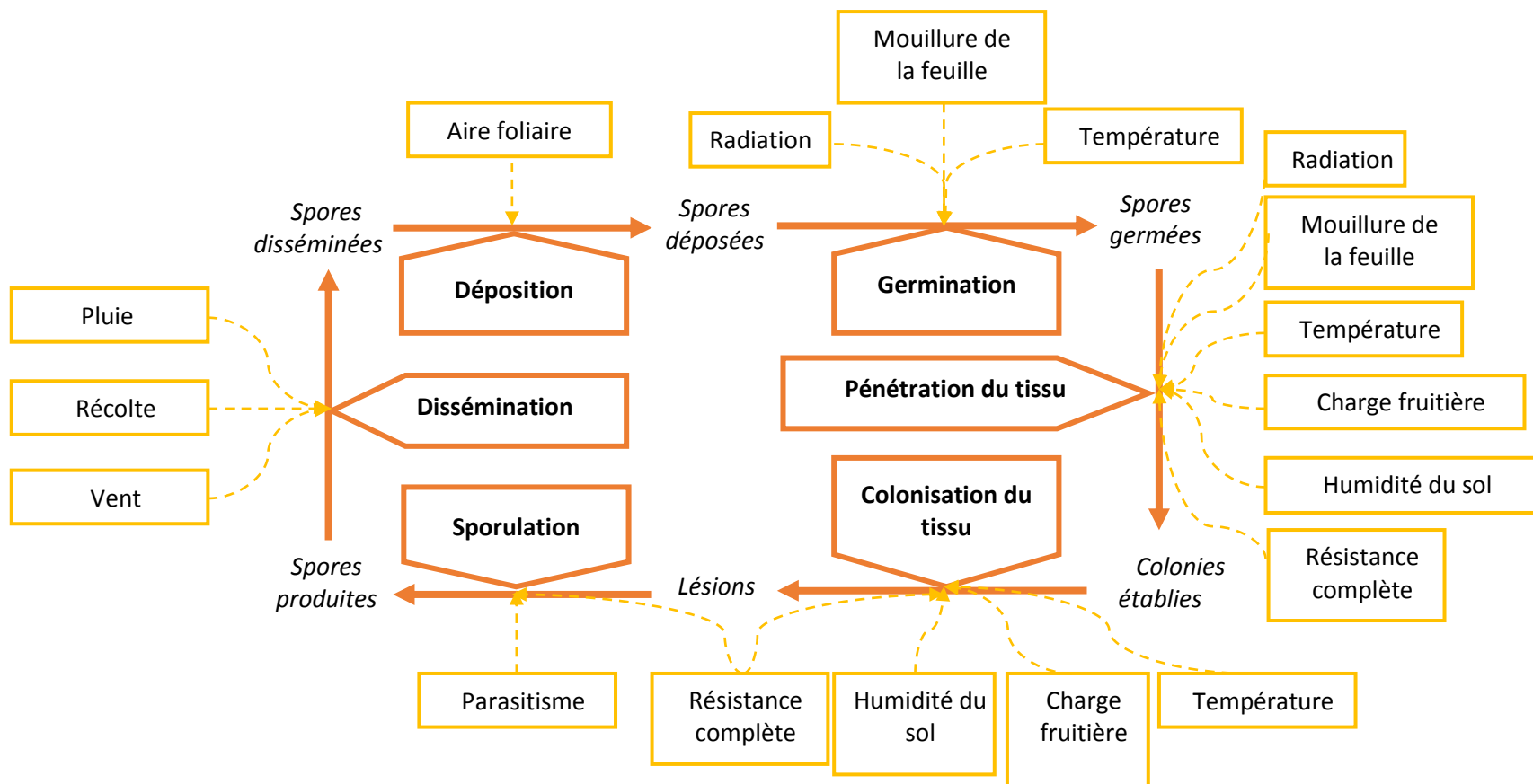


Figure IV: Diagramme des flux représentant le cycle de vie de *Hemileia vastatrix* (lignes continues) et les facteurs qui l'affectent (lignes discontinues) (Avelino & Rivas 2013)

La **germination** a uniquement lieu en conditions humides relativement prolongées (Rayner, 1961a)(Muller et al., 2014; Rayner, 1961a)(Muller et al., 2014; Rayner, 1961a)(Muller et al., 2014; Rayner, 1961a)(Muller et al., 2014; Rayner, 1961a). La température joue un rôle important dans la germination (J. Avelino et al., 2006). De 21-25°C la température est favorable à la germination et l'optimum est atteint à 22°C (Nutman et al., 1963; Waller, 1982). L'obscurité est un autre facteur important dans ce processus (Nutman et al., 1963; Rayner, 1961a). La nuit semble favoriser la germination (Sukumar Chakraborty, 2005; Rayner, 1961a) tandis qu'une forte lumière directe, l'inhibe (Waller, 1982). Un fort ombrage peut également permettre la germination de jour (Jacques Avelino & Rivas, 2013).

b. Relations trophiques caféier/*Hemileia vastatrix* : infection

L'infection correspond à toute la phase où le champignon entretient des relations trophiques avec sa plante hôte.

La **pénétration** du champignon dans le tissu foliaire a lieu via des stomates bien formés (Waller, 1982). Cela explique pourquoi les jeunes feuilles, dont les stomates sont en cours de formation, sont peu réceptives. Les feuilles les plus sensibles sont les feuilles vert clair ou « velours » (à partir du troisième nœud depuis l'apex). Une fois la pénétration effectuée s'instaurent les relations trophiques entre le caféier et *H. vastatrix*. La période d'incubation (de la germination à l'apparition des premiers symptômes) varie beaucoup en fonction de la température. Elle peut durer entre 29 et 62 jours. Il en est de même pour la période de latence (de la germination à la production des nouvelles spores). Elle peut tarder entre 38 et 70 jours (Kushalappa & Chaves, 1980). Mais des périodes plus courtes ont été rapportées en conditions contrôlées. Une humidité élevée du sol et une charge fructifère élevée réduisent la période de latence. Dans le cas de la charge fructifère, lorsque celle-ci est importante, il y a probablement migration, des feuilles vers les fruits, de composés phénoliques qui interviennent dans les mécanismes de défense. Cela diminuerait la résistance physiologique des feuilles aux attaques de rouille. Or une faible période de latence signifie que la durée totale du cycle de *H. vastatrix* est réduite, ce qui permet à la maladie de se multiplier plus rapidement. L'épidémie en sera d'autant plus forte. A 22°C, température optimale de culture du caféier, la période de latence est de 4 jours plus importante qu'à 25°C. Une augmentation de la température, dans une certaine limite, est donc bénéfique à la colonisation de *H. vastatrix*. Cependant, la température devient mortelle à 40°C (Jacques Avelino & Rivas, 2013).

Suite à la pénétration se forment des hyphes intercellulaires qui permettent au pathogène de s'alimenter et de **coloniser les tissus foliaires** (McCain & Hennen, 1984). Il est estimé qu'une lésion de rouille peut produire 400 000 spores en trois mois (Rayner, 1972). Les facteurs influençant leur production sont peu connus. L'humidité relative et la température pourraient jouer un rôle (Kushalappa & Eskes, 1989). Les lésions de rouille sporulantes peuvent être mycoparasitées par *Lecanicillium lecanii*, ce qui réduit l'intensité de la sporulation (J. Vandermeer, Perfecto, & Liere, 2009).

3. EPIDEMIOLOGIE DE LA ROUILLE ORANGEE ET LES FACTEURS L'INFLUENÇANT

L'épidémie se découpe en deux phases : (1) la formation de l'inoculum primaire – responsable du développement initial de l'épidémie – et (2) la répétition des cycles de *H. vastatrix* à l'origine de la constitution de l'inoculum secondaire. L'intensité de l'épidémie dépend davantage de cette seconde phase. En effet, comme pour toutes les maladies polycycliques, la quantité d'inoculum initial importe peu. Si les conditions pour la répétition du cycle sont bonnes, même avec une quantité d'inoculum initial très faible, l'épidémie pourra atteindre des niveaux élevés (Jacques Avelino & Rivas, 2013).

a. Inoculum initial

La source principale d'inoculum primaire est l'inoculum résiduel (Mayne, 1930) provenant des feuilles de caféier qui ont survécu à la saison sèche (J. Avelino, Muller, Cilas, & Velasco Pascual, 1991; Muthappa, 1980). La défoliation des caféiers élimine l'inoculum. Elle peut être accentuée par des situations de stress comme une forte production, un déséquilibre nutritionnel, une forte exposition au soleil, un faible potentiel hydrique et une saison sèche très longue (Avelino, J., Toledo, J.C., y Medina, 1995).

b. Progression de la maladie à l'échelle de la plante

L'avancée de la maladie à l'échelle de la plante est dite **centrifuge**. La rouille passe des feuilles matures, situées à l'intérieur du caféier, vers les feuilles plus jeunes situées davantage à l'extérieur, et des rameaux âgés, en bas du caféier, vers les rameaux jeunes, en haut (Jacques Avelino & Rivas, 2013).

c. Facteurs influençant son intensité

De manière générale l'intensité de présence de la rouille évolue au cours d'une même année. En fin de saison sèche, la rouille est de moins en moins présente suite à la chute de feuilles puis se développe de nouveau lors de la saison des pluies. Le développement est d'abord lent. La croissance des lésions latentes ou nécrosées est réactivée. Puis elles sporulent. Le développement devient ensuite plus rapide, avec de nouvelles infections jusqu'à atteindre un pic (Bock, 1962b). En revanche, ce qui fait varier l'intensité d'une attaque entre les années dépend des interactions entre la plante hôte, le pathogène, l'environnement (dont le climat) et les techniques culturales (Zadoks & Schein, 1979).

Il existe des variétés résistantes qui résultent, pour la plupart, de croisements entre des variétés commerciales sensibles et de l'hybride de Timor, un hybride naturel entre *C. arabica* et *C. canephora* qui possède les gènes de résistance de *C. canephora*. Par ailleurs, une cinquantaine d'espèces de rouille différentes sont répertoriées pour lesquelles leur virulence et leur agressivité leur sont propres, ce qui complexifie les relations plante-hôte (Jacques Avelino & Rivas, 2013).

Certaines caractéristiques climatiques sont favorables à l'accroissement de l'épidémie, comme la pluie telle que précédemment vu. C'est également le cas d'une forte luminosité

avant l'infection accompagnée d'une forte température (Eskes, 1982a, 1982b; Waller, 1982). Comme précédemment évoqué, seule une fenêtre de températures favorise la germination. Il en est de même pour la progression du champignon dans les feuilles. La température étant liée à l'altitude, cela explique que l'évolution de l'épidémie soit dépendante de l'altitude de la plantation (Jacques Avelino & Rivas, 2013). A haute altitude, les fraîches températures nocturnes peuvent constituer un important facteur limitant de la progression de la rouille (J. Avelino et al., 2006, 1991; Bock, 1962b; Waller, 1982). Au cours de l'épidémie de 2012, les parcelles au-dessus de 1400 m d'altitude ont été moins sévèrement atteintes que celles de basse altitude (Avelino et al., 2015).

A l'inverse, les mycoparasites qui affectent la rouille orangée du caféier sont multiples (Carrion & Rico-Gray, 2002). *Lecanicillium lecanii* est le principal (John Vandermeer, Perfecto, & Philpott, 2010). *L. lecanii* est particulièrement abondant sous ombrage. Selon Staver cela est dû aux conditions humides que procure l'ombrage (Staver, Guharay, Monterroso, & Muschler, 2001). Les lésions de rouille sont parasitées par *L. lecanii* en général à la fin de la saison des pluies, quand la maladie est déjà très développée (Figure V). Dû à cet effet tardif, le mycoparasite peut seulement affecter la quantité d'inoculum primaire de rouille (Staver et al., 2001).



Figure V: Photographie de *Lecanicillium lecanii* parasitant des urédospores de rouille orangée du café (de couleur blanche) (Garrido, 2015)

Dans une volonté de hiérarchiser les **facteurs favorisant le plus l'épidémie de rouille**, Waller (1982) a identifié (1) la distribution et l'intensité de la **pluie**, (2) l'**inoculum résiduel** à la fin de la saison sèche (malgré les caractéristiques polycycliques de la rouille) et (3) la **quantité de feuilles** encore présente à l'entrée de la saison des pluies. Avelino quant à lui, a identifié la charge fructière et la masse foliaire, l'ombrage et la fertilisation et l'altitude (associée aux températures) et le pH du sol comme principaux facteurs favorisant la rouille, respectivement dépendant de l'hôte, de l'itinéraire technique et de l'environnement (J. Avelino et al., 2006).

IV- L'ombrage : une solution de biocontrôle

1. LA MONOCULTURE DE CAFE : UN SYSTEME PRODUCTIF MAIS NON DURABLE

La monoculture de café a été largement adoptée en Amérique Centrale car de par sa forte exposition au soleil, les caféiers offrent un meilleur rendement. Cependant, ce relatif gain en rendement peut être limité par (1) les conditions de sol et du climat, (2) après une à deux décennies par la dégradation de l'environnement – sol ; résidus de pesticides – la production et/ou sa qualité peut être sérieusement réduite (Boyce, Fernández Gonzalez, Fürst, & Segura Bonilla, 1994), et (3) par l'espérance de vie réduite des caféiers en « plein soleil » (Ahenkorah, Akrofi, & Adri, 1974; Beer, Muschler, Kass, & Somarriba, 1998).

D'autre part, la vulnérabilité des agrosystèmes aux bioagresseurs – en comparaison aux écosystèmes naturels – s'explique en premier lieu par une diminution de la diversité végétale et animale. Dans les systèmes intensifs en monoculture, les cultivars sont plus sujets au développement des bioagresseurs (Altieri, 1999; Malezieux et al., 2009; Mouen Bedimo et al., 2012), ce qui génère des inquiétudes (Perfecto, Rice, Greenberg, & van der Moort, 1996). Suite à l'épidémie de 2012 qui a eu une ampleur régionale, l'ombrage fut ainsi proposé comme moyen pour ralentir la dispersion des urédospores de rouille orangée et donc de la maladie entre parcelles, paysages, pays (Vandermeer, J., Jackson, D., and Perfecto, 2014).

2. LES ARBRES D'OMBRAGE : UN OUTIL DE LUTTE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

En Amérique Centrale, les systèmes de production modernes de café (absence ou faible présence d'ombrage, hauts apports en intrants) ont permis d'atteindre de hauts rendements. C'est en court-circuitant les services écologiques et en refermant les cycles des nutriments et en réduisant la diversité des ressources nutritionnelles que cela a été rendu possible. Des services écologiques, d'ordinaire rendus par l'ombrage, tel que la litière de feuilles produite par l'ombrage, ont été réduits ou remplacés par l'usage de fertilisants et de pesticides (Hagggar et al., 2011). Ces systèmes sans ombrage sont également souvent associés à des dégradations du sol et des pollutions environnementales (F. M. DaMatta, 2004). Ils ne sont pas durables et ne permettent pas, y compris à l'aide de moyens chimiques, de réguler les bioagresseurs, dont la rouille.

Les bénéfices des plantations ombragées sont la conservation des ressources naturelles, de faibles besoin en apports nutritionnels et des revenus financiers plus stables grâce aux apports complémentaires générés par la production de fruits ou de bois par les arbres d'ombrage (F. M. DaMatta, 2004). De plus, l'ombrage en tant que source de diversité végétale, peut constituer un élément majeur de régulation de la rouille, notamment de par son effet régulateur sur la charge fructifère. Dans le cadre du changement climatique, les arbres d'ombrage peuvent également avoir un effet tampon sur les stress hydriques, les températures et sont réputés pour réduire l'impact des pluies (Jacques Avelino & Rivas, 2013). En cela, l'ombrage constitue une voie naturelle – mais à maîtriser avec justesse – pour réguler les bioagresseurs, et notamment la rouille, à l'heure actuelle et à l'avenir.

3. NON « UN » SINON « DES » AGROSYSTEMES CAFEIERS SOUS OMBRAGE

Avant d'aborder les effets des arbres d'ombrage sur l'agrosystème, il est important de définir ce qu'est un agrosystème ombragé. De nombreux auteurs parlent de « plantations de café sous ombrage » avec très certainement une signification unique pour chacun (Toledo & Moguel, 2012).

Ces mêmes auteurs, Toledo et Moguel, proposent les définitions suivantes, en allant du système le plus complexe au système le plus simplifié (Figure VI).

- **Système de polyculture commerciale.** Ce système a été créé suite à l'élimination de la forêt originelle et à l'introduction d'arbres d'ombrage appropriés à la culture du café. Les arbres ont dans un premier temps été choisis pour la couverture qu'ils procurent et dans un second temps pour les autres usages qu'il est possible d'en faire (production fruitière ou sylvicole). Par exemple, de nombreuses légumineuses arborescentes apportent de l'azote au sol ou ont d'autres fonctions commerciales importantes (bois de chauffe et/ou bois d'œuvre).
- **Système d'ombrage en monoculture.** Ce système est représentatif des systèmes modernes de production de café. Dans ce cas, les arbres d'une unique espèce sont utilisés pour protéger la parcelle. Au Costa Rica, il s'agit d'une Fabacée légumineuse appartenant à la sous-famille Erythrinae.
- **Système de caféiers sans ombrage.** Ce système est aussi représentatif des systèmes modernes de production. Sans arbre d'ombrage, les caféiers sont directement exposés au soleil. Convertie en une plantation spécialisée, elle nécessite des variétés génétiquement améliorées, de hauts apports en fertilisants et pesticides et un intense travail tout au long de l'année.

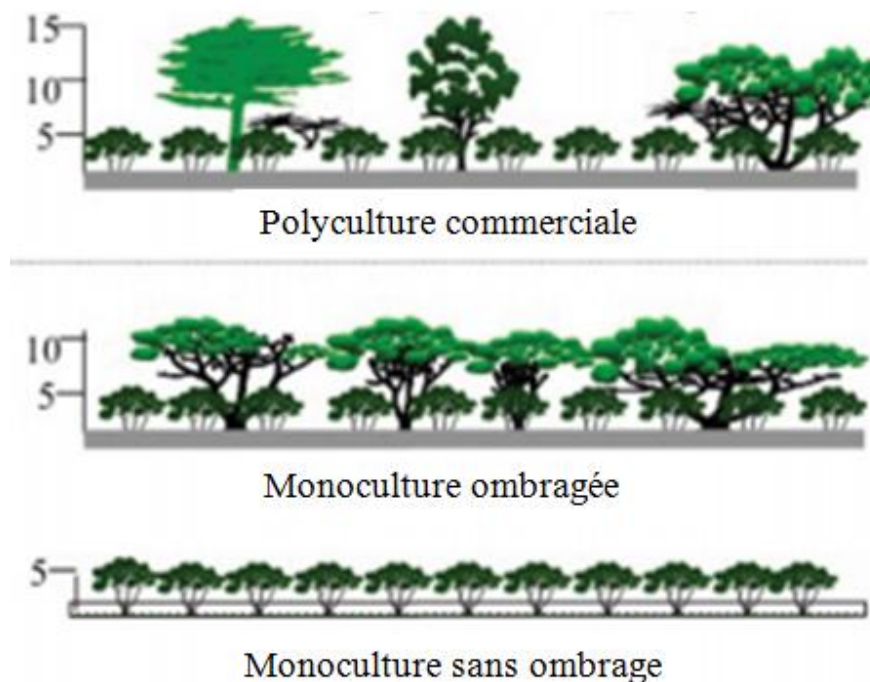


Figure VI: Les principaux aménagements agroforestiers (structure de la végétation, composition) en caféiculture (Toledo & Moguel, 2012).

V- Les premiers effets de l'ombrage mis à jour

Introduire de la biodiversité végétale ne garantit pas au système d'être plus sain. Certaines espèces d'arbres d'ombrage peuvent être hôtes de bioagresseurs du caféier ou alors modifier le microclimat en faveur du développement de ces derniers (Ratnadass et al., 2012). La densité des arbres d'ombrage peut aussi avoir son importance. Il est considéré que la limite maximale d'ombrage acceptée pour le caféier se situe entre 40 et 70% (ICAFE, 1989; Kumar & Tieszen, 1982; Muschler, 1995).

1. EFFETS DIRECTS DE LA MISE EN PLACE D'ARBRES D'OMBRAGE

De nombreuses études décrivent l'importance d'utiliser un grand nombre d'espèces différentes. Ces espèces contribuent à la subsistance de la famille de producteurs en termes de nourriture, bois de chauffe ou de construction, ressource médicale. La vente ou la consommation des produits non issus du café rapportent entre un quart et un tiers de la valeur monétaire produite par l'agroécosystème. De par la plus grande indépendance acquise, cela confère aux familles de producteurs une plus grande force sociale et politique (Toledo & Moguel, 2012).

Au Costa Rica, une légumineuse est quasiment toujours présente dans les systèmes de production de café. Il s'agit d'*Erythrina poeppigiana*. Outre sa capacité à fixer l'azote atmosphérique, cet arbre a une grande capacité à produire de la biomasse, ce qui alimente la litière, incorpore l'azote au sol et protège le sol. En revanche, certaines légumineuses peuvent entrer en compétition avec le caféier pour l'eau et limiter sa production (Haggar et al., 2011).

De manière générale, le taux de matière organique augmente avec le temps en système agroforestier de café (Beer et al., 1998) et le ruissellement et l'érosion diminuent (Bermudez, 1980; Leon, 1990; Wiersum, 1984).

2. MODIFICATION DU MICROCLIMAT

Les arbres d'ombrage modifient également le microclimat au niveau des caféiers : (1) ils tamponnent (a) les températures de l'air, du sol et des organes de plantes et (b) l'humidité de l'air et du sol ; (2) permettent une humectation plus élevée des organes des plantes (Beer et al., 1998; F. DaMatta, 2007; Olasantan, Ezumah, & EO, 1996; Ong, Subrahmanyam, & Khan, 1991; Staver et al., 2001) ; (3) réduisent la vitesse du vent; (4) diminuent la quantité et la qualité de la lumière ce qui évite la surproduction de cerises (Beer et al., 1998; Mouen Bedimo et al., 2012).

3. FOURNITURES DE SERVICES ECOSYSTEMIQUES

En plus des changements précédemment évoqués, les arbres d'ombrage fournissent des services écosystémiques. De par leur présence, ils fixent le carbone de l'atmosphère et contribuent à compenser la déforestation. Les systèmes agroforestiers jouent un rôle dans le maintien de la qualité de l'eau et des populations de pollinisateurs (Toledo & Moguel, 2012). Les arbres d'ombrage, qui peuvent être très différents et présents en abondance dans

certaines systèmes agroforestiers, sont aussi les hôtes d'un grand nombre d'espèces animales, parmi lesquels des agents de contrôle biologique (López-Bravo, Virginio-Filho, & Avelino, 2012). Ainsi les systèmes agroforestiers peuvent aider à réguler naturellement des maladies et ravageurs (Beer et al., 1998; Ratnadass et al., 2012; Schroth et al., 2000; Staver et al., 2001). Enfin, l'usage d'arbres d'ombrage permet d'éviter la surproduction et les fluctuations biennales de production (F. M. DaMatta, 2004), procurant dans le même temps des revenus plus stables à l'agriculteur (Cannell, 1985; F. M. DaMatta, 2004). Plus l'ombrage est important, plus la production est réduite du fait : (1) de la moindre assimilation en carbone ; (2) d'une stimulation végétative plus grande que celle des boutons floraux (Cannell, 1975) ; (3) de la formation d'un nombre plus réduit de nœuds fruitiers formés par branche (Castillo & Lopez, 1966; Montoya, Sylvain, & Umaña, 1961). Or, le nombre de nœuds fruitiers est l'élément le plus important dans la composition du rendement (Cannell, 1975). Cependant, lorsque l'ombrage est trop intense, alors les arbres entrent en compétition avec les caféiers et l'atténuation de la lumière provoque étiolation et modification de la morphologie des feuilles (Beer et al., 1998). Dans des conditions climatiques tropicales, il a été trouvé que le taux de photosynthèse était maximal pour un ombrage intermédiaire (Nutman, 1937a, 1937b).

4. EFFETS SUR LA ROUILLE

Les effets de l'ombrage sur la rouille orangée du caféier sont controversés (Beer et al., 1998). Certains auteurs soutiennent que l'ombrage favorise la maladie (Staver et al., 2001) quand d'autres trouvent que l'ombrage la réduit (Soto-Pinto, Perfecto, & Caballero-Nieto, 2002). D'autres encore, défendent que la rouille dépend davantage des espèces d'arbres d'ombrage (Salgado, Macedo, Carvalho, Salgado, & Venturin, 2007) et/ou de la charge fruitière (J. Avelino et al., 2006, 2004; López-Bravo et al., 2012). Cette controverse peut être expliquée par le fait que l'ombrage fait entrer en jeu de nombreux mécanismes écologiques qui interagissent entre eux, et aussi avec les variables climatiques (J. Avelino et al., 2004).

Dans un premier temps, introduire des arbres d'ombrage, a pour effet de réduire le nombre de caféiers. Ayant moins de plantes hôtes, certains bioagresseurs peuvent se voir limités dans leur développement (Mouen Bedimo et al., 2012). Les plantes hôtes deviennent moins visibles pour les insectes ou les phénomènes de contagion de plante en plante sont moins faciles pour les pathogènes.

D'autre part, l'ombrage, réduit la charge fruitière des caféiers, et réduit dans le même temps la réceptivité des feuilles au champignon. En cela il défavorise le développement de la rouille (López-Bravo et al., 2012). En revanche, il facilite le développement de son hyperparasite, *Lecanicillium lecanii* (Staver et al., 2001). La présence des arbres d'ombrage permet à la fois d'intercepter le vent et par conséquent de réduire la dispersion à sec des spores de rouille (Jaramillo-Robledo & Gómez-Gómez, 1989) et de supprimer la rosée, unique source d'eau libre durant la saison sèche qui favorise la germination des spores (Jacques Avelino & Rivas, 2013).

Toutefois, l'ombrage peut aussi modifier le microclimat, comme précédemment expliqué, dans un sens qui favorise le pathogène, en particulier les processus de germination et de colonisation (López-Bravo et al., 2012). Les processus pré-infectieux (germination, pénétration) sont favorisés par des températures stables, une humidité élevée et la

réduction de l'intensité lumineuse (J. Avelino et al., 2006, 2004; F. M. DaMatta, 2004; Jaramillo-Robledo & Gómez-Gómez, 1989). A mesure que l'ombrage augmente, l'incidence de la rouille (le pourcentage de feuilles atteintes), qui dépend du succès des phases pré-infectieuses, croît aussi. D'autre part, à charge fruitière égale, l'incidence de la rouille sera plus forte sous ombrage (Jacques Avelino & Rivas, 2013; López-Bravo et al., 2012).

Par ailleurs, nous pouvons noter que lorsque les arbres d'ombrage ont une taille supérieure à 7m, les gouttes de pluie atteignent leur vitesse maximale avant d'entrer en contact avec les caféiers et sont dotées d'une forte énergie cinétique. Dans ces conditions la dispersion à sec, par impact des feuilles – tap and puff, ou par splashing, quand les spores ont pollué la face supérieure des feuilles, est également plus importante. Il semblerait que pour limiter la dispersion de la rouille, de petits arbres d'ombrage, dotés de petites feuilles soient plus adéquats (Boudrot et al., 2015).

Pour résumer, voici ci-dessous les interactions mises en jeu (Figure VII) et les facteurs influençant la rouille sous ombrage (Tableau I).

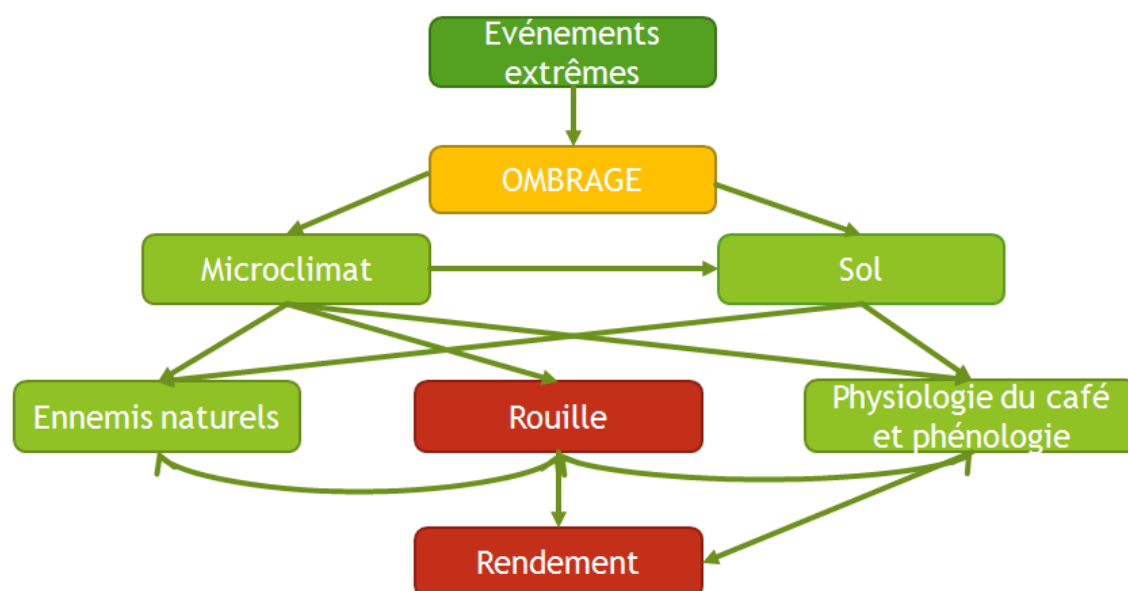


Figure VII: Voies d'action de l'ombrage sur 3 services écosystémiques : la qualité du sol, la régulation des bioagresseurs ; la production

Tableau 1: Effet potentiel de l'ombrage sur la rouille orangée à travers ses effets sur les facteurs qui affectent les différents processus de la maladie (Jacques Avelino & Rivas, 2013).

Voies d'action	Etape du cycle de la rouille concernée	Effet potentiel de l'ombrage sur chaque étape à travers la voie d'action indiquée	Explication
Pluie	Dispersion	+/-	L'ombrage intercepte les gouttes d'eau. Quand la pluie est en faible abondance, l'eau de parvient pas au caféier. Il n'y a pas de dispersion. Quand les pluies sont abondantes, l'ombrage canalise l'eau, formant de grosses gouttes à l'impact potentiellement plus fort (dépend de l'altitude de l'arbre d'ombrage).
Vent	Dispersion	-	L'ombrage intercepte le vent et réduit la dispersion à sec.
Aire foliaire	Dépôt	+	Si l'ombrage n'est pas excessif, l'indice d'aire foliaire des feuilles de caféier est plus élevé qu'en plein soleil (moins de feuilles, plus amples et de longévité plus grande). La réussite du dépôt est plus grande sous ombrage.
Mouillure	Germination Pénétration	+/-	L'ombrage conserve l'eau libre provenant de la pluie dans les plantations. Cependant sous ombrage il n'y a pas de rosée, unique source d'eau libre les journées sans pluies.
Radiation	Germination Pénétration	+	L'ombrage intercepte la radiation et facilite la germination.
		-	L'ombrage intercepte la radiation et diminue la réceptivité de la feuille de café.
Température	Germination Pénétration Colonisation	+	L'ombrage régule les températures. En particulier, les températures maximales journalières des feuilles sont plus basses qu'en plein soleil. Les températures se maintiennent plus proches des températures optimales pour la rouille orangée.
Charge fruitière	Pénétration Colonisation	+/-	L'ombrage réduit le rythme biennal de la production.
Humidité du sol	Pénétration Colonisation	+	L'ombrage conserve l'humidité du sol et favorise la pénétration et la colonisation.
Lecanicillium lecanii	Sporulation	-	L'ombrage favorise le mycoparasite de la rouille

A la lumière de ce qui a été précédemment exposé, l'ombrage pourrait constituer une solution (i) pour prévenir les événements climatiques extrêmes attendus avec plus de fréquence, dans le cadre du changement climatique, et (ii) pour éventuellement lutter contre la rouille. Les études menées jusqu'à présent comparent seulement des modalités « avec » et « sans » ombrage. Or, les conditions microclimatiques peuvent être différentes selon la nature des arbres d'ombrage. C'est pourquoi, plus spécifiquement dans la présente étude nous nous intéressons à différents systèmes agroforestiers et aux caractéristiques de leurs arbres d'ombrage. Pour définir quels systèmes agroforestiers ont le meilleur potentiel, les voies d'action ombrage-microclimat-rouille seront explicitées. López-Bravo s'est déjà penché sur les voies d'action impliquant la charge fruitière et le microclimat (mouillure et température des feuilles). Ici, nous intéresserons à nouveau aux températures de l'air et des feuilles, mais aussi à l'énergie cinétique des gouttes de pluie qui n'a jamais été documentée dans les systèmes agroforestiers à base de café.

HYPOTHESES ET ETAPES DE TRAVAIL

L'objectif de l'étude est d'analyser l'effet de différents systèmes agroforestiers sur les processus pré-infectieux et de colonisation de la rouille orangée du caféier. Il s'agit par la suite de répondre à la question suivante :

Quelles caractéristiques du système agroforestier, microclimatiques d'une part et des espèces d'arbres d'ombrage d'autre part, permettent au mieux de contenir la rouille orangée du caféier ?

Hypothèses :

1) Les arbres d'ombrage modifient l'énergie cinétique des gouttes d'eau de pluie.

Question de recherche n°1 : Comment les arbres d'ombrage présents dans les systèmes étudiés modifient-ils l'énergie cinétique des gouttes d'eau de pluie ?

2) Les différents systèmes agroforestiers impactent différemment les températures de l'air et des feuilles.

Question de recherche n°2 : Comment les arbres d'ombrage présents dans les systèmes étudiés modifient-ils les températures ?

3) Les différents systèmes agroforestiers impactent différemment la rouille orangée et les différentes étapes du cycle de son cycle.

Question de recherche n°3 : Comment les arbres d'ombrage impactent l'abondance de la rouille et à travers quels mécanismes (processus pré-infectieux, colonisation de la feuille, effet dilution dû à la croissance de l'hôte) ?

4) Il est possible de faire un lien entre les modifications du microclimat dans les différents systèmes agroforestiers et l'expression de la maladie.

Question de recherche n°4 : Existe-t-il un système agroforestier qui permette de lutter contre le changement climatique et de réguler la rouille orangée ?

Pour répondre à ces questions nous avons sélectionné deux systèmes d'ombrage représentatifs des plantations de caféiers des petites exploitations familiales du Costa Rica. Le premier système est composé d'érythrines et de caféiers et le second de caféiers, d'érythrines, de bananiers, d'arbres à production fruitière et sylvicole. Enfin un troisième système, uniquement composé de caféiers, a été intégré à l'expérimentation pour servir de témoin. Pour chacun de ces systèmes d'ombrage nous avons caractérisé le microclimat en mesurant les **températures de l'air et des feuilles** sous ombrage et l'énergie cinétique pour chacune des espèces d'ombrage présentes (Scholten, Geißler, Goc, Kühn, & Wiegand, 2011). De plus, nous avons caractérisé les arbres d'ombrage en mesurant (1) la SLA des feuilles et (2) le ratio $\frac{\text{périmètre}^2}{\text{aire}}$ des feuilles (Garnier & Shipley, 2001; Guide, 1996). En ce qui concerne la rouille nous avons évalué (1) son **incidence (pourcentage de feuilles malades, une mesure du succès de l'infection et donc des conditions qui ont favorisé les processus pré-infectieux, dont germination et pénétration)**, (2) sa **sévérité (pourcentage de surface foliaire atteinte, qui dépend à la fois du succès de l'infection et de l'extension des lésions)**, (3) sa cinétique de **colonisation**, une mesure exacte de l'extension des lésions (4) le **nombre de lésions** par feuille, une mesure semblable à l'incidence mais à l'échelle de la feuille (5) l'apparition de **nouvelles feuilles** et (6) la **chute des feuilles – la dynamique de croissance du caféier peut expliquer la dynamique du parasite obligatoire qu'est la rouille.**

MATERIEL ET METHODES

I- Matériel et plan expérimental

1. LOCALISATION ET DESCRIPTION PHYSIQUE ET BIOLOGIQUE DE LA ZONE ETUDIEE

La présente étude est menée en parallèle d'un projet doctoral qui s'étend sur un ensemble de 59 parcelles paysannes de caféiers. Ce réseau de parcelles est localisé dans le canton de Turrialba, dans la région centrale du Costa Rica (9.54° N, 83.40° W, Costa Rica) (Figure VIII). Localisé en zone montagneuse, le réseau de parcelles bénéficie d'un climat aux caractéristiques de forêt tropicale humide avec une température moyenne de 22°C et des précipitations annuelles moyennes de 2 300 mm. Les parcelles situées en haute altitude sont sujettes à davantage de pluie et à des températures légèrement plus fraîches (Institut Météorologique National, 2009).



Figure VIII: Positionnement géographique de la zone d'étude, Turrialba

2. CHOIX DU RESEAU DE PARCELLES

Sur la base de ces 59 parcelles et avec pour objectif de **(1) quantifier finement la régulation des bioagresseurs** et **(2) de caractériser les possibles voies d'action**, un sous-groupe de neuf parcelles a été choisi. Les parcelles paysannes de caféiers ont été sélectionnées en fonction des différents niveaux de composition botanique (diversité-structure-ombrage du couvert), des différentes caractéristiques topo-climatiques et des différentes pratiques culturelles.

La diversité botanique est composée de trois types d'ombrage :

- caféiers en **plein soleil**
- caféiers + **érythrines**
- caféiers + érythrines + bananiers + **arbres fruitiers et autres arbres**

Afin de pouvoir contrôler l'influence des climats, nous avons défini trois **blocs de parcelles** avec les trois traitements agroforestiers étudiés. Les trois parcelles de chaque bloc sont géographiquement très proches, ce qui permet d'observer les trois types d'ombrage sous des conditions climatiques quasi-identiques par bloc de parcelles (Figure IX).



Figure IX: Cartographie des parcelles étudiées (bloc 1 en rouge, bloc 2 en bleu et bloc 3 en jaune)

D'autre part, afin qu'il n'y ait pas d'interférence avec les objets étudiés, toutes les parcelles choisies subissent un faible niveau d'intervention, toutes sont situées en haute altitude (>850 m). Voici la répartition par bloc des espèces d'arbre d'ombrage (Tableau II) :

Tableau II: Nom scientifique, famille, usage et abréviation des espèces d'arbre d'ombrage selon le bloc et leur système d'ombrage d'appartenance.

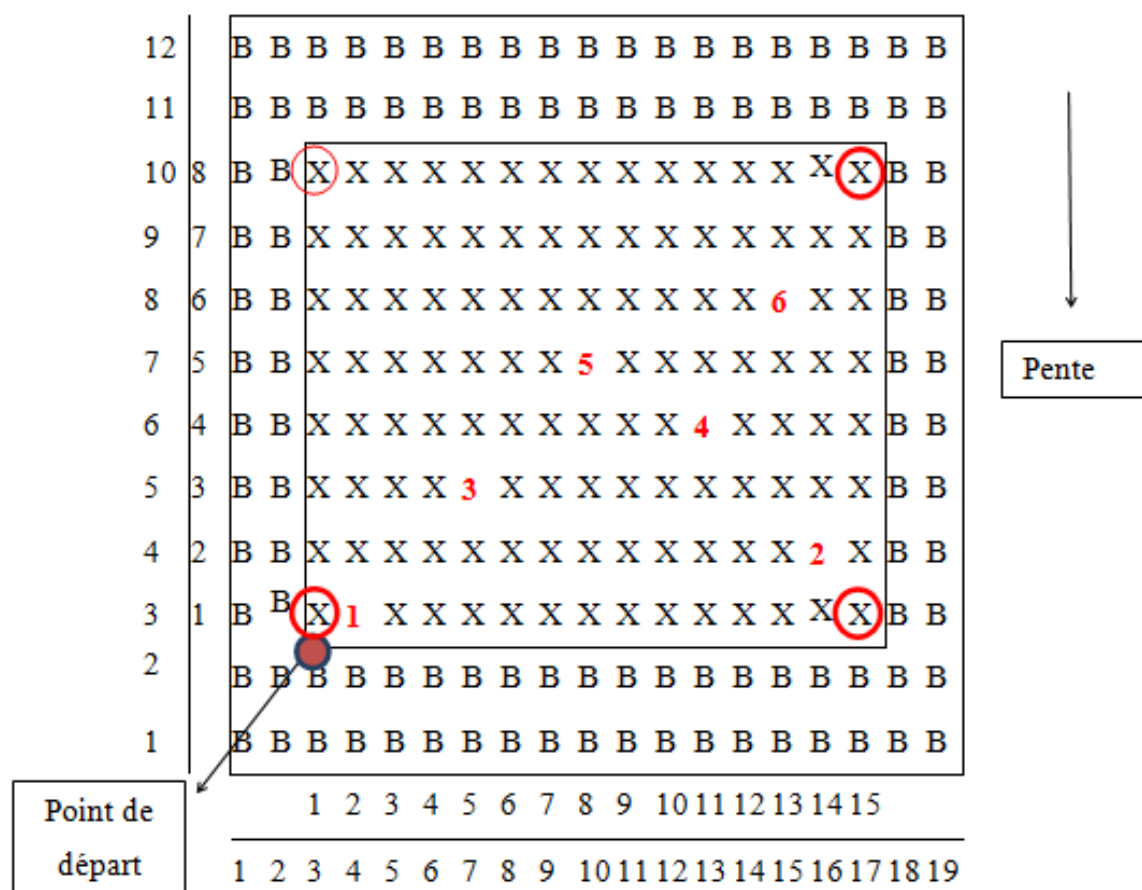
	Nom scientifique	Famille	Usage	Abréviation
Bloc 1				
Système "érythrine"	<i>Erythrina poeppigiana</i> *	Papilionoideae	Ombrage	E
Système "diversifié"	<i>Carapa guianensis</i>	Meliaceae	Production de bois	Cg
	<i>Cedrela odorata</i>	Meliaceae	Production de bois	Co
	<i>Cordia alliodora</i>	Boraginaceae	Production de bois	Ca
	<i>Citrus</i>	Rutaceae	Production de fruits	Ci
	<i>Musa sp.</i>	Musaceae	Production de fruits	Mu
Bloc 2				
Système "érythrine"	<i>Erythrina poeppigiana</i> *	Papilionoideae	Ombrage	E
Système "diversifié"	<i>Bactris gasipaes</i>	Arecaceae	Production de fruits	B
	<i>Cordia alliodora</i>	Boraginaceae	Production de bois	Ca
	<i>Erythrina poeppigiana</i> *	Papilionoideae	Ombrage	E
	<i>Inga densiflora</i> *	Mimosoideae	Production de fruits	Id
	<i>Inga edulis</i> *	Mimosoideae	Production de fruits	Ie
Bloc 3				
Système "érythrine"	<i>Erythrina poeppigiana</i> *	Papilionoideae	Ombrage	E
Système "diversifié"	<i>Cordia alliodora</i>	Boraginaceae	Production de bois	Ca
	<i>Erythrina poeppigiana</i> *	Papilionoideae	Ombrage	E
	<i>Musa sp.</i>	Musaceae	Production de fruits	Mu
* = légumineuse				

3. TAILLE DES PARCELLES DE CAFÉIERS

Dans chaque ferme est délimitée une parcelle composée de 12 lignes et 19 caféiers par ligne. La population totale de caféiers est de $12 \times 19 = 228$ individus. L'aire de chaque parcelle est liée aux distances entre les lignes et entre les caféiers d'un même rang. De fait, il est estimé que la surface s'étend entre 114m² et 456m².

Les arbres des deux rangs situés en bordure de chacun des côtés des parcelles délimitées (soit 108 caféiers) ne seront pas pris en compte dans les mesures. Ainsi, les mesures sont effectuées à l'intérieur d'une sous-parcelle située au centre de chacune des parcelles choisies. Cette parcelle utile est composée de 8 rangs chacun comprenant 15 caféiers, soit 120 caféiers (Figure X).

Les caféiers étudiés ont été sélectionnés en prenant soin qu'ils ne soient ni sur le même rang ni sur la même colonne. Pour faciliter l'identification des caféiers sélectionnés à chaque relevé, la base du tronc a été marquée.



1: Caféiers sélectionnés pour les mesures; X: Autres caféiers; B: Caféiers en bordure
 ○ Caféiers peints à la base du tronc pour délimiter la parcelle utile

Au sein de la parcelle utile, les plantes marquées sont :

- Caféier n°1: #Caféier 2 de la ligne1
- Caféier n°2: #Caféier 14 de la ligne2
- Caféier n°3: #Caféier 5 de la ligne3
- Caféier n°4: #Caféier 11 de la ligne4
- Caféier n°5: #Caféier 8 de la ligne5
- Caféier n°6: #Caféier 13 de la ligne6

Figure X: Plan théorique de la sélection des caféiers de chaque parcelle

4. CARACTERISATION DU SYSTEME D'OMBRAGE

a. Caractérisation des arbres d'ombrage

La hauteur des arbres ainsi que le pourcentage d'ombrage fourni par les arbres du système agroforestier sont des éléments importants pour caractériser les arbres d'ombrage. C'est pourquoi nous avons sélectionné ces deux variables.

Le pourcentage d'ombrage a été calculé tous les mois (de mars à juillet) pour chacun des six arbres des parcelles étudiées à l'aide d'un densimètre sphérique convexe (Lemmon, 1957). Il s'agit d'un miroir convexe dans lequel sont gravés 24 carrés. Le quadrillage délimite l'espace du couvert végétal se trouvant en face et sur les côtés de l'observateur. Les carrés plus gris sont sous ombrage (Figure XI). Ce sont eux que l'observateur compte. La couverture d'ombrage est évaluée dans quatre directions, soit un total de 96 carrés (proche de 100) ce qui permet d'en déduire un pourcentage d'ombrage. Dans la suite des analyses nous utilisons la moyenne des cinq évaluations de pourcentage d'ombrage par arbre. La hauteur et le pourcentage d'ombrage serviront comme variable aléatoire du modèle d'étude de l'énergie cinétique.



Figure XI: Densimètre sphérique convexe (Densimètre, 2014)

La **hauteur des arbres** a été déterminée en mars pour l'ensemble des neuf parcelles de l'étude. Comme pour le pourcentage d'ombrage, les données de hauteur des arbres ont été fournies par le doctorant, Rolando Cerda, qui travaille sur le même réseau de parcelles.

b. Caractérisation des feuilles des arbres d'ombrage

Pour l'ensemble des espèces d'ombrage, nous avons récolté 610 feuilles dont le détail est écrit ci-après (Tableau III) :

Tableau III: Récapitulatif des feuilles prélevées par espèce dans les différentes parcelles.

Espèces	Bloc de parcelles	Système d'ombrage	Nom scientifique	Nombre de feuilles	Répétitions
Erythrine	1	Erythrine	<i>Erythrina poeppigiana</i>	19	2
Caobilla	1	Diversifié	<i>Carapa guianensis</i>	10	2
Cèdres amère	1	Diversifié	<i>Cedrela odorata</i>	20	3
Oranger	1	Diversifié	<i>Citrus</i>	20	3
Erythrine	2	Erythrine	<i>Erythrina poeppigiana</i>	20	2
Guaba Variété 1	2	Diversifié	<i>Inga sp</i>	20	2
Guaba Variété 2	2	Diversifié	<i>Inga sp</i>	20	2
Pejibaye	2	Diversifié	<i>Bactris gasipaes</i>	20	3
Laurel	2	Diversifié	<i>Cordia alliodora</i>	20	3
Erythrine	2	Diversifié	<i>Erythrina poeppigiana</i>	20	1
Erythrine	3	Erythrine	<i>Erythrina poeppigiana</i>	20	2
Bananier	3	Diversifié	<i>Musa sp.</i>	54	1
Laurel	3	Diversifié	<i>Cordia alliodora</i>	19	2
Erythrine	3	Diversifié	<i>Erythrina poeppigiana</i>	20	1

Dans le cas de l'érythrine, espèce la plus représentée, nous avons récupéré une vingtaine de feuilles issues d'un ou deux arbres par parcelle. Dans le cas des autres espèces, présentées une seule fois par parcelle, nous avons récolté, dans la mesure du possible, plusieurs échantillons d'une vingtaine de feuilles. Enfin, dans le cas des feuilles de bananiers, pour des raisons de transportabilité mais aussi parce que ce sont des feuilles qui se découpent naturellement en lamelles, nous avons considéré que chacune de ces lamelles était équivalente à une feuille. Cependant, les lamelles récupérées proviennent toutes d'une unique feuille de bananier.

Pour une bonne fiabilité des données, nous avons récolté de jeunes feuilles, non abîmées et si possible exposées au soleil. La récolte a été effectuée entre 3h après le lever du soleil et 4h avant le coucher du soleil. Les feuilles ont été placées dans une glacière pendant le transport, afin d'éviter une déshydratation, et ont été analysées le soir même pour éviter une altération de ces dernières (Garnier & Shipley, 2001).

L'intérêt de caractériser les feuilles des arbres d'ombrage vient du lien potentiel qu'il peut y avoir entre la souplesse et le découpage de la feuille avec l'énergie cinétique des gouttes de pluie arrivant sur le caféier.

SLA = Specific Leaf Area

La SLA correspond à : $SLA = \frac{Surface (cm^2)}{Poids (g)}$. Plus la SLA est élevée et plus la feuille est souple. Elle aura moins de possibilités d'accumuler de l'eau. La surface et le poids des feuilles séchées ont été calculés pour chacun des 29 échantillons. La surface a été mesurée à l'aide d'un planimètre et les feuilles ont été pesées à l'aide d'une balance de précision. Les données analysées sont la moyenne des échantillons d'une espèce de la parcelle considérée.

Découpage de la feuille : Périmètre²/Aire

L'ensemble des feuilles récoltées ont été prises en photo. Par analyse d'image (logiciel Image J) nous avons pu individuellement déterminer le périmètre et l'aire de chacune des feuilles. Le découpage de la feuille est évalué comme suit : $PARA = \frac{Périmètre^2 (cm)}{Aire (cm)}$ (Guide, 1996). Plus cette valeur est élevée et plus la forme de la feuille s'éloigne du cercle qui est la forme capable d'accumuler le plus d'eau.

c. Charge fruitière des caféiers

La capacité du caféier à lutter contre la rouille étant lié à sa charge fruitière (Jacques Avelino & Rivas, 2013), nous l'avons évalué pour les trois systèmes d'ombrage. Sur chacun des six arbres des neuf parcelles d'étude, ont été comptés le nombre de nœuds fruitiers total et le nombre de fruits moyen par nœud. Ainsi nous avons pu estimer la charge fruitière de chaque arbre en multipliant le nombre de nœuds fruitiers au nombre moyen de fruits par nœud.

5. CARACTERISATION DU MICROCLIMAT

a. Mesure de la température et de la pluviométrie

Les données climatiques (température et pluviométrie) sont enregistrées sur les parcelles via des stations météorologiques Campbell CR1000 et Hobo.

Sur chacune des stations météorologiques Campbell CR1000 sont branchés 9 thermocouples : deux prennent la température du sol à 20cm de profondeur ; deux prennent la température de l'air à 1,50m du sol, quatre, avec trois thermocouples chacun, mesurent la température moyenne de 3 feuilles de caféiers (les trois thermocouples sont placés à trois hauteurs différentes dans l'arbre) et un dernier est dédié à la prise de la température de l'air hors couvert, à 2m du sol (Figure XII).

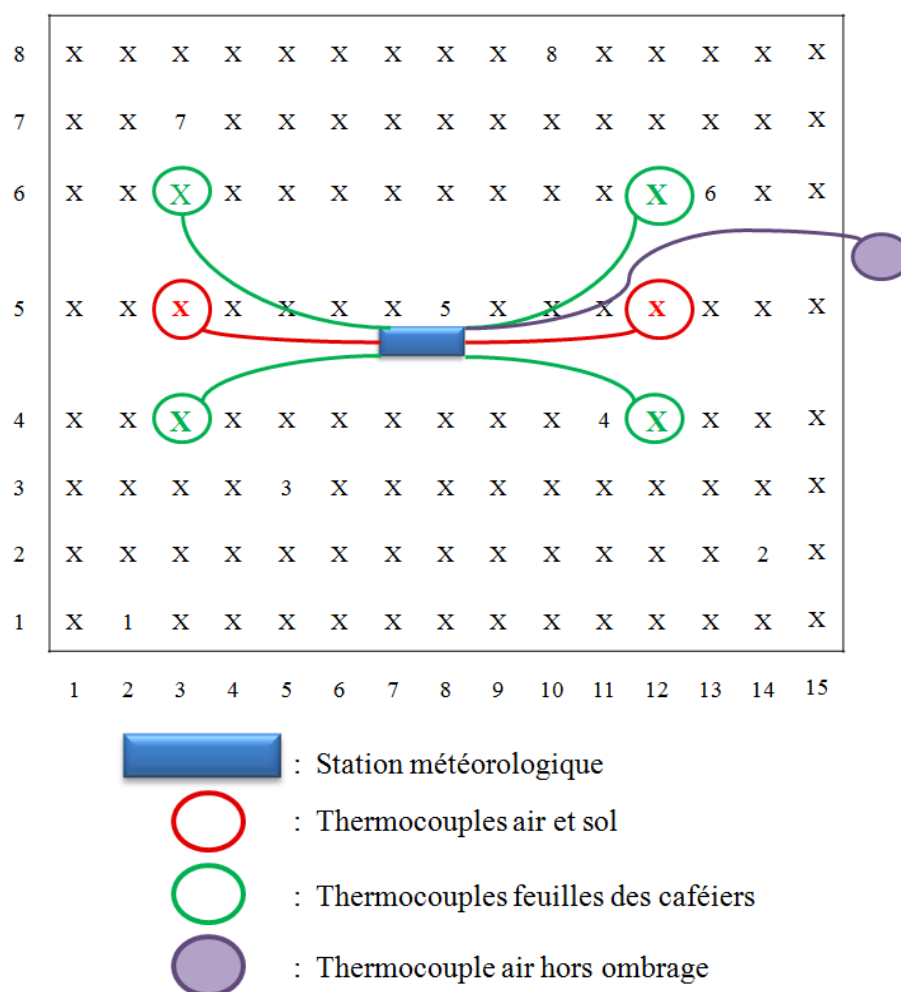


Figure XII: Dispositif de mise en place des capteurs de température dans les parcelles utiles

Pour mesurer la pluviométrie, un pluviographe est également branché à la station Campbell. Le pluviographe est installé à 2m d'altitude sans arbre d'ombrage à proximité. Ainsi, dans le cas des systèmes d'ombrage « érythrine » et « diversifié », les pluviographes ont été installés en bordure de parcelle. Ne pouvant pas être reliés à la station Campbell, limités par la longueur du câble, les pluviographes étaient rattachés à des stations Hobo. Les branchements des capteurs (température et pluviométrie) ont donc été effectués comme suit (Tableau IV):

Tableau IV : Branchement des capteurs (température et pluviométrie) sur les stations météorologiques selon les systèmes d'ombrage

Système « Plein Soleil »	Station Campbell (9 thermocouples et un pluviomètre)
	Station Campbell (9 thermocouples)
Système « Erythrine »	Station Hobo (1 pluviomètre placé en dehors de la parcelle)
	Station Campbell (9 thermocouples)
Système « Diversifié »	Station Hobo (1 pluviomètre placé en dehors de la parcelle)
	Station Campbell (9 thermocouples)

Température

L'objectif de ces mesures est de déterminer comment varient les températures de l'air et des feuilles.

N'ayant à disposition que trois stations météorologiques Campbell pour 9 parcelles, la collecte des données est effectuée par blocs successifs (Tableau V) :

Tableau V: Système de rotation des stations météorologiques pour la collecte des données du microclimat pour une série

	Bloc n°1	Bloc n°2	Bloc n°3
Du 0 au 10ème jour	X		
Du 10 au 20ème jour		X	
Du 20 au 30ème jour			X

La série présentée ci-dessus est effectuée deux fois : du 8 avril au 8 mai et du 1^{er} juin au 3 juillet.

Quand le dispositif est en place, les données sont relevées toutes les 10 minutes et enregistrées toutes les 30 minutes par la station météorologique.

Pluviométrie

L'objectif de la mesure est de mettre en lien l'énergie cinétique des gouttes de pluie, interceptées par la canopée, avec la pluviométrie. Cette étude étant réalisée pendant la saison des pluies, les pluviographes ont été installés sur les stations météorologiques uniquement lors de la deuxième série de mesures.

b. Mesure de l'énergie cinétique

Comme évoqué précédemment, l'objectif de la mesure est d'étudier comment la canopée modifie l'énergie cinétique des gouttes de pluie. Afin de pouvoir comparer les arbres d'ombrage entre eux, l'énergie cinétique des gouttes de pluie a été mesurée pour chaque espèce indépendamment.

Pour ce faire nous avons utilisé des splashcups (Figure XIII). Le dispositif est constitué d'un récipient rempli de sable de 150-250 μm . Le fond de ce récipient est une toile laissant uniquement passer l'eau. Le récipient est emboîté dans une armature reliée à une réserve d'eau. Entre le récipient et l'armature dans lequel il est déposé, se trouve du coton humidifié et depuis le coton jusque dans la réserve d'eau, est placée une mèche en coton. Ceci permet d'humidifier en permanence le sable du récipient et d'avoir les splashcups dans le même état en permanence (mouillés). L'ensemble de la structure est ensuite amarrée à 1.50m (au niveau de l'extrémité haute des caféiers) sur un support en bois. Le dispositif a pour vocation de mesurer la perte de sable (en g de sable séché) suite à une pluie.

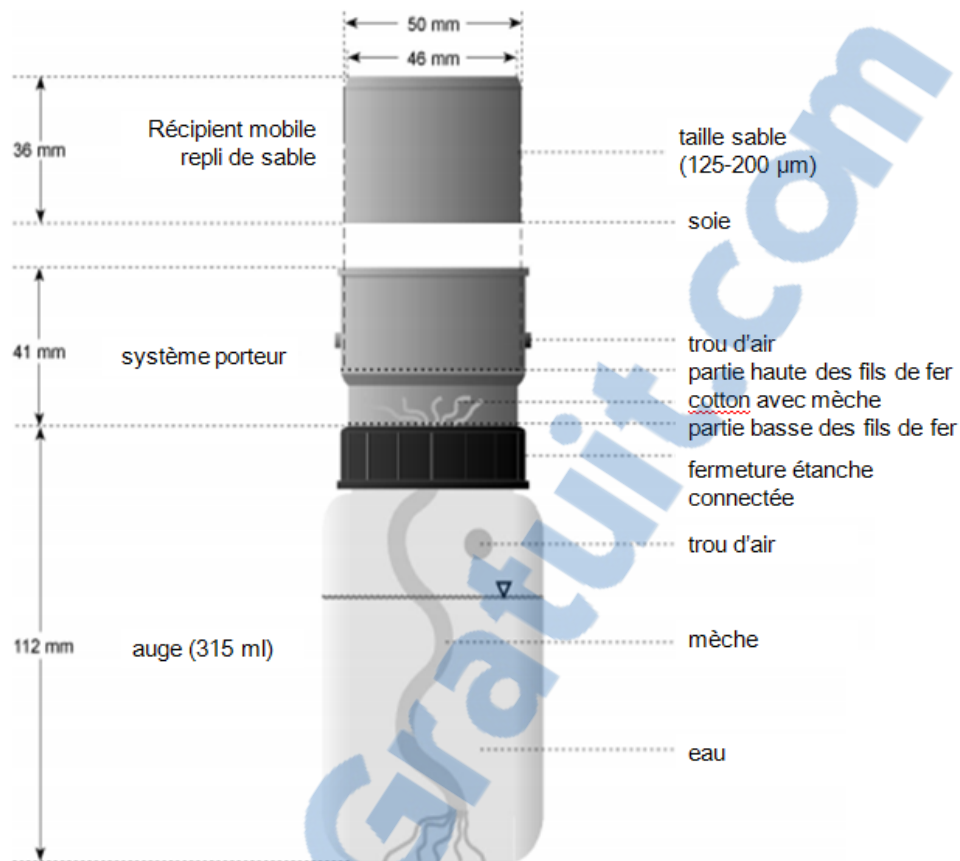


Figure XIII: Les principaux composants du splashcup (Scholten et al., 2011)

Scholten et al. (2011) ont mis au point ce dispositif et l'ont calibré. L'énergie cinétique peut être déduite en déterminant la perte de poids sec de sable après un événement pluvieux :

$$KE = 14,55 * \text{perte en sable}$$

Où :

- KE = Energie cinétique
- 14,55= coefficient
- Perte en sable= s'exprime en g de sable sec

Au cours de la série n°2 de mesures de température et pluviométrie, sont ajoutées des splashcups dans chacune des parcelles du bloc où sont installées les stations météorologiques de la manière suivante :

- En système « Plein Soleil » : 5 splashcup sont répartis dans la parcelle
- En système « Erythrine » : 5 en plein soleil et 5 placés sous différentes erythrines
- En système « Diversifié » : 5 en plein soleil et 5 par espèce présente

Le dispositif « armature en bois + base de la splashcup » reste en place 10 jours simultanés pour les trois parcelles d'un même bloc. Puis, aussi bien les stations

météorologiques que les splashcups sont réinstallées dans un nouveau bloc, pour une nouvelle dizaine de jours.

Après chaque épisode pluvieux, les coupelles de sable des splashcups sont récupérées pour être séchées et pesées. Les coupelles sont aussitôt remplacées par de nouvelles, avec du sable sec dont le poids est connu. Le renouvellement des coupelles a pu être répété entre 2 et 4 fois par parcelle. Autrement dit, 2 à 4 pluies ont pu être étudiées par parcelle.

6. SUIVI DE LA CROISSANCE DE LA ROUILLE ET DU CAFÉIER

Sélection des caféiers et des branches en vue des relevés

L'ensemble des mesures de croissance et des relevés d'impact de la rouille est réalisé sur les 6 arbres identifiés dans chaque parcelle, tout au long de l'expérimentation.

Sur chacun des six arbres sélectionnés, trois branches ont également été marquées : une en bas, une au milieu et une en haut. Cela permet de la même manière de réaliser les relevés de maladie et de croissance sur les mêmes branches tout au long de l'étude.

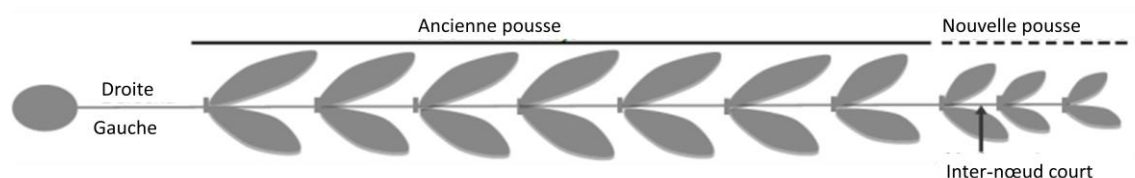
Durée des expérimentations

Les relevés des mesures de croissance du caféier et de la rouille ont lieu toutes les quatre semaines:

- Date 1 (F1) : avant le développement des bioagresseurs, Mars (du 23 au 27), saison sèche
- Date 2 (F2) : au cours de la saison sèche, Avril (du 20 au 24)
- Date 3 (F3) : au début de la saison des pluies, Mai (du 18 au 22)
- Date 4 (F4) : au cours de la saison des pluies, Juin (du 15 au 19)
- Date 5 (F5) : peu avant la récolte, Juillet (du 13 au 17)

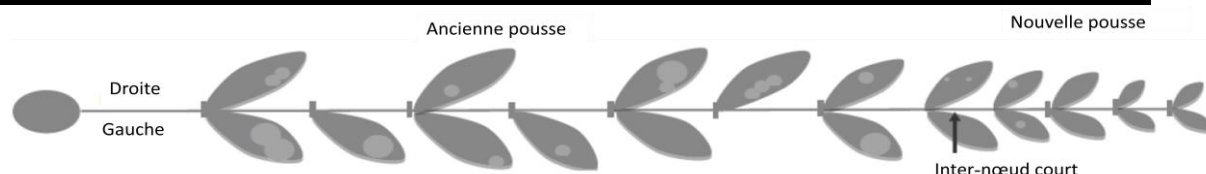
Méthode

La méthode utilisée permet de suivre feuille à feuille la croissance et la défoliation du caféier, et la croissance de la maladie, en termes de nombre de feuilles et en termes de surface foliaire (Figure XIV). L'inter-nœud court sépare deux poussées de croissance de la branche. Il sépare ainsi les feuilles dites « vieilles » de l'année passée et les feuilles dites « jeunes » de l'année en cours.



1ère évaluation

N° nœud	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Taille feuilles	5 5	5 5	5 5	5 5	5 5	5 5	5 5	4 4	3 3	2 2
Taille lésions de rouille	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0



2ème évaluation

N° nœud	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Taille feuilles	5 5	5 -	5 5	5 -	5 5	- 5	5 5	4 4	3 3	2 2	1 1	1 1
Taille lésions de rouille	2c 2b	1c -	1b 1b	1b -	0 1b 1c	- 3b	1c 1b	0 2a	1b 1b	0 0	0 0	0 0

Figure XIV: Méthodologie pour évaluer l'évolution en nombre, en taille des feuilles de caféiers par rameau et pour suivre l'évolution en surface par feuille de rouille orangée [Adaptée de (López-Bravo et al., 2012)]. Pour un même nœud, la taille de la feuille de gauche est inscrite à gauche et la taille de la feuille de droite à droite. Le « 5 » signifie : $5 \times 10 = 50 \text{ cm}^2$. Un « - » signale l'absence d'une feuille. Sous chaque feuille est indiqué le nombre de lésions par taille de lésions. Ex : 2b signifie que la feuille porte 2 lésions de taille « b », tel que : $a = 0.1 \text{ cm}^2$; $b = 0.25 \text{ cm}^2$; $c = 0.5 \text{ cm}^2$; $d = 1.5 \text{ cm}^2$; $e = 2.5 \text{ cm}^2$; $f = 5 \text{ cm}^2$; $g = 10 \text{ cm}^2$.

Sur les nœuds ou feuilles des branches marquées sont déterminées (1) la **présence-absence de feuilles** et leur **taille**, (2) la **présence-absence de rouille** et la **taille** de chaque lésion, (3) le **nombre de lésions** (Annexe 3).

Pour évaluer les tailles des lésions de rouille ainsi que des feuilles de caféier, sont utilisés des **patrons transparents** sur lesquels sont prédéfinies différentes tailles de surface connue. De par leur transparence, les patrons peuvent être mis face à l'élément à mesurer et permettre l'évaluation. (Figure XV).

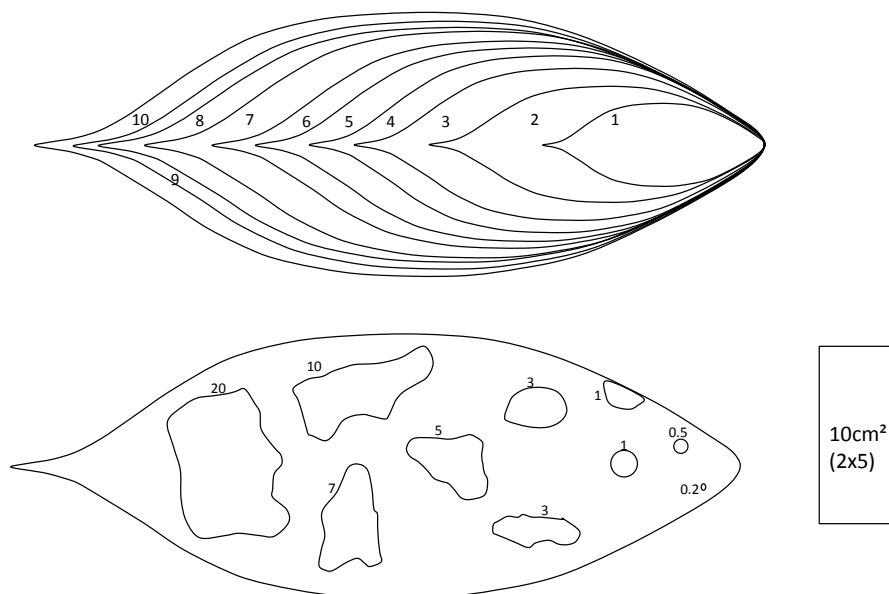


Figure XV: Patrons servant à mesurer la taille des feuilles de caféier (en haut) et à mesurer les lésions de rouille (en bas). La taille réelle correspond en haut à $i \times 10\text{cm}^2$ tel que $i \in \{1; \dots; 10\}$ et en bas à $a=0.1\text{cm}^2$; $b=0.25\text{cm}^2$; $c=0.5\text{cm}^2$; $d=1.5\text{cm}^2$; $e=2.5\text{cm}^2$; $f=5\text{cm}^2$; $g=10\text{cm}^2$.

La **colonisation** a été spécifiquement étudiée en suivant mois à mois l'accroissement de lésions individuelles photographiées au stade initial (léger jaunissement, taille) (Figure XVI). Puis par traitement d'image, à l'aide du logiciel *Image J*, la surface des lésions photographiées a été déterminée, jusqu'à ce qu'il y ait coalescence ou chute de la feuille.



Figure XVI: Photographie d'une lésion de rouille ayant été suivi au cours de son développement à chaque relevé mensuel (Garrido, 2015)

Afin de pouvoir tenir compte dans l'analyse de l'effet de la **charge fructière**, nous avons récupéré auprès du doctorant, les données de charge fructière. Il s'agit de données par caféier.

II- Variables analysées et méthodes d'analyse

1. CARACTERISATION DE L'OMBRAGE

Afin de pouvoir identifier des ressemblances et des différences entre les espèces d'ombrage, une analyse de la variance (ANOVA) a été respectivement réalisée sur la SLA et le ratio Périmètre²/Aire, selon :

$$SLA_x = \text{constante} + \text{espèce}_i + \text{erreur}$$

$$\frac{\text{Périmètre}^2}{\text{Aire}}_x = \text{constante} + \text{espèce}_i + \text{erreur}$$

Où espèce_i est l'effet de l'espèce d'arbre d'ombrage. Ensuite, une comparaison de moyennes de la SLA en fonction des espèces d'une part et du périmètre²/Aire en fonction des espèces d'autre part a été effectuée via le test de Tukey (*HSD.test*).

2. CARACTERISATION DU MICROCLIMAT

a. Effet de l'ombrage sur l'énergie cinétique des gouttes de pluie

Nous étudions l'énergie cinétique des gouttes de pluie, calculée à partir de la perte en sable des splashcups, selon les différentes espèces d'arbres d'ombrage. Pour déterminer s'il existe des différences d'énergie cinétique des gouttes de pluie selon les espèces d'ombrage, nous utilisons le modèle linéaire mixte (LMM) suivant :

$$KE = \text{constante} + \text{espèce}_i + \text{quantité_de_pluie}_j + \text{intensité_pluie}_k + \text{bloc}_l + \text{parcelle}_l + \text{erreur}$$

Où espèce_i est le premier effet fixe du type d'arbre d'ombrage $i \in \{\text{Caobilla, Cedros, Erythrine, etc.}\}$, $\text{quantité_de_pluie}_j$ est le second effet fixe tel $j=x$ mm de pluie, $\text{intensité_de_pluie}_k$ est le troisième effet fixe de l'intensité en mm.h^{-1} de pluie, le bloc_l un effet aléatoire du bloc dans lequel se trouve la parcelle_l étudiée. La procédure sur le logiciel R est de type `lme(variable ~ facteur_fixe1 + facteur_fixe2 + facteur_fixe3, random= ~1|facteur_aléatoire1/facteur_aléatoire2, data=fichier_de_donnees)`.

b. Effet de l'ombrage sur les températures du microclimat

Nous étudions les températures minimales, maximales et moyennes de l'air et des feuilles de caféiers séparément dans chaque type de système d'ombrage. La variable utilisée pour comparer les températures en fonction des systèmes d'ombrage est :

$$\Delta T_{Sx} = (\text{Température}_{Sx} - \text{Température}_{ref})$$

Où :

- S_x = Système d'ombrage étudié
- ref = température en plein soleil

Cette variable est ensuite étudiée à l'aide du modèle linéaire mixte (LMM) suivant :

$$\Delta T_{Sx} = \text{constante} + \text{ombrage}_i + \text{pourcentage_ombrage}_j + \text{bloc}_k + \text{date}_l + \text{erreur}$$

Où ombrage_i est le premier effet fixe du type d'ombrage $i \in \{\text{Plein Soleil, Erythrine, Diversifié}\}$, $\text{pourcentage_ombrage}_j$ est le second effet fixe $j \in \{0 \text{ à } 100\% \text{ d'ombrage}\}$, bloc_k est l'effet aléatoire du bloc auquel appartient la parcelle étudiée $k \in \{1,2,3\}$ et la date_l un effet aléatoire de la période à laquelle les mesures ont été effectuées. La procédure sur le logiciel R est de type `lme(variable ~ facteur_fixe1 + facteur_fixe2, random= ~1| facteur_aléatoire1/ facteur_aléatoire2, data=fichier_de_donnees)`.

c. Effet de l'ombrage sur les températures du microclimat selon la pluviométrie

Nous étudions graphiquement les températures de l'air d'une part, et des feuilles de caféier d'autre part, de chaque système d'ombrage, heure par heure au cours de la journée pour une pluviométrie $< 6\text{mm/jour}$; comprise entre 6 et 12mm/jour et supérieure à 20mm/jour . Puis nous réalisons une analyse de variance telle que :

$$\text{Température}_{xy} = \text{constante} + \text{ombrage}_i + \text{erreur}$$

Où température_{xy} correspond à la température de $x \in \{\text{air ; feuilles de caféier}\}$ dans des conditions de pluviométrie $y \in \{<6\text{mm/jour ; entre 6 et 12 mm/jour ; }>20\text{mm/jour}\}$ et où ombrage_i est l'effet du type d'ombrage $i \in \{\text{Plein Soleil, Erythrine, Diversifié}\}$.

Nous étudions également la température moyenne de chaque système d'ombrage pour les trois pluviométries retenues entre 11h et 13h. Ces heures sont les plus chaudes d'une journée. Les comparer permet d'évaluer la capacité du système à tamponner les températures élevées. Enfin, nous précisons à côté de chacune de ces moyennes l'erreur standard. L'erreur standard correspond à l'écart-type divisé par le nombre de répétitions.

L'absence d'étude des températures pour une pluviométrie comprise entre 12 et 20 mm est due à l'absence de journées avec une telle pluviométrie au cours de l'étude.

3. CROISSANCE DE LA ROUILLE ET DU CAFEIER

a. Degré d'infection des caféiers selon le système d'ombrage

i. Etude de l'incidence cumulée par rameau

L'incidence est une mesure du succès de l'infection et donc de la bonne réalisation des processus pré-infectieux qui dépendent de l'humidité, de l'intensité lumineuse et des températures. L'incidence a été calculée par rameau.

A la date 1, l'incidence cumulée est l'incidence observée :

$$Incidence_{i=1} = \frac{\text{Nombre de feuilles malades}}{\text{Nombre de feuilles totales}}$$

Pour les autres dates, l'incidence cumulée a été calculée comme suit :

Incidence cumulée en n

$$= \frac{\text{Nombre de feuilles malades}_{i=1} + \sum_{i=2}^n \text{nouvelles feuilles malades}_i}{\text{Nombre de feuilles}_{i=1} + \sum_{i=2}^n \text{nouvelles feuilles}_i}$$

Où :

- $n \in \{2, 5\}$

La variable finale étudiée est l'aire sous la courbe standardisée (sAUDPC) des incidences cumulées par rameau (indice 1).

$$sAUDPC_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left[\frac{I_{date_i} + I_{date_{i+1}}}{2} * (date_{i+1} - date_i) \right]}{\text{Nombre de jours totaux}}$$

Où :

- I_{date_i} = Incidence cumulée pour le relevé effectué en date
- Date i = est exprimé en jours

Cette variable est ensuite étudiée à l'aide du modèle linéaire mixte (LMM) suivant :

$$\sqrt{sAUDPC_1} = \text{constante} + \text{ombrage}_i + \text{bloc}_j + \text{charge_fruitière}_k + \text{erreur}$$

Où ombrage_i est l'effet fixe du type d'ombrage $i \in \{\text{Plein Soleil, Erythrine, Diversifié}\}$, bloc_j est l'effet aléatoire du bloc de parcelles $j \in \{1, 2, 3\}$ et $\text{charge_fruitière}_k$ est l'effet aléatoire de la charge fruitière de l'arbre sur laquelle se trouve le rameau étudié. La procédure sur le logiciel R est de type $\text{lmer}(\text{sqrt}(\text{variable}) \sim \text{facteur_fixe} + (1|\text{facteur_aléatoire1}) + (1|\text{facteur_aléatoire2}))$.

ii. Nombre de lésions de rouille par jeune feuille malade

Le nombre de lésions par feuille est une mesure similaire à l'incidence, mais à l'échelle de la feuille, La variable étudiée est le nombre de points d'impact de rouille par jeune feuille malade. Elle est analysée à l'aide du modèle linéaire mixte généralisé (GLMM) suivant :

Nombre de lésions de rouille

$$= \text{constante} + \text{ombrage}_i + \text{bloc}_j + \text{feuille}_k + \text{date}_l + \text{erreur}$$

Où ombrage_i est l'effet fixe du type d'ombrage $i \in \{\text{Plein Soleil, Erythrine, Diversifié}\}$, bloc_j est l'effet aléatoire du bloc de parcelles $j \in \{1, 2, 3\}$ et feuille_k est l'effet aléatoire de la feuille rouillée et date_l est l'effet aléatoire de la date de mesure de la $k^{\text{ième}}$ feuille. La procédure sur le logiciel R est de type `glmer(sqrt(variable) ~ facteur_fixe +(1|facteur_aléatoire1) + (1|facteur_aléatoire2) + (1|facteur_aléatoire3), family=negative.binomial(theta=1))`.

b. Degré de colonisation des caféiers selon le système d'ombrage

iii. Sévérité cumulée par rameau

La sévérité est une mesure de l'attaque de la rouille en termes de surface atteinte. C'est donc une mesure du succès de l'infection et de colonisation. La sévérité est liée donc à la bonne réalisation des processus pré-infectieux qui dépendent de l'humidité, de l'intensité lumineuse et des températures, mais aussi des conditions qui favorisent la colonisation, essentiellement les températures et la charge fruitière. La sévérité a été calculée par rameau.

A la date 1, la sévérité cumulée est la sévérité observée :

$$\text{Sévérité}_{i=1} = \frac{\text{Surface malade cumulée par rameau}}{\text{Surface totale des feuilles du rameau}}$$

Pour les autres dates, l'incidence cumulée a été calculée comme suit :

Sévérité cumulée en n

$$= \frac{\text{Surface malade présente par rameau}_{i=1} + \sum_{i=2}^n \text{Surface malade cumulée par rameau}_i}{\text{Surface présente par rameau}_{i=1} + \sum_{i=2}^n \text{Surface cumulée par rameau}_i}$$

Où :

- $n \in \{2, 5\}$

La variable finale étudiée est l'aire sous la courbe standardisée (sAUDPC) des sévérités cumulées par rameau (indice 2).

$$\sqrt{\text{sAUDPC}_2} = \text{constante} + \text{ombrage}_i + \text{bloc}_j + \text{charge_fruitière}_k + \text{pourcentage_d'ombrage}_l + \text{erreur}$$

Où $ombrage_i$ est l'effet fixe du type d'ombrage $i \in \{\text{Plein Soleil, Erythrine, Diversifié}\}$, $bloc_j$ est l'effet aléatoire du bloc de parcelles $j \in \{1, 2, 3\}$, $charge_fruitière_k$ est l'effet aléatoire de la charge fruitière de l'arbre sur laquelle se trouve le rameau étudié et $pourcentage_d'ombrage_i$ est l'effet aléatoire du pourcentage d'ombrage moyen du caféier étudié. La procédure sur le logiciel R est de type $glmer(\sqrt{variable}) \sim \text{facteur_fixe} + (1|\text{facteur_aléatoire1}) + (1|\text{facteur_aléatoire2}) + (1|\text{facteur_aléatoire3}), \text{family}=\text{negative.binomial}(\theta=1)$.

iv. Accroissement des lésions de rouille

L'étude de l'accroissement des lésions de rouille permet d'étudier spécifiquement la phase de colonisation. La variable étudiée est le taux d'accroissement par jour des lésions de rouille, telle que :

$$\text{Accroissement lésion} = \frac{\text{Taille lésion}_{n+1} - \text{Taille lésion}_n}{\text{Taille lésion}_n}$$

Le taux d'accroissement est étudié selon le modèle linéaire mixte généralisé (GLMM) suivant :

Accroissement lésion

$$= \text{constante} + \text{ombrage}_i + \text{bloc}_j + \text{date}_k + \text{feuille}_l + \text{erreur}$$

Où $ombrage_i$ est l'effet fixe du type d'ombrage $i \in \{\text{Plein Soleil, Erythrine, Diversifié}\}$, $bloc_j$ est l'effet aléatoire du bloc de parcelles $j \in \{1, 2, 3\}$, $date_k$ est l'effet aléatoire de la date à laquelle a été effectué le relevé et $feuille_l$ est l'effet aléatoire de la feuille étudiée. La procédure sur le logiciel R est de type $glmer(\sqrt{variable}) \sim \text{facteur_fixe} + (1|\text{facteur_aléatoire1}) + (1|\text{facteur_aléatoire2}) + (1|\text{facteur_aléatoire3}), \text{family}=\text{negative.binomial}(\theta=1)$.

c. Etude de la dynamique foliaire (croissance et défoliation)

v. Accroissement du nombre de feuilles par rameau

L'étude de la croissance foliaire (en nombre de feuilles) permet de mettre en évidence un éventuel effet de dilution de la maladie par l'incorporation rapide de feuilles saines au système. On parle d'effet dilution (Ferrandino, 2008).

Les variables étudiées sont les taux d'accroissement par jour du nombre de feuilles et de la surface foliaire par rameau. Le calcul et la méthode d'analyse ne sont donnés que pour le taux d'accroissement en nombre de feuilles.

Taux d' accroissement du nombre de feuilles

$$= \frac{\left(\frac{\text{Nombre cumulé de feuilles en F5} - \text{Nombre feuilles en F1}}{\text{Nombre de feuilles en F1}} \right)}{\text{Nombre de jours d'expérimentation}}$$

Le taux d'accroissement du nombre de feuilles est étudié selon le modèle linéaire mixte (LMM) suivant :

$$\text{Accroissement feuilles} = \text{constante} + \text{ombrage}_i + \text{bloc}_j + \text{date}_k + \text{erreur}$$

Où ombrage_i est l'effet fixe du type d'ombrage $i \in \{\text{Plein Soleil, Erythrine, Diversifié}\}$, bloc_j est l'effet aléatoire du bloc de parcelles $j \in \{1, 2, 3\}$ et feuille_k est l'effet aléatoire de la feuille rouillée et date_i est l'effet aléatoire de la date de mesure de la $k^{\text{ième}}$ feuille. La procédure sur le logiciel R est de type $\text{lmer}(\text{sqrt}(\text{variable}) \sim \text{facteur_fixe} + (1|\text{facteur_aléatoire1}) + (1|\text{facteur_aléatoire2}))$

vi. Défoliation des rameaux

L'étude de la chute des feuilles (en nombre de feuilles) permet d'apprécier l'impact de la rouille mais aussi de comprendre des différences de sévérité. Les feuilles fortement atteintes peuvent tomber prématurément et réduire la sévérité de ce fait. Il y a effet de dilution à nouveau mais par la sortie de feuilles malades du système.

La variable étudiée est la sAUDPC du taux cumulé de chutes de feuilles ou de surface foliaire perdue par rameau. A l'image de ce qui a été calculé pour l'incidence et la sévérité cumulées, on a à la date 1 :

$$\text{Défoliation}_{i=1} = \frac{0}{\text{Nombre de feuilles totales}}$$

Pour les autres dates, la défoliation cumulée a été calculée comme suit :

$$\text{Défoliation cumulée}_{i=n} = \frac{\sum_{i=2}^n \text{nouvelles feuilles tombées}_n}{(\text{Total des feuilles}_{i=n-1} + \text{nouvelles feuilles}_n)}$$

La variable finale étudiée est l'aire sous la courbe standardisée (sAUDPC) de la défoliation cumulée par rameau (indice 3).

$$\text{sAUDPC}_3 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left[\frac{D\text{date}_i + D\text{date}_{i+1}}{2} * (\text{date}_{i+1} - \text{date}_i) \right]}{\text{Nombre de jours totaux}}$$

La sAUDPC est étudiée selon le modèle linéaire mixte suivant :

$$\text{sAUDPC}_3 = \text{constante} + \text{ombrage}_i + \text{bloc}_j + \text{charge_fruitière}_k + \text{pourcentage_d'ombrage}_l + \text{erreur}$$

Où ombrage_i est l'effet fixe du type d'ombrage $i \in \{\text{Plein Soleil, Erythrine, Diversifié}\}$, bloc_j est l'effet aléatoire du bloc de parcelles $j \in \{1, 2, 3\}$, $\text{charge_fruitière}_k$ est l'effet aléatoire de la charge fruitière de l'arbre sur laquelle se trouve le rameau étudié et $\text{pourcentage_d'ombrage}_l$ est l'effet aléatoire du pourcentage d'ombrage moyen du caféier étudié. La procédure sur le logiciel R est de type $\text{lmer}(\text{sqrt}(\text{variable}) \sim \text{facteur_fixe} + (1|\text{facteur_aléatoire1}) + (1|\text{facteur_aléatoire2}) + (1|\text{facteur_aléatoire3}))$ pour l'études des jeunes feuilles et

glmer(sAUDPC ~ ombrage + (1|bloc) + (1|ChargeFruitiere) + (1|PourcentageOmbrage), family=negative.binomial(theta=1)) pour l'étude de toutes les feuilles.

4. CHARGE FRUITIERE DES CAFEIERS

Pour évaluer s'il existe une différence de charge fruitière selon le type d'ombrage nous utilisons une analyse de variance (ANOVA) tel que :

$$\text{Charge fruitière}_x = \text{constante} + \text{ombrage}_i + \text{erreur}$$

Où ombrage_i est l'effet du type d'ombrage. Ensuite, une comparaison de moyennes des charges fruitières en fonction des systèmes d'ombrage a été effectuée via le test de Tukey (*HSD.test*).

Pour résumer l'ensemble des analyses effectuées dans cette étude, un tableau synthétisant les variables, la manière dont elles ont été analysées et l'objectif de ces analyses a été construit (Tableau VI).

Tableau VI: Synthèse des variables étudiées, de la manière d'analyse employée et de l'objectif des analyses

Variable	Analyse	Explications
Caractérisation du système d'ombrage		
SLA (Specific Leaf Area)	ANOVA et comparaisons de moyennes	Comparer la souplesse des feuilles et leur capacité à retenir les gouttes d'eau
Périmètre ² /Aire	ANOVA et comparaisons de moyennes	Etudier le découpage des feuilles selon l'espèce d'ombrage d'appartenance et le relier à l'énergie cinétique des gouttes d'eau
KE	LMM : modèle linéaire mixte	Comparer l'énergie cinétique des gouttes de pluie selon l'espèce d'ombrage et le relier à la dispersion de la rouille
ΔT	LMM : modèle linéaire mixte	Etudier la capacité de l'ombrage à tamponner les températures extrêmes
Croissance de la rouille et du caféier		
sAUDPC ₁	LMM : modèle linéaire mixte	Etudier l'incidence cumulée de rouille en fonction des systèmes d'ombrage
Nombre de lésions de rouille	GLMM : modèle linéaire mixte généralisé	Etude du nombre de lésions de rouille par jeune feuille en fonction du système d'ombrage
sAUDPC ₂	GLMM : modèle linéaire mixte généralisé	Etude de la sévérité cumulée de rouille en fonction des systèmes d'ombrage
Accroissement lésion	GLMM : modèle linéaire mixte généralisé	Etude du taux d'accroissement des lésions en fonction des systèmes d'ombrage
Accroissement feuilles	LMM : modèle linéaire mixte	Etude du taux d'accroissement de nouvelles jeunes feuilles en fonction des systèmes d'ombrage
sAUDPC ₃	LMM : modèle linéaire mixte	Etude du taux cumulé de chute de feuilles en fonction du système d'ombrage
Charge fructifère	ANOVA et comparaisons de moyennes	Etudier la charge fructifère selon le système d'ombrage et le relier à l'abondance de rouille

RESULTATS

Pour l'ensemble des résultats présentés ici, provenant d'analyses de variance (ANOVA, LMM, GLMM), la validité des conditions d'usage a été vérifiée (normalité et homoscedasticité des résidus du modèle, indépendance des échantillons).

I- Caractérisation des systèmes d'ombrage

1. CARACTERISATION DES FEUILLES D'OMBRAGE

Tableau VII: Moyenne de SLA et de périmètre²/aire par espèce d'arbre d'ombrage et les groupes de moyennes significativement différents, annoté par les lettres suivantes a, b, bc et c en ordre décroissant des valeurs des moyennes.

Moyenne par espèce	SLA (m ² /kg)		Périmètre ² /Aire	
<i>Carapa guianensis</i>	6,10	c	43,74	a
<i>Cedrela odorata</i>	14,35	b	65,31	a
<i>Erythrina poeppigiana</i>	20.41	a	47,23	a
<i>Inga densiflora</i>	6.83	bc	36,74	a
<i>Inga edulis</i>	12.42	bc	40,44	a
<i>Cordia alliodora</i>	10.20	bc	52,05	a
<i>Citrus</i>	10.05	bc	40,68	a
<i>Bactris gasipaes</i>	10.88	bc	165.64	b

D'après l'analyse de variance, la SLA est significativement différente selon les arbres d'ombrage (P-value= 6.12e-07 ***). Les feuilles d'érythrine possèdent une SLA nettement supérieure aux feuilles des autres arbres d'ombrage. Les feuilles d'érythrine ont une faible masse par unité de surface. Elles sont plus souples que les autres feuilles (Tableau VII). Le périmètre²/aire est significativement supérieur pour le *Bactris gasipaes* par rapport aux autres feuilles d'arbres d'ombrage (p-value= <2e-16 ***) (Tableau VII). Sa forme allongée diffère grandement des feuilles des autres arbres d'ombrage (Figure XVII).

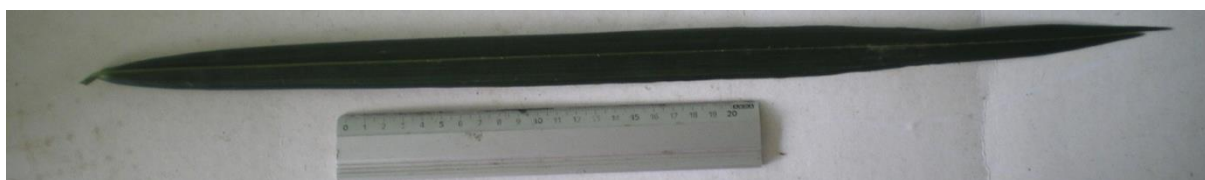


Figure XVII: Photographie d'une feuille de *Bactris gasipaes*



2. CARACTERISATION DU MICROCLIMAT

a. Effet des arbres d'ombrage sur l'énergie cinétique des gouttes de pluie

Les sorties du modèle linéaire mixte (LMM) montrent que les arbres d'ombrage impactent significativement l'énergie cinétique des gouttes de pluie ($p\text{-value} < 0.01$). *Cordia alliodora* génère une énergie cinétique significativement supérieure à toutes les autres espèces. A l'inverse, *Erythrina poeppigiana* et *Inga edulis* distribuent des gouttes de pluie d'énergie cinétique qui ne diffèrent pas significativement des gouttes issues du système « plein soleil » (Figure XVIII).

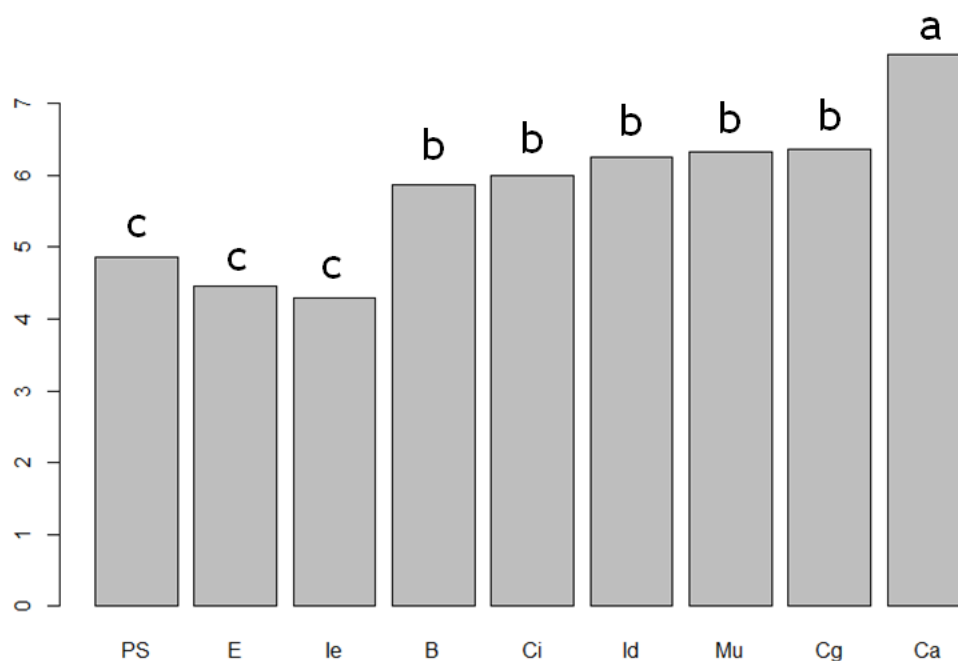


Figure XVIII: Logarithme de l'énergie cinétique en sortie du modèle linéaire mixte par espèce d'arbre d'ombrage où PS: Plein soleil ; E : *Erythrina poeppigiana* ; le : *Inga sp. Edulis* ; B : *Bactris gasipaes* ; Ci : *Citrus sp* ; Id : *Inga densiflora* ; Mu : *Musa sp* ; Cg : *Carapa guianensis* ; Ca : *Cordia alliodora*.

En particulier, nous pouvons noter que l'énergie cinétique des gouttes de pluie reste modérée sans ombrage et ce, même avec de fortes pluies. A l'inverse, sous *Cordia alliodora* l'énergie cinétique augmente rapidement avec l'augmentation de la quantité d'eau tombée (Figure XIX).

Par ailleurs, nous constatons sous ombrage une variation de l'énergie cinétique des gouttes de pluie pour une même quantité de pluie tombée. En « plein soleil », cette variabilité est très faible.

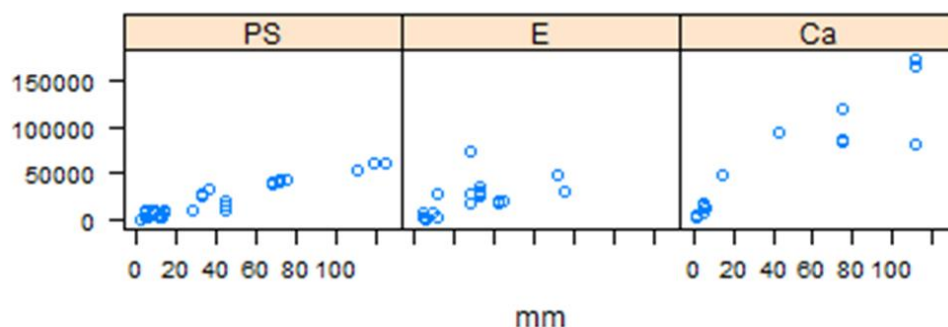


Figure XIX: Energie cinétique (J.m⁻²) des gouttes de pluie en fonction de la quantité d'eau tombée au cours d'une pluie, en condition PS : Plein Soleil, sous E : *Erythrina poeppigiana* et sous Ca : *Cordia alliodora*

b. Effet des arbres d'ombrage sur les températures du microclimat

Température de l'air

Les sorties du modèle linéaire mixte (LMM) montrent qu'en système « érythrine » et « diversifié » la différence de température à la température moyenne de l'air en plein soleil est très légèrement plus faible qu'en système « plein soleil ». L'air est donc en moyenne moins chaud sous ombrage (Figure XX).

Il n'y a pas de différence entre les systèmes étudiés par rapport au minimum de température de l'air. En revanche, le $\Delta T^{\circ}\text{C}$ pour les valeurs maximales est plus faible en système « diversifié » qu'en système « plein soleil » et encore plus faible en système « érythrine ». Il fait donc plus frais en système « diversifié » qu'en plein soleil et encore plus frais sous érythrine qu'en système « diversifié ».

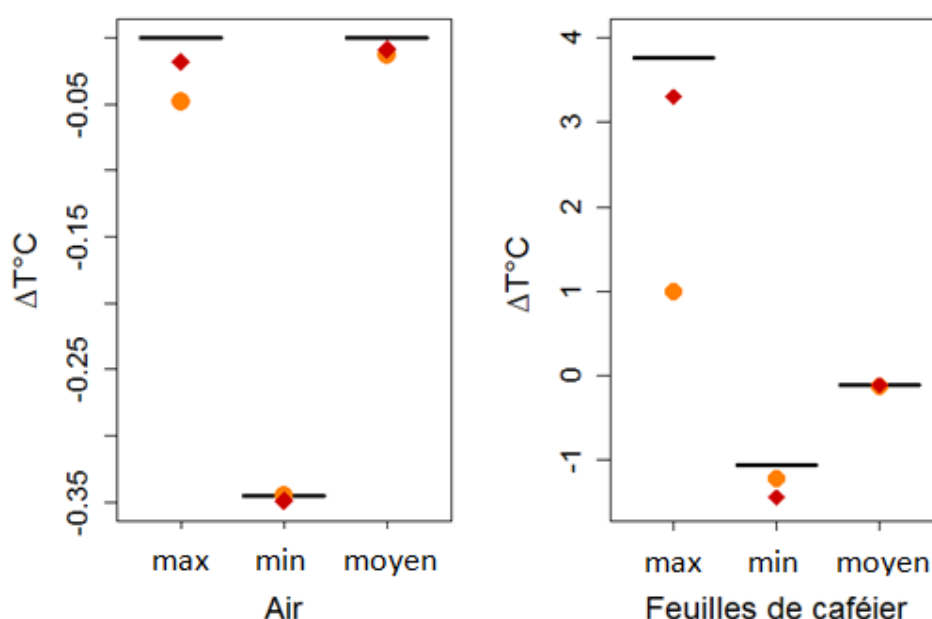


Figure XX: $\Delta T^{\circ}\text{C}$ (max, min et moyenne) en sortie du modèle linéaire mixte de l'air et des feuilles de caféier (trait noir : système « plein soleil »; rond orange : système « érythrine » ; carré rouge : système « diversifié »)

Température des feuilles de caféier

Le $\Delta T^{\circ}\text{C}$ des températures moyennes pour les trois systèmes est nul. L'ombrage n'impacte pas la température des feuilles en moyenne sur une journée (Figure XX).

De la même manière, la différence de températures minimales des systèmes d'ombrage à celles du plein soleil est légèrement inférieure. Il fait très légèrement moins chaud sous ombrage lorsque les températures extérieures sont au plus bas.

En revanche, les $\Delta T^{\circ}\text{C}$ des systèmes ombragés pour les températures maximales sont nettement inférieurs au système « plein soleil ». Cela signifie donc que les feuilles sont nettement plus fraîches sous système « diversifié » qu'en « plein soleil » et encore plus sous « érythrine ».

- c. Effet des arbres d'ombrage sur les températures du microclimat en fonction de la pluviométrie

Température de l'air

Les températures de l'air dans la parcelle semblent être les mêmes quelque soit le type d'ombrage pour une faible pluviométrie (<6mm/jour). Un pic de chaleur est tout de même observable à 12h en système « plein soleil ». Pendant la nuit, il fait plus froid en système « érythrine » (Figure XXI a).

Pour une pluviométrie un peu plus élevée (entre 6 et 12mm/jour, Figure XXI b), le système « érythrine » est toujours plus froid que les autres systèmes la nuit. D'autre part, nous notons une plus rapide augmentation des températures en système « diversifié » dès le levé du soleil à 5h que dans les autres systèmes. Aux heures les plus chaudes, il fait plus chaud d'un degré dans le système « diversifié ». Cependant cette température est inférieure aux températures atteintes à la même heure par les trois systèmes pour une pluviométrie faible. De la même manière, nous pouvons noter que la nuit les températures sont plus élevées de près d'un degré pour l'ensemble des systèmes. En cas de pluie modérée, les températures extrêmes sont légèrement réduites.

En cas de pluviométrie élevée (>20mm/jour, Figure XXI c), c'est en système « érythrine » qu'il fait le plus frais la nuit et toute la matinée. Aux heures les plus chaudes de la journée, le système « diversifié » a une température qui peut être de plus d'un degré plus élevée que dans les deux autres systèmes.

Pour résumer, **en cas de faible pluviométrie, seul le système « érythrine » se distingue par des températures nocturnes plus faibles de 0.5 degré. En cas de pluviométrie moyenne et faible, dans les systèmes « plein soleil » et « érythrine » s'observe une diminution des températures autour des heures chaudes de la journée (10h-15h) par rapport aux journées de faible pluviométrie. En système « diversifié » les températures restent sensiblement les mêmes quelque soit le niveau de pluviométrie.**

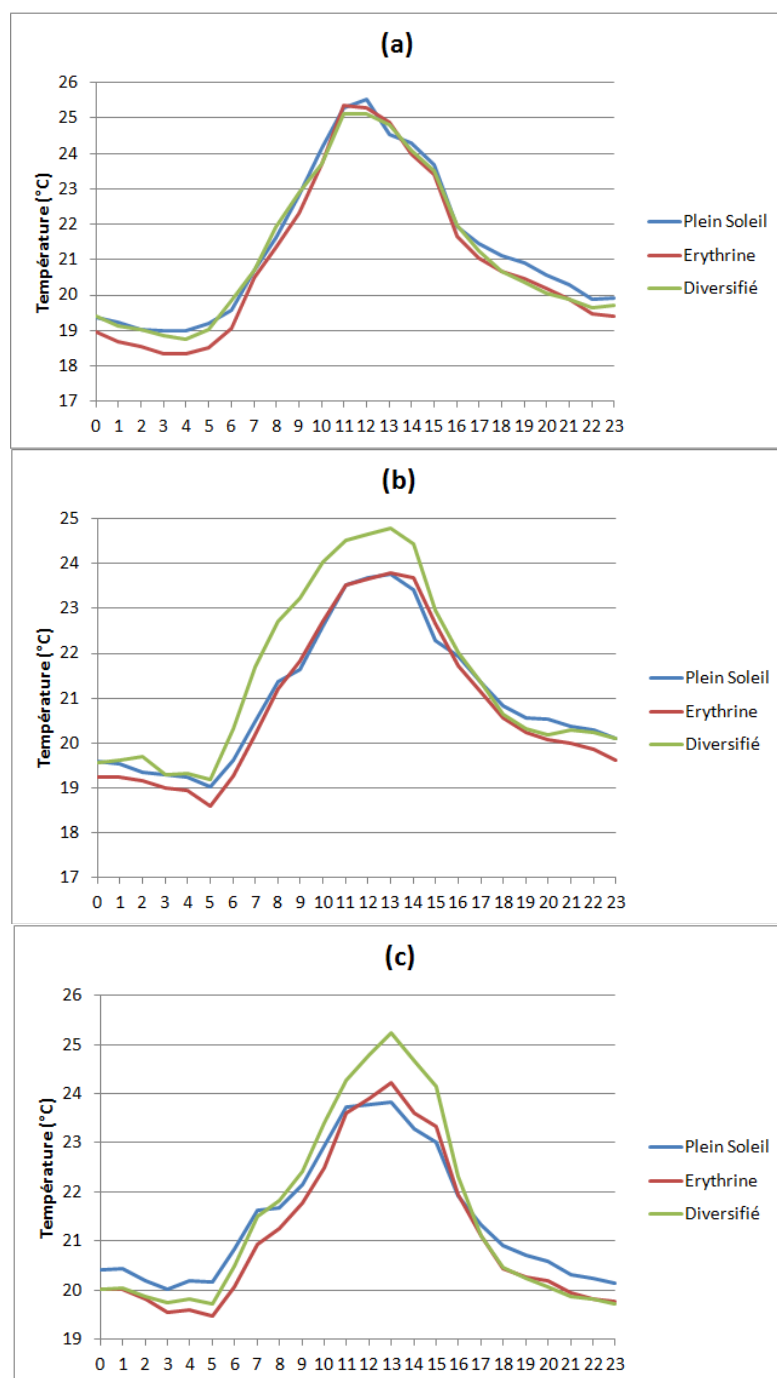


Figure XXI: Température de l'air dans les caféiers des 3 systèmes d'ombrage au cours d'une journée pour une pluviométrie (a) < 6mm/jour; (b) comprise entre 6 et 12mm/jour; (c) >20mm/jour.

Tableau VIII: Température moyenne de l'air aux heures les plus chaudes de la journée (11h-13h) selon 3 pluviométries (<6mm; entre 6 et 12 mm; <20mm) pour les trois systèmes d'ombrage étudiés (Plein Soleil; Erythrine; Diversifié).

Température de l'air °C (erreur standard)						
Pluie journalière (mm)	Plein Soleil		Erythrine		Diversifié	
<6 mm	25,125	(0,599)	25,178	(0,635)	25,025	(0,706)
6 < x > 12 mm	23,655	(0,762)	23,660	(0,574)	24,653	(0,807)
< 20 mm	23,783	(0,725)	23,912	(0,833)	24,764	(0,978)

Notons par ailleurs que c'est en système « diversifié » que la variabilité des données est la plus importante. C'est également en **système « diversifié »** que **l'écart à la température optimale d'infection pour *H. vastatrix* est le plus important pour une pluviométrie supérieure à 6mm/jour, bien que les différences ne soient pas significativement différentes** (Tableau VIII).

Température des feuilles de caféier

A faible pluviométrie (Figure XXII a), l'évolution des températures est assez semblable entre les systèmes étudiés. Notons tout de même qu'en système « érythrine » la température des feuilles est plus faible tout au long de la journée et de la nuit que les deux autres systèmes (sauf pendant 5h après le coucher du soleil à 18h). Aux heures les plus chaudes, le système « diversifié » est de 0.6 degré plus chaud que celui d'érythrines. D'autre part, nous constatons que pour une faible pluviométrie, la température des feuilles est plus élevée d'en moyenne un degré que celle de l'air. La différence de température entre l'air et les feuilles est la plus importante (deux degrés) en système « plein soleil ».

Pour une pluviométrie modérée (Figure XXII b), le système « érythrine » a de plus faibles températures que les autres systèmes. D'autre part, de la même manière que l'air, la température des feuilles en système « diversifié » augmente plus rapidement que les autres systèmes après le levé du soleil (5h) pour atteindre un plateau à 25.5 degré rejoint une heure après par le système « plein soleil ». Le plateau atteint par ces deux systèmes est supérieur de 1.5 degré au système « érythrine » aux heures chaudes.

Enfin en pluviométrie élevée (>20mm/jour, Figure XXII c), c'est en système « érythrine » que les températures sont les plus modérées, avec des températures nocturnes de 19.5 degré (1 degré supérieur à une pluviométrie modérée) et avec aux heures chaudes entre 23.5 et 24.1 degré. Tandis que pour les autres systèmes nous observons des températures nocturnes similaires sinon très légèrement supérieures (0.2 degré), une plus lente augmentation de la température après le levé du soleil, un pic atteint à 13h à 25.1°C et 25.8°C respectivement par le système « plein soleil » et « diversifié ».

Pour résumer, **les températures des feuilles évoluent dans le même sens que les températures de l'air, à la seule différence que les températures des feuilles aux heures chaudes sont plus élevées d'1 à 1.5 degré que l'air.** Quelque soit la pluviométrie, c'est le système « érythrine » qui aux heures les plus chaudes reste le plus proche des températures optimales d'infection de *Hemileia vastatrix* (Tableau IX).

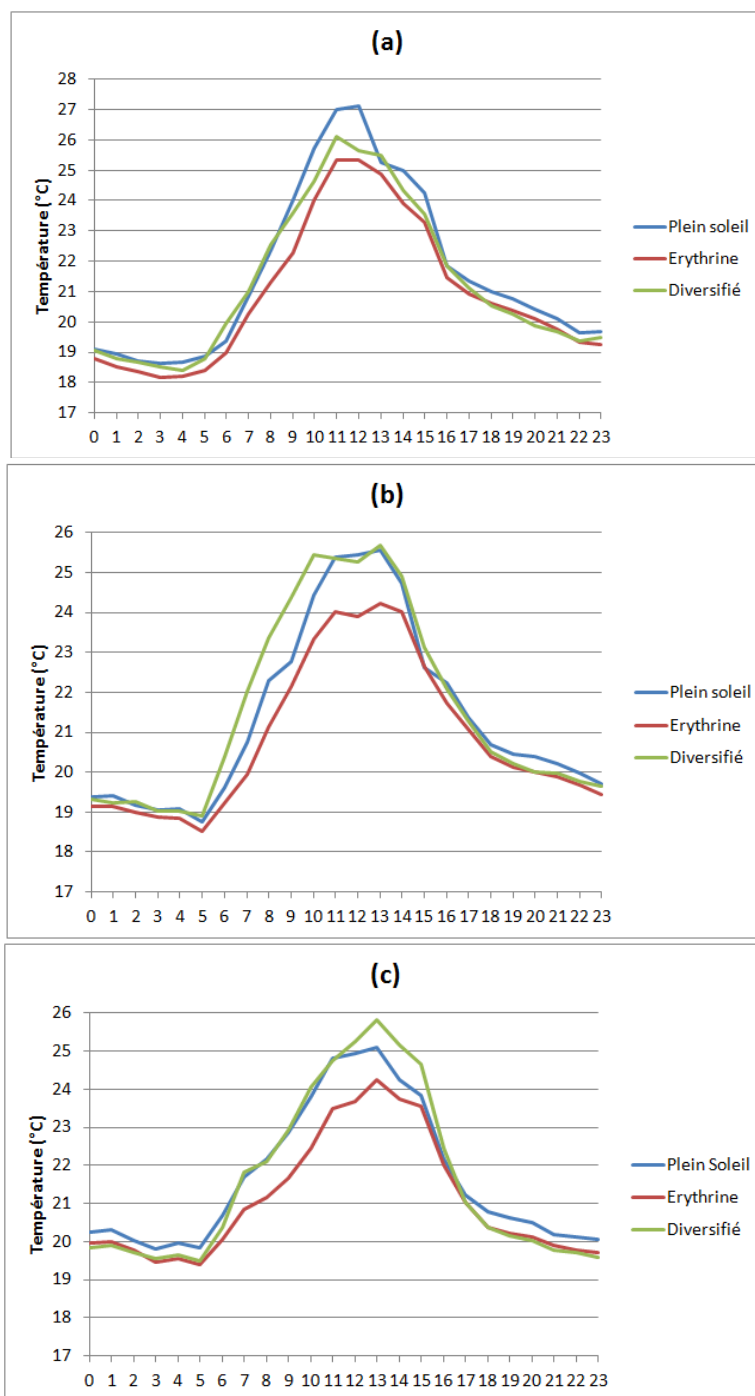


Figure XXII: Température des feuilles de caféiers des 3 systèmes d'ombrage au cours d'une journée pour une pluviométrie (a) < 6mm/jour; (b) comprise entre 6 et 12mm/jour; (c) >20mm/jour.

Tableau IX: Température moyenne des feuilles de caféiers aux heures les plus chaudes de la journée (11h-13h) selon 3 pluviométries (<6mm; entre 6 et 12 mm; <20mm) pour les trois systèmes d'ombrage étudiés (Plein Soleil; Erythrine; Diversifié).

Température des feuilles °C (erreur standard)						
Pluie journalière (mm)	Plein Soleil		Erythrine		Diversifié	
<6 mm	26,459	(0,648)	25,178	(0,733)	25,744	(1,014)
6 < x < 12 mm	25,463	(1,445)	24,042	(0,753)	25,431	(1,152)
< 20 mm	24,954	(1,051)	23,798	(0,765)	25,273	(1,166)

II- Progression de la rouille sous ombrage

1. DEGRE D'INFECTION DES CAFEIERS SELON LE SYSTEME D'OMBRAGE

a. Etude de l'incidence

Etude des jeunes feuilles

L'analyse de variance des données du modèle (LMM), montre **que l'incidence de rouille sur les jeunes feuilles n'est pas significativement différente selon les trois types d'ombrage étudiés** (P-value = 0.095).

Etude des vieilles et jeunes feuilles

L'analyse de variance des données du modèle (LMM), montre que l'incidence de rouille sur la totalité des feuilles est différente pour au moins un des systèmes étudié (P-value = 0.0332*). **L'étude des comparaisons des moyennes des résultats du modèle linéaire mixte, montre que l'incidence est plus importante en système « érythrine » (0,432) qu'en « plein soleil » (0.346) et en « diversifié » (0.270). De plus, l'incidence de la rouille est significativement supérieure à celle en système « diversifié ».**

b. Nombre de lésions de rouille par jeune feuille malade

Etude des jeunes feuilles

L'analyse de variance des données du modèle linéaire mixte généralisé (GLMM), montre qu'au moins un des types d'ombrage a en moyenne un nombre de lésions par jeune feuille différent des deux autres types d'ombrage (P-value = 0.0004747 ***).

D'après la comparaison des moyennes des résultats du modèle linéaire mixte, **le nombre de points d'impact est significativement inférieur en système d'ombrage sous érythrine (1.791) qu'en plein soleil (2.029), et encore moindre en système diversifié (1.677) qu'en système avec érythrine.**

2. DEGRE DE COLONISATION DES CAFEIERS SELON LE SYSTEME D'OMBRAGE

a. Sévérité

Etude des jeunes feuilles

L'analyse de variance des données du modèle linéaire mixte généralisé (GLMM), montre qu'il n'y a pas de différence significative de sévérité entre les trois systèmes d'ombrage (P-value= 0.8867).

Etude des jeunes et vieilles feuilles

L'analyse de variance des données du modèle (GLMM), montre qu'il n'y a pas de différence significative de sévérité des jeunes et vieilles feuilles entre les trois systèmes d'ombrage (P-value= 0.8722).

b. Accroissement des lésions de rouille

L'analyse de variance des données du modèle (GLMM), montre qu'il n'y a pas de différence de taux d'accroissement des lésions de rouille selon le système d'ombrage (P-value = 0.6066).

3. ETUDE DE LA DYNAMIQUE FOLIAIRE (CROISSANCE ET DEFOLIATION)

a. Accroissement du nombre de feuilles par rameau

L'analyse de variance des données du modèle (LMM), montre qu'au moins un des types d'ombrage a en moyenne un accroissement du nombre de feuilles différent des deux autres types d'ombrage (P-value = 2.174 e-08 ***).

La comparaison de moyennes du modèle linéaire mixte montre que le **système d'ombrage diversifié a significativement plus de nouvelles feuilles (1.180) que les deux autres systèmes et érythrine et que le système avec érythrine (0.746) en a moins que le système en plein soleil (0.869).**

b. Défoliation des rameaux

Etude des jeunes feuilles

L'analyse de variance des données du modèle (GLMM), montre qu'il n'y a **pas de différence de chutes des jeunes feuilles selon les trois systèmes d'ombrage** (P-value = 0.5044).

Etude des vieilles et jeunes feuilles

L'analyse de variance des données du modèle, montre qu'il y a une différence de chutes des jeunes et vieilles feuilles selon les trois systèmes d'ombrage si l'on prend un risque de 6.5% (P-value = 0.0651). **Les feuilles chutent davantage en système plein soleil (0.663) que dans le système diversifié (0.304) et davantage encore que dans le système érythrine (0.005), duquel il est significativement différent.**

4. CHARGE FRUITIERE

D'après l'analyse de variance (ANOVA), la charge fruitière est différente selon les systèmes d'ombrage (P-value= 0.00797 **). Avec une moyenne de 979 fruits par caféier, le système « érythrine » est le système d'ombrage avec la charge fruitière la plus importante. A l'inverse, le système « diversifié », avec en moyenne 16 fruits par caféier est le système

dont la charge fruitière est la plus faible. La charge fruitière de ces deux systèmes est significativement différente. Enfin, le système « plein soleil » n'est significativement différent d'aucun système avec en moyenne 523 fruits par caféier.

Pour résumer les résultats ci-dessus présentés sur l'évolution de la rouille orangée dans les caféiers au cours de l'étude, voici un tableau de synthèse (Tableau X) :

Tableau X: Synthèse des analyses par variable, relatives à la progression de la rouille, selon les systèmes d'ombrage. Dans Types de feuilles J: Jeunes et J+V: Jeunes et vieilles. Dans Absence de différences, X: il n'y a pas de différence entre les systèmes d'ombrage. Lorsqu'il y a des différences, elles sont notées par « - » ; « + » ; « ++ » ; « ++ » désignant le système le plus impacté par la variable étudiée. A la droite de cette notation se trouve le coefficient de sortie du modèle. La présence d'astérisque sur au moins deux de ces valeurs, indique qu'elles sont significativement différentes entre elles.

	Incidence		Lésions/feuille malade		Sévérité		Accroissement lésion rouille	Croissance foliaire		Défoliation	
Type de feuilles	J	J+V	J		J	J+V	J	J		J	J+V
Abs. différence	X				X	X	X			X	
Syst. Plein Soleil		+ 0.346*	++	2.029*				+	0.869		++ 0.663*
Syst. Erythrine		++ 0.432	+	1.791*				-	0.746		-- 0.005*
Syst. Diversifié		- 0.270*	-	1.677*				++	1.180		- 0.304

DISCUSSION

I- Originalité et limites de l'étude

1. PLUS-VALUE DE L'ETUDE

La nouveauté de cette étude est de s'intéresser non seulement à l'effet de l'ombrage sur la rouille, comme cela a déjà été fait par le passé, mais aussi à l'effet plus spécifique des espèces d'ombrage présentes dans les systèmes d'ombrage couramment utilisés dans la culture du café. Contrairement à ce qui a déjà été fait, nous ne nous intéressons pas à l'ombrage en général mais à différents systèmes d'ombrage.

De plus, c'est aussi la première fois qu'une étude aussi poussée du microclimat dans des plantations de caféiers est réalisée. Jamais auparavant la température de l'air extérieur à la parcelle et de l'air au niveau des caféiers, des feuilles de caféiers et du sol (à 20cm de profondeur) n'avaient été mesurées simultanément dans différents systèmes d'ombrage. Notons que la mesure de la température du sol n'a pas été évoquée dans ce manuscrit car elle ne permettait pas d'expliquer l'évolution de la rouille. L'étude de l'impact des températures en fonction de la pluviométrie sur les différents systèmes d'ombrage est également nouvelle et ne trouve pas de comparaison dans la littérature.

La mesure de l'énergie cinétique des gouttes d'eau grâce à des splashcups est une toute nouvelle méthode (Scholten et al., 2011) que nous avons testée pour la première fois en système agroforestier. Cet outil novateur pourrait permettre d'identifier si l'énergie cinétique des gouttes d'eau de pluie, interceptées par les arbres d'ombrage, intervient dans la dispersion de la rouille, si oui, pour quel niveau d'énergie cinétique. Cet outil permettrait également de réaliser une évaluation par espèce et ainsi d'identifier quelles espèces limitent ou favorisent la dispersion de la rouille.

2. DOMAINE DE VALIDITE DE L'EXPERIMENTATION

L'expérimentation a été réalisée sur neuf parcelles d'agriculteurs. Bien que l'étude du microclimat et de l'évolution de la rouille sur neuf parcelles représente un travail conséquent, d'un point de vue représentativité, avoir seulement trois parcelles par système d'ombrage reste insuffisant compte tenu de la variabilité à l'intérieur de chaque système. En effet, la densité d'ombrage au sein d'un même système d'ombrage s'est avérée différente d'une parcelle à une autre. L'érythrine est un arbre d'ombrage qui peut être taillé ou non. Parmi les trois parcelles en système « érythrine », une parcelle avait des érythrines fortement taillées, dont les feuilles ont repoussé au cours de l'expérimentation. Les deux autres parcelles avaient des érythrines moins fortement taillées. Dans le cas du système d'ombrage « diversifié » c'est davantage la répartition des arbres d'ombrage qui a posé problème. En effet, les arbres d'ombrage, peu nombreux, étaient inégalement répartis dans la parcelle laissant plusieurs caféiers en plein soleil. De fait, certains caféiers étudiés étaient dans des conditions de plein soleil ou de très faible ombrage. Il est également important de noter que

spécifiquement dans les parcelles « diversifiées » les caféiers étaient plus espacés les uns des autres, et avaient un aspect rachitique et avec très peu de feuilles. Ainsi, ces faibles densités d'ombrage, de caféiers et de feuillage peuvent expliquer l'effet moindre de l'ombrage sur les températures que l'on aurait supposé plus élevé *à priori*.

D'autre part, la récolte des données de rouille a été perturbée par la coupe d'un ou plusieurs rameaux et/ou pieds de caféiers sur cinq parcelles. Cela a notamment posé problème pour le suivi d'évolution du nombre de points d'infection, de la taille des lésions de rouille et de la surface rouillée au fil des mois.

Bien que pratique et non destructrice, l'utilisation de patrons pour l'évaluation des surfaces foliaires et surfaces malades peut cependant manquer de précision, puisqu'elle demande à l'observateur de choisir une classe de taille pour l'objet étudié. Un nouveau système d'évaluation des lésions sur feuille a vu le jour récemment (Pethybridge & Nelson, 2015). Il s'agit d'une application, Leaf Doctor, qui permet de prendre la feuille tachée en photo et qui mesure la surface des lésions. Cependant cet outil n'a pas été choisi car il requière l'utilisation d'un appareil Apple (téléphone, tablette) et la photo doit être prise sur un fond noir ou à l'ombre sur le terrain ce qui n'est pas souvent possible.

II- Analyse critique des résultats et conclusion pratiques

1. MODIFICATION DE L'ENERGIE CINETIQUE DES GOUTTES DE PLUIE PAR LES ARBRES D'OMBAGE

Une feuille de SLA élevée est une feuille légère et souple. Sous le poids d'une goutte d'eau elle aura plus vite tendance à se plier. A l'inverse une feuille de SLA faible est une feuille plus rigide. Cela implique que les gouttes de pluie auront davantage tendance à s'accumuler avant de tomber avec une énergie cinétique plus élevée. D'après l'hypothèse que l'augmentation de l'énergie cinétique des gouttes peut favoriser la dispersion de la rouille, une espèce d'arbre d'ombrage de SLA élevée serait préférable pour limiter la dispersion de la rouille. Suivant nos résultats, l'érythrine se démarque positivement comme étant l'espèce de plus forte SLA et donc plus souple.

Par ailleurs, pour une même surface donnée, une feuille présentant un contour très découpé accumulera moins de gouttes d'eau qu'une feuille au contour arrondi. Ainsi une feuille ayant un ratio périmètre²/aire faible peut représenter un atout pour éviter l'accumulation de gouttes d'eau sur la feuille. Parmi les espèces étudiées aucune espèce ne se détache positivement. En revanche, *Bactris gasipaes* serait à contre-indiquer pour la construction d'un système d'ombrage visant à lutter contre la rouille. Cela peut s'expliquer par la forme très allongée et sans sinuosité des feuilles de *Bactris gasipaes*.

À l'exception d'*Erythrina poeppigiana* et de *Inga edulis*, toutes les espèces modifient à la hausse l'énergie cinétique des gouttes qui tombent directement du ciel. Avec, la plus forte énergie cinétique, la *Cordia alliodora* est l'espèce la plus défavorable dans la lutte contre la rouille. *Erythrina poeppigiana* et *Inga edulis* seraient les espèces à favoriser dans un système d'ombrage visant à lutter contre la rouille car elles diminuent l'énergie

cinétique des gouttes d'eau. Or, il est intéressant de noter que *Erythrina poeppigiana* est l'espèce d'ombrage actuellement la plus présente dans les plantations de cafésiers.

2. ETUDE DES TEMPERATURES AU SEIN DE LA PARCELLE SELON LE SYSTEME D'OMBRAGE

Dans une perspective d'augmentation des températures dans les années à venir, l'autre caractéristique importante attendue des arbres d'ombrage est leur capacité à tamponner les températures extrêmes. En effet, comme précédemment expliqué, une augmentation des températures nuirait à la quantité et à la qualité des grains de café et favoriserait le développement de la rouille. En système « érythrine » et « diversifié » les températures moyennes et minimales sont très légèrement diminuées par rapport au système « plein soleil ». L'ombrage en revanche permet une diminution un peu plus sensible des températures maximales en système « diversifié » et encore plus en système « érythrine » par rapport au système « plein soleil ». Le système « érythrine » semble être le plus performant pour diminuer la température de l'air et en particulier atténuer les hautes températures.

Le constat est le même au niveau des feuilles. L'effet des systèmes d'ombrage est encore plus accentué pour les températures maximales. De loin, le système « érythrine » est celui qui semble le mieux éviter une augmentation de température des feuilles de caféier.

L'ombrage bien que peu ou pas performant pour contenir les basses températures, permet de diminuer à l'intérieur de la parcelle, les fortes températures de l'air mais surtout des feuilles de caféier, comme attendu (Barradas & Fanjul, 1986; Jaramillo-Robledo & Gómez-Gómez, 1989; Siles, Harmand, & Vaast, 2010). Ce qui est nouveau c'est que l'on a mis en évidence que les différents systèmes d'ombrage impactent différemment les températures. **Le système érythrine est le plus efficace pour tamponner les fortes chaleurs.**

3. IMPACT DE L'OMBRAGE SUR L'ABONDANCE DE ROUILLE

a. Effet du système d'ombrage sur les processus pré-infectieux (germination-pénétration) de la rouille

L'incidence de la rouille ne présente des différences selon l'ombrage que lorsque sont incluses les vieilles feuilles à l'étude. De fait, il existe bien des différences d'incidence de rouille non significatives selon l'ombrage pour les feuilles de l'année 2015, mais celles-ci ne se sont pas encore exprimées totalement. Cela confirme que ce sont les feuilles de l'année passée qui sont essentiellement à l'origine de l'épidémie (Jacques Avelino & Rivas, 2013) La dernière collecte de données ayant eu lieu en juillet et le pic de rouille ayant lieu en septembre, ces résultats semblent cohérents.

Une différence significative du nombre de lésions de rouille selon l'ombrage est notable uniquement pour les jeunes feuilles. De la même manière que pour l'incidence, c'est en système « diversifié » que le nombre de lésions de rouille est le plus faible. L'absence de

différences entre les systèmes d'ombrage en présence de vieilles feuilles suggère l'apparition de coalescences entre les lésions de rouille à un stade plus avancé.

La capacité des caféiers à produire de nouvelles feuilles selon les différents systèmes d'ombrage tend à être inverse aux résultats d'incidence de rouille. Par conséquent, nous pouvons supposer un effet de dilution de la proportion de feuilles rouillées par la présence de nouvelles feuilles saines (Ferrandino, 2008), particulièrement pour le cas du système « diversifié ». Ce résultat est surprenant puisque d'autres études ont montré que le système « plein soleil » est celui qui a la plus grande capacité à produire de nouvelles feuilles (Cannell, 1985; López-Bravo et al., 2012).

Ainsi et d'après les précédents résultats, **le système « érythrine » serait plus sujet aux infections de rouille, devant le système « plein soleil » puis le système « diversifié ».**

En outre, nous observons des différences de défoliation selon l'ombrage uniquement lorsque les vieilles feuilles sont étudiées avec les jeunes, la chute des feuilles étant favorisée en cas de grande superficie rouillée. Dans le cas présent, la défoliation touche en premier lieu le système « plein soleil », puis le système « diversifié » et enfin le système « érythrine ». Ici, outre la rouille, le système d'ombrage peut aussi faire partie des facteurs explicatifs. En effet, de par leur forte exposition au soleil, les feuilles du système « plein soleil » ont une espérance de vie réduite (F. M. DaMatta, 2004). A l'inverse, les caféiers du système « érythrine », bénéficient notamment de l'apport d'azote généré par l'érythrine ce qui, nous pouvons le supposer, aide le caféier à maintenir ses feuilles en place.

Les différences d'incidence entre les systèmes d'ombrage peuvent également être expliquées par les températures. En effet, comme l'expliquent Nutman *et al.* (1963) et Waller (1982), plus la température s'éloigne de la température optimale de germination (22°C), plus la capacité de pré-infection diminue. Aux heures les plus chaudes de la journée, nous avons observé que le système « plein soleil » et surtout le système « diversifié » présentaient des températures nettement supérieures à 22°C. Cela peut en partie expliquer pourquoi **dans ces systèmes et en particulier dans le système « diversifié » la pré-infection de rouille est moindre.**

D'autre part, l'humidité est une variable qui joue fortement sur l'ensemble du processus pré-infectieux, de la germination à la pénétration. C'est dans des systèmes denses et feuillus que l'humidité est la plus présente (Souza, Scalco, Stella, & Santos, 2011). Il est possible que l'humidité ait été plus élevée dans les systèmes « plein soleil » et « érythrine », favorisant de fait le processus pré-infectieux de la maladie. En effet, dans ces deux systèmes les caféiers présentaient une plus grande proximité entre caféiers et en particulier en « plein soleil » il y avait une plus forte densité foliaire (9,3 feuilles/branche contre 8,4 pour les deux autres systèmes). A l'inverse, en système « diversifié », les caféiers étaient soumis à une rude compétition avec les arbres d'ombrage et étaient fortement taillés, ce qui leur donnait un aspect rachitique et défolié. Il serait intéressant de confirmer ces observations par des mesures d'humidité dans une prochaine étude.

Enfin, nous avons émis l'hypothèse que les arbres augmentant l'énergie cinétique des gouttes de pluie auraient tendance à augmenter l'incidence de la rouille. Or il se trouve que c'est dans le système « diversifié », où se trouvent ces arbres, que l'incidence est la plus faible, rejetant ainsi l'hypothèse.

b. Effet du système d'ombrage sur le processus de colonisation de la rouille

Quelques soit le système d'ombrage, ni la sévérité ni l'accroissement des lésions de rouille ne présentent des différences significatives. Cela laisse supposer, qu'au regard des variables étudiées, les trois types d'ombrage de l'expérimentation n'impactent pas la colonisation de la rouille. Cela aurait pu être dû à la précocité de l'étude dans l'année par rapport au cycle de la rouille. Cependant, la sévérité de la rouille a également été étudiée en prenant en compte les feuilles de l'année passée, sans que cela ne révèle de différence.

Bien qu'une étude ait montré que l'incidence et la sévérité sont positivement corrélées (Silva-Acuña, Maffia, Zambolim, & Berger, 1994), ce n'est pas toujours vérifié. **Nous pouvons supposer que l'ombrage favorise le processus de pré-infection mais peu le processus de colonisation** (López-Bravo et al., 2012). D'après ce même auteur, la colonisation de la rouille est favorisée par la charge fruitière. Or comme nous l'avons vu, les charges fruitières des trois systèmes d'ombrage sont très différentes sans que pour autant cela ne différencie les systèmes d'ombrage en termes de colonisation. Nous ne pouvons pas confirmer les résultats de López-Bravo et al. (2012). Pour expliquer ce phénomène voici l'hypothèse majeure que nous pouvons formuler : **Dans les systèmes subissant une forte incidence, soit ceux d'érythrine et de plein soleil, les feuilles malades chutent rapidement après infection. Ces feuilles fortement infectées étant tombées rapidement, il n'est pas possible d'observer une augmentation de surface des lésions. A l'inverse en système diversifié, où le nombre de points d'impact de rouille est plus faible, les lésions de rouille ont plus de probabilités de continuer de coloniser la feuille.**

De fait, nous montrons sur la période d'étude (sortie de saison sèche jusque milieu de la saison des pluies) que les différents systèmes d'ombrage jouent un rôle sur les processus pré-infectieux mais, d'après les variables étudiées, n'ont pas d'effet sur le processus de colonisation de la rouille.

4. CONCEPTION D'UN SYSTEME AGROFORESTIER LUTTANT CONTRE LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET LUTTANT CONTRE LA ROUILLE

En somme, l'étude du microclimat (température) a permis de mettre en évidence que le système « érythrine » est le meilleur des trois systèmes pour tamponner les températures tout au long de la journée et en particulier aux heures les plus chaudes. Cela fait du système « érythrine » un bon candidat pour lutter contre le réchauffement climatique.

L'étude de l'énergie cinétique des gouttes de pluie a mis en avant l'érythrine et le poix doux (*Inge edulis*) comme ayant une capacité à ne pas augmenter leur énergie cinétique. De fait, ces espèces pourraient être avantageuses si elles permettaient, selon notre hypothèse transversale d'éviter d'augmenter la dispersion de la rouille. Or cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée.

L'étude de l'abondance de la rouille a permis de comprendre l'importance des températures au cours du processus de pré-infection. **Il a été montré que sous ombrage les températures avoisinent souvent les températures optimales de développement de la rouille** (López-Bravo et al., 2012). Or, plus l'ombrage maintient une température proche de 22°C plus il permettra la germination et ainsi permettra la poursuite du cycle de vie.

D'après sa faible capacité à tamponner les températures, le système « diversifié » est celui qui permet de limiter le développement de la rouille.

Ces éléments mettent en lumière que le système « érythrine » est le meilleur des systèmes étudiés pour lutter contre le réchauffement climatique. En revanche, il constitue également le système le moins performant en termes de lutte contre la rouille. Le système « diversifié », probablement grâce à ses fortes températures et à une humidité que nous supposons moindre pour les raisons évoquées précédemment, représente parmi les systèmes étudiés celui qui serait le plus apte à lutter « naturellement » contre la rouille orangée du caféier.

III- Suite de l'étude

Les résultats que nous avons obtenus sont provisoires puisque l'étude a été réalisée tôt dans la période de développement de la rouille et que la colonisation devrait se poursuivre jusqu'à la prochaine saison sèche. De fait, un autre stagiaire va poursuivre les relevés d'incidence et de sévérité ainsi que d'accroissement des lésions de rouille. Afin de vérifier notre hypothèse que l'humidité explique la différence de germination et de colonisation dans les systèmes d'ombrage, il serait approprié de mesurer l'humidité au niveau des caféiers. La présence d'eau libre est également essentielle pour la germination de l'urédospore jusqu'à la pénétration (Kushalappa, Akutsu, & Ludwig, 1983; Nutman et al., 1963; Rayner, 1961a). Il serait donc également intéressant de mesurer la mouillure des feuilles.

De plus, nous avons vu que ce n'est pas l'ombrage en général qui a des effets sur le caféier et ses bioagresseurs mais un système d'ombrage en particulier. De fait, il me semblerait intéressant de poursuivre la comparaison de différents systèmes d'ombrage en ajoutant d'autres systèmes. En particulier sur cette thématique, il m'a semblé regrettable de ne pas avoir eu les mêmes espèces d'ombrage dans chacune des parcelles « diversifiées ». Consciente qu'il ne serait pas possible de remplir ces conditions sur le réseau de parcelles de producteurs sur lequel nous avons travaillé, je suggère de réaliser une étude parallèle à la poursuite de ces travaux en parcelles expérimentales. Cela permettrait d'évaluer la valeur ajoutée de chacune des espèces communément utilisées par les agriculteurs.

CONCLUSION

La présente étude s'est intéressée à l'impact de l'ombrage sur la rouille orangée du caféier au travers de l'étude simultanée du microclimat. Elle a permis pour la première fois de comparer plusieurs systèmes d'ombrage et d'évaluer leur performance vis-à-vis du changement climatique et de la régulation de la rouille.

Les expérimentations ont été menées sur trois lots de parcelles d'agriculteurs, contenant chacun une parcelle en système « plein soleil », une en système « érythrine » et une en système « diversifié ».

L'étude du processus pré-infectieux de la rouille a montré que le système « érythrine » présentait la plus grande incidence. Cela peut essentiellement s'expliquer par des températures mieux tamponnées dans ce système, ce qui engendre un maintien des températures autour de la température optimale de germination d'*Hemileia vastatrix*. L'énergie cinétique des gouttes de pluie ne semble pas être mise en cause puisque l'érythrine est l'une des seules espèces à ne pas augmenter l'énergie cinétique des gouttes de pluie interceptée par ses feuilles. La charge fruitière, plus importante dans ce même système joue peut-être un rôle dans le processus pré-infectieux bien qu'elle ait été jusqu'ici identifiée comme favorisant la colonisation de la rouille.

L'étude de la colonisation de la rouille n'a pas mis en évidence de différence selon les systèmes d'ombrage. L'annulation des différences observées dans l'étape précédente du cycle de la maladie peut s'expliquer par un effet de dilution de la maladie. D'une part, les feuilles les plus fortement touchées par la maladie chutent rapidement et d'autre part, dans ces mêmes systèmes, et en particulier en système « érythrine », l'accroissement du nombre de nouvelles feuilles est élevé.

En termes de régulation de la maladie, c'est le système « diversifié » qui est ressorti comme étant le plus efficace, surtout pour limiter le processus de pré-infection. Bien que dans ce système l'énergie cinétique des gouttes interceptées par ses arbres d'ombrage soit supérieure, cela ne semble pas augmenter l'abondance de la rouille. Toutefois, cette efficacité de régulation semble s'expliquer par de fortes températures et ce, en particulier aux heures les plus chaudes de la journée. Le système ne semble pas efficace pour tamponner les températures.

De fait, l'étude montre qu'il n'existe pas de système idéal pour à la fois tamponner les températures et réguler la rouille orangée du caféier. Afin de répondre aux enjeux de demain, il faudrait trouver une situation de trade-off. L'une des pistes envisageables pour atteindre ce compromis est de tester ces mêmes systèmes en faisant varier la densité des caféiers, la densité des arbres d'ombrage et leur disposition dans la parcelle. Ces variables impacteront le microclimat (température, humidité, disponibilité en eau libre) et il sera alors peut-être possible de proposer un système permettant d'atteindre un équilibre économiquement satisfaisant pour l'agriculteur et suffisamment résistant et résilient face aux événements climatiques extrêmes.

BIBLIOGRAPHIE

- Ahenkorah, Y., Akrofi, G., & Adri, A. (1974). The end of the first cacao shade and manurial experiment at the Cacao Research Institute of Ghana. *J Hort Sci*, 49, 182–203.
- Alègre, G. (1959). Climats et caféiers d'Arabie. *L'Agronomie Tropicale*, 14.
- Altieri, M. a. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74(1-3), 19–31. [http://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00028-6](http://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00028-6)
- Ambassade de France. Ambassade de la France au Costa Rica (2014).
- Anderson, P. K., Cunningham, A. A., Patel, N. G., Morales, F. J., Epstein, P. R., & Daszak, P. (2004). Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(10), 535–544.
- Andow, D. A. (1991). Vegetational diversity and arthropod population response. *Annual Review of Entomology*, 36, 561–586.
- Avelino, J. (1999). *Contribution a la gestion du pathosystème Hemileia vastatrix et Coffea arabica au Honduras—Influence des principaux facteurs physiques, phytotechniques et biologiques*. Université de Paris XI, Orsay, France.
- Avelino, J., Muller, R. A., Cilas, C., & Velasco Pascual, H. (1991). Development and behavior of coffee orange rust (*Hemileia vastatrix* Berk. and Br.) in plantations undergoing modernization planted with dwarf varieties in South-East Mexico. *Café Cacao Thé*, 35(1), 21–37.
- Avelino, J., & Rivas, G. (2013). La roya anaranjada del cafeto. *Archives Ouvertes*, hal-010710.
- Avelino, J., ten Hoopen, G. M., & DeClerck, F. (2011). Ecological mechanisms for pest and disease control in coffee and cacao agroecosystems of the Neotropics. *Ecosystem Services from Agriculture and Agroforestry Measurement and Payment*. Routledge., (APRIL), 91 – 117.
- Avelino, J., Willocquet, L., & Savary, S. (2004). Effects of crop management patterns on coffee rust epidemics. *Plant Pathology*, 53(5), 541–547. <http://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2004.01067.x>
- Avelino, J., Zelaya, H., Merlo, a., Pineda, a., Ordoñez, M., & Savary, S. (2006). The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. *Ecological Modelling*, 197(3-4), 431–447. <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.03.013>
- Avelino, J., Toledo, J.C., y Medina, B. (1995). Evaluación de épocas y número de aplicaciones de óxido de cobre para el control de la roya anaranjada del cafeto (*Hemileia vastatrix*) en una finca del suroeste de Guatemala. In *XVI Simposio sobre caficultura latinoamericana, IICAPROMECAFE: Managua, Nicaragua*.

- Barradas, V. L., & Fanjul, L. (1986). Microclimatic characterization of shaded and opengrown coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38, 101–112.
- Becker, S., & Kranz, J. (1977). Comparative studies on the dispersal of *Hemileia vastatrix* in Kenya. *Zeitschrift Fuer Pflanzenkrankheiten Und Pflanzenschutz*, 84(9), 526–539.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., & Somarriba, E. (1998). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*, 38, 139–164. <http://doi.org/10.1023/A:1005956528316>
- Bergot, M., Cloppet, E., Perarnaud, V., Deque, M., Marcais, B., & Desprez-Loustau, M. L. (2004). Simulation of potential range expansion of oak disease caused by *Phytophthora cinnamomi* under climate change. *Global Change Biology*, 10(9), 1539–1552.
- Bermudez, M. (1980). *Erosión hídrica y escorrentía superficial en el sistema de café (Coffea arabica L.) poro (Erythrina poeppigiana (Walper) O.F. Cook) en Turrialba, Costa Rica*. CATIE-UCR, Turrialba, Costa Rica.
- Bianchi, F. J. J. a, Booij, C. J. H., & Tscharrntke, T. (2006). Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings. Biological Sciences / The Royal Society*, 273(1595), 1715–1727. <http://doi.org/10.1098/rspb.2006.3530>
- Bock, K. R. (1962a). Dispersal of uredospores of *Hemileia vastatrix* under field conditions. *Transactions of the British Mycological Society*, 45(1), 63–74.
- Bock, K. R. (1962b). Seasonal periodicity of coffee leaf rust and factors affecting the severity of outbreaks in Kenya colony. *Transactions of the British Mycological Society*, 45, 289–300.
- Boudrot, A., Pico, J., Merle, I., Granados, E., Philippe, T., Vilchez, S., ... Avelino, J. (2015). Effects of shade in interaction with meteorological variables on the dry dispersal of *Hemileia vastatrix*, causal agent of coffee rust. *Phytopathology*.
- Bowden, J., Gregory, P. H., & Johnson, C. G. (1971). Possible wind transport of coffee leaf rust across the Atlantic ocean. *Nature*, 229(500-501).
- Boyce, J. K., Fernández Gonzalez, A., Fürst, E., & Segura Bonilla, O. (1994). *Café y Desarrollo Sostenible: Del Cultivo Agroquímico a la Producción Orgánica en Costa Rica*. EFUNA, Heredia, Costa Rica.
- Cannell, M. G. R. (1975). Crop physiological aspects of coffee bean yield: a review. *J Coffee Res*, 5, 7–20.
- Cannell, M. G. R. (1985). Physiology of the coffee crop. In Clifford, M.N., Wilson, K. (Eds.), *Coffee: Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage*. Croom Helm, London.
- Carrion, G., & Rico-Gray, V. (2002). Mycoparasites on the coffee rust in Mexico. *Fungal Diversity*, 11, 49–60.

Castillo, Z. J., & Lopez, A. R. (1966). Nota sobre el efecto de la intensidad de la luz en la floración del café. *Cenicafé*, 17, 51–60.

Chakraborty, S. (2005). Potential impact of climate change on plant – pathogen interactions Presented as a Keynote Address at the 15 th Biennial Conference of the Australasian Plant Pathology Society . *Australasian Plant Pathology*, 443–448.

Chakraborty, S., Tiedemann, a V., & Teng, P. S. (2000). Climate change: potential impact on plant diseases. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 108(3), 317–326. [http://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00210-9](http://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00210-9)

Cheatham, M. R., Rouse, M. N., Esker, P. D., Ignacio, S., Pradel, W., Raymundo, R., ... Garrett, K. a. (2009). Beyond yield: plant disease in the context of ecosystem services. *Phytopathology*, 99(11), 1228–1236. <http://doi.org/10.1094/PHYTO-99-11-1228>

CIRAD. Histoire du CIRAD (2010).

CIRAD. Axes prioritaires de recherche (2014).

CIRAD. Le CIRAD dans le monde (2014).

CIRAD. Le CIRAD en Amérique Latine (2014).

CIRAD. Partenaires du CIRAD (2014).

Coakley, S. M., Scherm, H., & Charkraborty, S. (1999). Climate change and plant disease management. *Annual Review of Phytopathology*, 37, 399–426.

Coffee Research Institute. (2006). Arabica and Robusta Coffee Plant. Retrieved June 25, 2015, from <http://www.coffeeresearch.org/agriculture/coffeeplant.htm>

Conservation International. (2014). Programme CASCADE. Retrieved from <http://www.conservation.org/projects/Pages/cascade-program.aspx>

Cressey, D. (2013). Coffee rust regains foothold Researchers marshal technology in bid to thwart fungal outbreak in Central America . *Nature*, 493(7434), 587.

DaMatta, F. (2007). Ecophysiology of tropical tree crops: an introduction. *Bulletin of Entomological Research*, 90, 453–465.

DaMatta, F. M. (2004). Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: A review. *Field Crops Research*, 86(2-3), 99–114. <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.09.001>

Densimètre. (2014). Densimètre sphérique convexe. Retrieved from <https://www.pinterest.com/pin/271904896226011833/>

Eccardi, F., & Sandalj, V. (2002). Coffee: A celebration of diversity. *Trading Company*.

Eskes, A. B. (1982a). The effect of light intensity on incomplete resistance of coffee to *Hemileia vastatrix*. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 88(5), 191–202.

- Esques, A. B. (1982b). The use of leaf disk inoculations in assessing resistance to coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*). *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 88(4), 127–141.
- 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, 492–503. <http://doi.org/10.1094/phyto-98-5-0492>
- Garnier, E., & Shipley, B. (2001). A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content. *Functional Ecology*, 15(5), 688–695. <http://doi.org/10.1046/j.0269-8463.2001.00563.x>
- Gulke, N. E. (2011). The nexus of host and pathogen phenology: Understanding the disease triangle with climate change. *New Phytologist*, 189(1), 8–11. <http://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03568.x>
- Guide, P. S. (1996). *Fragstat Help* (Vol. 4.2). [http://doi.org/10.1016/S0022-3913\(12\)00047-9](http://doi.org/10.1016/S0022-3913(12)00047-9)
- Haggar, J., Barrios, M., Bolaños, M., Merlo, M., Moraga, P., Munguia, R., ... de Virginio, E. M. F. (2011). Coffee agroecosystem performance under full sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America. *Agroforestry Systems*, 82(3), 285–301. <http://doi.org/10.1007/s10457-011-9392-5>
- ICAFFE. (1989). Manual de Recomendaciones para el Cultivo del Café. In 6th Ed. *Programa Cooperativo Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE) – Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)*. San José, Costa Rica.
- INRA. (2015). Parasite. Retrieved June 29, 2015, from <http://www7.inra.fr/hyp3/pgloss/3---630.htm>
- Institut Météorologique National. Clima en Costa Rica, Valle Central (2009).
- Jaramillo-Robledo, A., & Gómez-Gómez, L. (1989). Microclima en plantaciones a libre exposición solar y bajo sombrío. *Cenicafé*, 15, 65–79.
- Kumar, D., & Tieszen, L. (1982). Photosynthesis in *Coffea arabica* L. I. Effects of light and temperature. *Exp Agric*, 16, 13–19.
- Kushalappa, A. C. (1989). Biology and epidemiology, in: Coffee rust: epidemiology, resistance and management. A.C. Kushalappa Y A.B. Esques, Editores, CRC Press: Florida, 16–80.
- Kushalappa, A. C., Akutsu, M., & Ludwig, A. (1983). Application of Survival Ratio for Monocyclic Process of *Hemileia vastatrix* in Predicting Coffee Rust Infection Rates. *Phytopathology*, 73(16), 96–103.
- Kushalappa, A. C., Akutsu, M., Oseguera, S. H., Chaves, G. M., Melles, C. A., Miranda, J. M., & Bartolo, G. F. (1984). Equations for predicting the rate of coffee rust development based on net survival ratio for macrocyclic process of *Hemileia vastatrix*. *Fitopatologia Brasileira*, 9, 255–271.
- Kushalappa, A. C., & Chaves, G. . (1980). Calculation of apparent infection rate in plant diseases: Development of a method to correct for host growth. *Phytopathology*, 10, 1373–1377.

- Kushalappa, A. C., & Eskes, A. B. (1989). Advances in coffee rust research. *Annual Review of Phytopathology*, 27, 503–531.
- Lamouroux, N., Pellegrin, F., Nandris, D., & Kohler, F. (1995). The *Coffea arabica* Fungal Pathosystem in New Caledonia: Interactions at Two Different Spatial Scales. *Phytopathology*, 143, 403–413.
- Lemmon, P. E. (1957). A new instrument for measuring forest overstory density. *Journal of Forestry*, 55, 667–668.
- Leon, R. (1990). *Determinación de la hidroerosión laminar, utilizando varillas metálicas asociadas a parcelas de escorrentía, La Suiza, Cuenca del Río Tuis, Costa Rica*. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- López-Bravo, D. F., Virginio-Filho, E. D. M., & Avelino, J. (2012). Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions. *Crop Protection*, 38, 21–29. <http://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.03.011>
- Malezieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., ... Valantin-Morison, M. (2009). Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 49–62.
- Mayne, W. W. (1930). Seasonal periodicity of coffee leaf disease (*Hemileia vastatrix* B. & Br.). *Bulletin*, 4: Mysore, 16.
- McCain, J. W., & Hennen, J. F. (1984). Development of the uredinal thallus and sorus in the orange coffee rust fungus, *Hemileia vastatrix*. *Phytopathology*, 74(6), 114–121.
- Mccook, S. (2009). La Roya del Café en Costa Rica: Epidemias, Innovación y Medio ambiente, 1950-1995, (59), 99–117. <http://doi.org/1012-9790>
- Montoya, L. A., Sylvain, P. G., & Umaña, R. (1961). Effect of light intensity and nitrogen fertilization upon growth differentiation balance in *Coffea arabica* L. *Coffee*, 3, 97–104.
- Mouen Bedimo, J. A., Dufour, B. P., Cilas, C., & Avelino, J. (2012). Effets des arbres d'ombrage sur les bioagresseurs de *Coffea Arabica*. *Cahiers Agricultures*, 21(2-3), 89–97. <http://doi.org/10.1684/agr.2012.0550>
- Muller, R. a, Berry, D., Avelino, J., & Bieysse, D. (2014). Coffee Diseases. *Hagedorn*.
- Muschler, R. (1995). Efectos de diferentes niveles de sombra de *Erythrina poeppigiana* sobre *Coffea arabica* vars. Caturra y Catimor. In *II. Semana Científica del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)* (pp. 158–160). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Muthappa, B. N. (1980). Behaviour of *Hemileia vastatrix* during unfavourable weather. *Journal of Coffee Research*, 10(2), 31–35.
- Nutman, F. J. (1937a). Studies on the physiology of *Coffea arabica*. I. Photosynthesis of coffee leaves under natural conditions. *Ann Bot*, 1, 353–367.

- Nutman, F. J. (1937b). Studies on the physiology of *Coffea arabica*. II. Stomatal movements in relation to photosynthesis under natural conditions. *Ann Bot*, 1, 681–693.
- Nutman, F. J., Roberts, F. M., & Bock, K. R. (1960). Methods of uredospore dispersal of the coffee leaf rust fungus, *Hemileia vastatrix*. *Transactions of the British Mycological Society*, 43(3), 509–515.
- Nutman, F. J., Roberts, F. M., & Clarke, R. T. (1963). Studies on the biology of *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. *Transactions of the British Mycological Society*, 46(1), 27–44. [http://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80005-4](http://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80005-4)
- Olasantan, F., Ezumah, H., & EO, L. (1996). Effects of intercropping with maize on the microenvironment, growth and yield of cassava. *Microenvironment, Growth and Yield of Cassava. Agriculture Ecosystems and Environment*, 57, 149–158.
- Ong, C., Subrahmanyam, P., & Khan, A. (1991). The microclimate and productivity of a groundnut millet intercrop during the rainy season. *Agricultural and Forest Meteorology*, 56, 49–66.
- Osorio Rivillas, C. A., Serna Giraldo, C. A., Cristancho Ardila, M. A., & Gaitan Bustamante, A. L. (2011). La roya del cafeto en Colombia - Impacto, manejo y costos del control. *Chinchiná, Caldas, Colombia: CENICAFE*, 51.
- Perfecto, I., Rice, R., Greenberg, R., & van der Moort, M. (1996). Shade coffee: a disappearing refuge for biodiversity. *BioScience*, 46, 598–608.
- Pethybridge, S. J., & Nelson, S. C. (2015). Leaf Doctor: A New Portable Application for Quantifying Plant Disease Severity, 1–30.
- Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J., & Habib, R. (2012). *Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: A review. Agronomy for Sustainable Development* (Vol. 32). <http://doi.org/10.1007/s13593-011-0022-4>
- Rayner, R. W. (1961a). Germination and penetration studies on coffee rust (*Hemileia vastatrix* B. & Br.). *Annals of Applied Biology*, 49(3), 497–505.
- Rayner, R. W. (1961b). Spore liberation and dispersal of coffee rust *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. *Nature*, 191(4789), 725.
- Rayner, R. W. (1972). Micología, historia y biología de la roya del cafeto. *IICA*.
- Salgado, B. G., Macedo, R. L. G., Carvalho, V. L. d., Salgado, M., & Venturin, N. (2007). Progress of rust and coffee plant cercosporiose mixed with grevillea, with ingazeiro and in the full sunshine in Lavras - MG. *Ciencia E Agrotecnologia*, 31(4), 1067–1074.
- Scholten, T., Geißler, C., Goc, J., Kühn, P., & Wiegand, C. (2011). A new splash cup to measure the kinetic energy of rainfall. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174(4), 596–601. <http://doi.org/10.1002/jpln.201000349>
- Schroth, G., Krauss, U., Gasparotto, L., & Duarte, J. a. (2000). Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics, 199–241.

- Siles, P., Harmand, J. M., & 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), 269–286. <http://doi.org/10.1007/s10457-009-9241-y>
- Silva-Acuña, R., Maffia, L. A., Zambolim, L., & Berger, R. . (1994). Incidence-Severity Relationships in the Pathosystem *Coffea arabica* – *Hemileia vastatrix*. *Plant Disease*, 83(2), 186–188.
- Soto-Pinto, L., Perfecto, I., & Caballero-Nieto, J. (2002). Shade over coffee: Its effects on berry borer, leaf rust and spontaneous herbs in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*, 55(1), 37–45. <http://doi.org/10.1023/A:1020266709570>
- Souza, B. R. T. L. P., Scalco, P. E. de, Stella, M., & Santos, L. A. (2011). Progress of rust in coffee plants in various densities of cultivation in irrigated planting after pruning. *Ciênc. Agrotec.*, 35(1), 137–143.
- Staver, C., Guharay, F., Monterroso, D., & Muschler, R. G. (2001). Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: Shade-grown coffee in central america. *Agroforestry Systems*, 53(2), 151–170. <http://doi.org/10.1023/A:1013372403359>
- Sylvain, P. G. (1955). Some observations on *Coffea Arabica* L. in Ethiopia. *Turrialba*, 5(1-2), 37–53.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. a, Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671–677. <http://doi.org/10.1038/nature01014>
- Toledo, V. M., & Moguel, P. (2012). Coffee and Sustainability: The Multiple Values of Traditional Shaded Coffee. *Journal of Sustainable Agriculture*, 36(3), 353–377. <http://doi.org/10.1080/10440046.2011.583719>
- Vandermeer, J., Perfecto, I., & Liere, H. (2009). Evidence for hyperparasitism of coffee rust (*Hemileia vastatrix*) by the entomogenous fungus, *Lecanicillium lecanii*, through a complex ecological web. *Plant Pathology*, 58(4), 636–641.
- Vandermeer, J., Perfecto, I., & Philpott, S. (2010). Ecological Complexity and Pest Control in Organic Coffee Production: Uncovering an Autonomous Ecosystem Service. *BioScience*, 60(7), 527–537. <http://doi.org/10.1525/bio.2010.60.7.8>
- Vandermeer, J., Jackson, D., and Perfecto, I. (2014). Qualitative dynamics of the coffee rust epidemic: educating intuition with theoretical ecology. *BioScience*, 64, 210–218.
- Villarreyna, R. (2014). Análisis de las condiciones de manejo que propiciaron el impacto de la roya (*Hemileia vastatrix*) en la zona cafetalera de los municipios de Jinotega, el Tuma-La Dalia y San Ramon, Nicaragua, Agrícolas Sostenibles, Catie, Turrialba, Costa Rica.
- Waller, J. M. (1972). Coffe rust in Latin America. *PANS*, 18(4), 402–408.
- Waller, J. M. (1982). Coffee rust epidemiology and control, 1, 385–404.

- Wiersum, K. (1984). Surface erosion under various tropical agroforestry systems. *O'Loughlin CL and Pearce AJ (eds) Symposium on Effects of Forest Land Use on Erosion Control and Slope Stability*, 231–239.
- Zadoks, J. C., & Schein, R. D. (1979). *Epidemiology and plant disease management*. New-York: Oxford University Press, 427 p.

FIGURES

FIGURE I : PARTENARIATS ET LIEUX D' ACTIONS DU CIRAD A TRAVERS LE MONDE (CIRAD, 2014B, 2014D).....	3
FIGURE II: PHOTOGRAPHIE DE CINQ JEUNES UREDOSPORES D'H. VASTATRIX (LESIONS ORANGEES) (GARRIDO, 2015)	7
FIGURE III: PHOTOGRAPHIE DE LESIONS COALESCENTES ET NECROSEES D'H. VASTATRIX (GARRIDO, 2015)	8
FIGURE IV: DIAGRAMME DES FLUX REPRESENTANT LE CYCLE DE VIE DE HEMILEIA VASTATRIX (LIGNES CONTINUES) ET LES FACTEURS QUI L' AFFECTENT (LIGNES DISCONTINUES) (AVELINO & RIVAS 2013).....	10
FIGURE V: PHOTOGRAPHIE DE LECANICILLIUM LECANII PARASITANT DES UREDOSPORES DE ROUILLE ORANGEE DU CAFE (DE COULEUR BLANCHE) (GARRIDO, 2015).....	13
FIGURE VI: LES PRINCIPAUX AMENAGEMENTS AGROFORESTIERS (STRUCTURE DE LA VEGETATION, COMPOSITION) EN CAFEICULTURE (TOLEDO & MOGUEL, 2012).	15
FIGURE VII: VOIES D' ACTION DE L' OMBRAGE SUR 3 SERVICES ECOSYSTEMIQUES : LA QUALITE DU SOL, LA REGULATION DES BIOAGRESSEURS ; LA PRODUCTION	18
FIGURE VIII: POSITIONNEMENT GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D' ETUDE, TURRIALBA	22
FIGURE IX: CARTOGRAPHIE DES PARCELLES ETUDIEES (BLOC 1 EN ROUGE, BLOC 2 EN BLEU ET BLOC 3 EN JAUNE)	23
FIGURE X: PLAN THEORIQUE DE LA SELECTION DES CAFEIERS DE CHAQUE PARCELLE.....	25
FIGURE XI: DENSIMETRE SPHERIQUE CONVEXE (DENSIMETRE, 2014)	26
FIGURE XII: DISPOSITIF DE MISE EN PLACE DES CAPTEURS DE TEMPERATURE DANS LES PARCELLES UTILES	29
FIGURE XIII: LES PRINCIPAUX COMPOSANTS DU SPLASHCUP (SCHOLTEN ET AL., 2011)	31
FIGURE XIV: METHODOLOGIE POUR EVALUER L' EVOLUTION EN NOMBRE, EN TAILLE DES FEUILLES DE CAFEIERS PAR RAMEAU ET POUR SUIVRE L' EVOLUTION EN SURFACE PAR FEUILLE DE ROUILLE ORANGEE [ADAPTEE DE (LOPEZ-BRAVO ET AL., 2012)]. POUR UN MEME NŒUD, LA TAILLE DE LA FEUILLE DE GAUCHE EST INSCRITE A GAUCHE ET LA TAILLE DE LA FEUILLE DE DROITE A DROITE. LE « 5 » SIGNIFIE : $5 \times 10 = 50 \text{ cm}^2$. UN « - » SIGNALE L' ABSENCE D' UNE FEUILLE. SOUS CHAQUE FEUILLE EST INDIQUE LE NOMBRE DE LESIONS PAR TAILLE DE LESIONS. EX : 2B SIGNIFIE QUE LA FEUILLE PORTE 2 LESIONS DE TAILLE « B », TEL QUE : $A = 0.1 \text{ cm}^2$; $B = 0.25 \text{ cm}^2$, $C = 0.5 \text{ cm}^2$; $D = 1.5 \text{ cm}^2$; $E = 2.5 \text{ cm}^2$; $F = 5 \text{ cm}^2$; $G = 10 \text{ cm}^2$	33
FIGURE XV: PATRONS SERVANT A MESURER LA TAILLE DES FEUILLES DE CAFEIER (EN HAUT) ET A MESURER LES LESIONS DE ROUILLE (EN BAS). LA TAILLE REELLE CORRESPOND EN HAUT A I	

x10CM ² TEL QUE $I \in \{1 ; \dots ; 10\}$ ET EN BAS A $A=0.1\text{CM}^2$; $B=0.25\text{CM}^2$, $C=0.5\text{CM}^2$; $D=1.5\text{CM}^2$; $E=2.5\text{CM}^2$; $F=5\text{CM}^2$; $G=10\text{CM}^2$	34
FIGURE XVI: PHOTOGRAPHIE D'UNE LESION DE ROUILLE AYANT ETE SUIVI AU COURS DE SON DEVELOPPEMENT A CHAQUE RELEVÉ MENSUEL (GARRIDO, 2015).....	34
FIGURE XVII: PHOTOGRAPHIE D'UNE FEUILLE DE BACTRIS GASIPAES	43
FIGURE XVIII: LOGARITHME DE L'ENERGIE CINETIQUE EN SORTIE DU MODELE LINEAIRE MIXTE PAR ESPECE D'ARBRE D'OMBRAGE OU PS: PLEIN SOLEIL ; E : ERYTHRINA POEPPIGIANA ; IE : INGA SP. EDULIS; B : BACTRIS GASIPAES ; CI : CITRUS SP ;ID : INGA DENSIFLORA ;MU : MUSA SP ; CG : CARAPA GUIANENSIS ; CA : CORDIA ALLIODORA.	44
FIGURE XIX: ENERGIE CINETIQUE(J.M-2) DES GOUTTES DE PLUIE EN FONCTION DE LA QUANTITE D'EAU TOMBEE AU COURS D'UNE PLUIE, EN CONDITION PS : PLEIN SOLEIL, SOUS E : ERYTHRINA POEPPIGIANA ET SOUS CA : CORDIA ALLIODORA	45
FIGURE XX: $\Delta T^{\circ}\text{C}$ (MAX, MIN ET MOYENNE) EN SORTIE DU MODELE LINEAIRE MIXTE DE L'AIR ET DES FEUILLES DE CAFEIER (TRAIT NOIR : SYSTEME « PLEIN SOLEIL »; ROND ORANGE : SYSTEME « ERYTHRINE » ; CARRE ROUGE : SYSTEME « DIVERSIFIE »).....	45
FIGURE XXI: TEMPERATURE DE L'AIR DANS LES CAFEIERS DES 3 SYSTEMES D'OMBRAGE AU COURS D'UNE JOURNEE POUR UNE PLUVIOMETRIE (A) < 6MM/JOUR; (B) COMPRISE ENTRE 6 ET 12MM/JOUR; (C) >20MM/JOUR.....	47
FIGURE XXII: TEMPERATURE DES FEUILLES DE CAFEIERS DES 3 SYSTEMES D'OMBRAGE AU COURS D'UNE JOURNEE POUR UNE PLUVIOMETRIE (A) < 6MM/JOUR; (B) COMPRISE ENTRE 6 ET 12MM/JOUR; (C) >20MM/JOUR.....	49

TABLEAUX

TABLEAU I: EFFET POTENTIEL DE L'OMBRAGE SUR LA ROUILLE ORANGEE A TRAVERS SES EFFETS SUR LES FACTEURS QUI AFFECTENT LES DIFFERENTS PROCESSUS DE LA MALADIE (JACQUES AVELINO & RIVAS, 2013).....	19
TABLEAU II: NOM SCIENTIFIQUE, FAMILLE, USAGE ET ABREVIATION DES ESPECES D'ARBRE D'OMBRAGE SELON LE BLOC ET LEUR SYSTEME D'OMBRAGE D'APPARTENANCE.....	24
TABLEAU III: RECAPITULATIF DES FEUILLES PRELEVEES PAR ESPECE DANS LES DIFFERENTES PARCELLES.....	27
TABLEAU IV : BRANCHEMENT DES CAPTEURS (TEMPERATURE ET PLUVIOMETRIE) SUR LES STATIONS METEOROLOGIQUES SELON LES SYSTEMES D'OMBRAGE	29
TABLEAU V: SYSTEME DE ROTATION DES STATIONS METEOROLOGIQUES POUR LA COLLECTE DES DONNEES DU MICROCLIMAT POUR UNE SERIE	30
TABLEAU VI: SYNTHSE DES VARIABLES ETUDIEES, DE LA MANIERE D'ANALYSE EMPLOYEE ET DE L'OBJECTIF DES ANALYSES.....	42
TABLEAU VII: MOYENNE DE SLA ET DE PERIMETRE ² /AIRE PAR ESPECE D'ARBRE D'OMBRAGE ET LES GROUPES DE MOYENNES SIGNIFICATIVEMENT DIFFERENTS, ANNOTE PAR LES LETTRES SUIVANTES A, B, BC ET C EN ORDRE DECROISSANT DES VALEURS DES MOYENNES.	43
TABLEAU VIII: TEMPERATURE MOYENNE DE L'AIR AUX HEURES LES PLUS CHAUDES DE LA JOURNEE (11H-13H) SELON 3 PLUVIOMETRIES (<6MM; ENTRE 6 ET 12 MM; <20MM) POUR LES TROIS SYSTEMES D'OMBRAGE ETUDIES (PLEIN SOLEIL; ERYTHRINE; DIVERSIFIE).	47
TABLEAU IX: TEMPERATURE MOYENNE DES FEUILLES DE CAFEIERS AUX HEURES LES PLUS CHAUDES DE LA JOURNEE (11H-13H) SELON 3 PLUVIOMETRIES (<6MM; ENTRE 6 ET 12 MM; <20MM) POUR LES TROIS SYSTEMES D'OMBRAGE ETUDIES (PLEIN SOLEIL; ERYTHRINE; DIVERSIFIE).	49
TABLEAU X: SYNTHSE DES ANALYSES PAR VARIABLE, RELATIVES A LA PROGRESSION DE LA ROUILLE, SELON LES SYSTEMES D'OMBRAGE. DANS TYPES DE FEUILLES J:JEUNES ET J+V: JEUNES ET VIEILLES. DANS ABSENCE DE DIFFERENCES, X: IL N'Y A PAS DE DIFFERENCE ENTRE LES SYSTEMES D'OMBRAGE. LORSQU'IL Y A DES DIFFERENCES, ELLES SONT NOTEES PAR « - » ; « + » ; « ++ » ; « ++ » DESIGNANT LE SYSTEME LE PLUS IMPACTE PAR LA VARIABLE ETUDIEE. A LA DROITE DE CETTE NOTATION SE TROUVE LE COEFFICIENT DE SORTIE DU MODELE. LA PRESENCE D'ASTERISQUE SUR AU MOINS DEUX DE CES VALEURS, INDIQUE QU'ELLES SONT SIGNIFICATIVEMENT DIFFERENTES ENTRE ELLES.	53