Introduction....1
I.Importance de la culture du caféier en Amérique centrale....1
II.Changement climatique en Amérique centrale....1
I.1.Chute des productions de café....1
I.2.Dégradation de la qualité du sol....2
I.3.Augmentation de la pression des bioagresseurs....2
III.Les SAF comme solution pour s'adapter aux changement climatique....2
IV.Identifier un SAF adapté pour lutter contre le changement climatique....4
Matériels et Méthodes....5
I.Description du réseau de parcelles....5
II.Quantification de l'ombrage....5
III.Variables microclimatiques....5
I.1.Températures....5
I.2.Pluviométrie et énergie cinétique des gouttes de pluie....6
II.Qualité du sol....7
II.1.Couverture du sol....7
II.2.Prélèvement des échantillons de sol....7
II.3.Quantification de l'azote minéral et de la vitesse de minéralisation de l'azote organique du sol. .7
II.4.Bioessai....8
IV.Production des caféiers....9
II.1.Croissance végétative....9
II.2.Déterminants du rendement....9
Résultats....10
I.Effets de l'ombrage sur le microclimat....10
I.1.Comparaison de la température de la caféière à la température plein soleil....10
I.2.Effet du type d'ombrage sur les températures de la caféière....10
I.3.Calibration de la mesure d'énergie cinétique....11
I.4.Effet des arbres d'ombrage sur l'énergie cinétique des gouttes de pluie....12
II.Effet de l'ombrage sur le sol et le cycle des nutriments....12
I.1.Couverture du sol des différents systèmes de culture....12
I.2.Teneur d'azote minérale dans les sols des caféières....13
I.3.Analyses de minéralisation de l'azote....13
I.4.Bioessai : culture de jeunes caféiers sur les échantillons de sol des caféières....13
III.Effet de l'ombrage sur la production : croissance végétative et rendement....14
II.1.Croissance végétative des caféiers par système de culture....14
II.2.Composantes du rendement par système de culture....15
Discussion....16
I.Effets tampon des systèmes agroforestiers sur les températures....16
II.Différentes gestions des caféières et conséquences sur les températures....16
III.Effet du sol sur les températures du caféier....17
IV.Augmentation de l'énergie cinétique des gouttes de pluie par l'arbre d'ombrage....17
V.Utilisation de « splashcups » pour mesurer l'énergie cinétique des gouttes de pluie....18
VI.Effet de l'arbre d'ombrage sur la fertilité du sol....19
VII.Effet du type d'ombrage sur la production du caféier....21
VIII.Implications dans le choix du système d'ombrage....22
Conclusion et Perspectives....22
Bibliographie....24
Annexe 1 : Localisation du réseau de parcelle....28
Annexe 2 : Calcul des quantités d'intrant azoté....29
Annexe 3 : Calibration des iButtons....30
Annexe 4 : Calibration des pluviomètres....32
Annexe 5 : Photographies de Splashcups....33
Annexe 6 : Relations entre l'énergie cinétique des gouttes et la quantité de pluie mesurée....34

Introduction

I. Importance de la culture du caféier en Amérique centrale

Le caféier est la seconde culture en Amérique centrale après celle du bananier. En 2013, 1 591 390 ha étaient consacrés à la culture du café, produisant 962 043 tonnes de grains (FAOSTAT, 2015) et 995 100 kg ont été exportés (1 080 780 kg en 2014) (International Coffee Organization, 2015). La part de la culture du café dans les exportations et du produit intérieur brut a fortement baissée depuis la chute du prix du café (Avelino et al., 2015), mais reste néanmoins une culture d'importance sociale. Elle concerne un demi-million de producteurs méso-américains, dont une grande majorité sont des petits producteurs, produisant sur moins de 5 ha (Läderach et al., 2010) et le nombre de personnes dépendantes de la culture du café pour leur sécurité alimentaire est estimé à plus de 2 millions (Avelino et al., 2015).

Les deux espèces de café cultivées sont *Coffea arabica* et *Coffea canephora* (variété Robusta). Leurs conditions optimales de développement diffèrent. En effet *C. canephora*, originaire des forêts de basse altitude du Congo, se cultive entre le niveau de la mer et jusqu'à 1 000 m d'altitude, alors que *C. arabica* est originaire des forêts d'altitude d'Éthiopie, et trouve son altitude optimale entre 600 et 1 600 m. Par conséquent la gamme optimale de températures pour le développement de l'Arabica se situe en 15 et 24°C, alors que la gamme du *C. canephora* est de 24-30°C (Toledo and Moguel, 2012). La pluviométrie optimale semble être similaire pour les deux espèces, avec une gamme optimale comprise entre 1 200 et 1 800 $mm.an^{-1}$, bien que dans de nombreuses région, comme au Costa Rica, elle peut dépasser 2 500 $mm.an^{-1}$ (Maestri and Barros, 1977; DaMatta, 2004) . Dans tous les pays d'Amérique centrale, *C. arabica* est la variété majoritairement cultivée (Toledo and Moguel, 2012).

II. Changement climatique en Amérique centrale

La réalité du réchauffement climatique qui s'opère depuis l'ère industrielle est aujourd'hui une évidence (Oreskes, 2004). Les conséquences du changement climatique arrivent plus rapidement et de façon plus prononcée dans les basses latitudes (Mahlstein et al., 2011; Bunn et al., 2014). Les scénarios climatiques montrent que dans cette région les températures vont augmenter de 2,0 à 2,5 °C et les précipitations diminueront d'ici la fin du siècle (Neelin et al., 2006; Rauscher et al., 2008; Imbach et al., 2015). De plus, des événements extrêmes tels que de fortes pluies, pics élevés de températures, surviendront plus fréquemment et intensément (Houghton, 2003). Les saisons sèches seront plus sèches et chaudes et les saisons humides présenteront des pluies plus intenses. Le changement climatique représente un défi majeur pour l'agriculture et particulièrement dans les pays en développement où les petits agriculteurs sont fortement dépendants des ressources naturelles (Baca et al., 2014).

I.1. Chute des productions de café

Les modélisations de la distribution de *C. arabica* suite aux changements climatiques prédisent une grave réduction de l'aire de production en Amérique centrale (Ovalle-Rivera et al., 2015). Les diminution des précipitations et l'augmentation des températures vont affecter négativement les productions de café (Houghton, 2003; FAO, 2013). En effet, en conditions de hautes températures la fermeture des stomates provoque la chute du taux photosynthétique (Rapidel et al., 2015). Les températures maximales que subit le caféier actuellement sont proches des maximales de tolérance. Par conséquent, l'augmentation des températures extrêmes réduira inévitablement les rendements potentiels (Houghton, 2003). La modification de la répartition des

pluies va également avoir des conséquences sur la production de café. Effectivement la floraison du caféier dépend du passage de la saison sèche à la saison des pluies marqué par de fortes précipitations couplées à une chute des températures et leurs atténuations provoqueront ainsi des récoltes plus tardives (Descroix and Snoeck, 2004). Un climat plus chaud conduira à des récoltes inférieures en quantité comme en qualité. Les hautes températures ont comme conséquence d'accélérer la maturation du fruit, conduisant à une dégradation de la qualité des grains de café (Läderach et al., 2010).

I.2. Dégradation de la qualité du sol

Le sol apporte au caféier un support de production mais également une source d'eau et de nutriments et son état conditionne la productivité du caféier. Les plus longues périodes de sécheresse provoqueront des déficits hydriques et auront un impact négatif sur l'alimentation hydrique et minérale de la culture. La diminution de la production primaire dans ces conditions de sécheresse conduira, à plus long terme, à réduire le taux de matière organique du sol (St.Clair and Lynch, 2010), la biodiversité et en conséquence limitera la dégradation de composés organiques plus récalcitrants (complexes humiques). Par ailleurs, la minéralisation de la matière organique peut augmenter avec la température. Si celle-ci est accompagnée de fortes pluies, les éléments minéraux seront perdus plus facilement par lixiviation. Le résultat est une diminution de la disponibilité des nutriments du sol pour la plante. Enfin les pluies de forte intensité peuvent provoquer de pertes de nutriments par érosion du sol et ainsi réduire sa fertilité (Bazzaz and Sombroek, 1996).

I.3. Augmentation de la pression des bioagresseurs

Les changements climatiques pourraient produire des conditions de développement favorables aux bioagresseurs jusqu'à modifier leurs fenêtres climatiques et donc exposer de plus grandes surfaces de culture au risque de pertes de production dues aux bioagresseurs (Läderach et al., 2010). Par exemple les récentes épidémies de rouille en Amérique centrale seraient principalement expliquées par l'augmentation des températures et la diminution des précipitations au cours du second semestre (Avelino et al., 2015).

III. Les SAF comme solution pour s'adapter aux changement climatique

Au vu de l'importance que présente la production de café en Amérique Centrale et notamment pour de petits producteurs, la recherche de solutions pour adapter la culture du caféier aux changements climatiques semble indispensable. C'est l'objectif que s'est fixé le projet CASCADE (Central American Subsistence and Coffee farmer ADaptation based on Ecosystems). Ce projet démarré en 2013 et qui terminera en 2017 est conduit par CI (Conservation International), le CATIE (Centre Agronomique Tropical de Recherche et Enseignement) et le CIRAD (Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement), en particulier l'UPR 106 (Bioagresseurs : Analyse et Maitrise du Risque) et l'UMR System (Unité Mixte de Recherche Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens). La première étape du projet CASCADE est d'identifier les stratégies d'adaptation déjà mises en place par les producteurs, basées sur le fonctionnement des écosystèmes : des EbA (Ecosystem based-Adaptation). Les EbA sont des écosystèmes adaptés au changement climatique via la conservation et l'utilisation de la biodiversité qui est le support de la fourniture de services écosystémiques (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2009). L'hypothèse défendue est qu'un agroécosystème capable de fournir une plus grande quantité de services écosystémiques sera plus durable et résilient. Il sera donc plus à même d'affronter les effets du changement climatique. La notion de service écosystémique se définit par les bénéfices que peut apporter un écosystème pour l'humanité (Alcamo et al., 2003).

Le caféier est cultivé traditionnellement depuis ses origines et son introduction en Amérique dans des écosystèmes agroforestiers biodivers (Toledo and Moguel, 2012). Un système agroforestier est une association entre au moins deux cultures, dont au moins une est un arbre et au moins une est récoltée. Ce système de culture plaçant le caféier sous l'ombrage d'une canopée est présenté comme solution prometteuse pour lutter contre les effets du changement climatique.

Les services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers sont bien documentés, en particulier, la séquestration du carbone et la conservation de la biodiversité (Toledo and Moguel, 2012). D'autres bénéfices peuvent agir sur la production de café, que nous détaillons ci-dessous.

Régulation du climat

L'ombrage permet de modifier le microclimat de la caféière en agissant sur les températures de celle-ci. Plusieurs études ont montré un effet tampon sur les températures extrêmes: atténuation des températures maximales et minimales de l'air (Beer et al., 1998). L'atténuation du stress thermique permet à la plante de maintenir sa transpiration et sa croissance à des niveaux optimaux (Beer et al., 1998; Souza et al., 2012). La floraison du caféier est induite par la quantité de lumière qu'il reçoit et la réduction de la quantité de lumière sous la canopée diminue le nombre de fruits produits mais réduit aussi l'amplitude de la biennalité du rendement (Rapidel et al., 2015). Ce phénomène a pour conséquence de maintenir un bon développement végétatif et de réduire ainsi le risque de « die-back » : la mort simultanée de branches ou de feuilles suite à un déséquilibre nutritionnel de la plante (Beer et al., 1998).

Amélioration de la qualité du sol

L'apport de matière organique provenant de la biomasse produite par les systèmes agroforestiers agit sur le recyclage des nutriments. De plus, l'activité biologique du sol généralement stimulée par la présence de racines d'espèces diversifiées augmenterait la minéralisation de la matière organique du sol. L'association avec des espèces fixatrices d'azote peut améliorer la fertilité du milieu par la restitution de sa biomasse racinaire et aérienne au sol. Dans le cas de *Erythrina poeppigiana*, jusqu'à 340 kg d'azote ha^{-1} an^{-1} peuvent être restitués au sol suite à la sénescence des nodules. De plus, les mêmes quantités peuvent être amenées au sol par la taille et la chute de rameaux et de feuilles (Beer et al., 1998). L'interception des pluies par la canopée et la diminution de l'écoulement d'eau de surface qui s'ensuit pourrait réduire l'exposition du sol au risque d'érosion et maintenir une stabilité physique du sol grâce à l'augmentation du réseau racinaire et de la masse organique du sol (Cannavo et al., 2011; Imbach et al., 2015).

Régulation du cycle de l'eau

Les systèmes agroforestiers réduisent les pertes d'eau par l'augmentation du taux d'évapo-transpiration. Effectivement, les phénomènes de ruissellement et de drainage sont plus faibles qu'en situation de plein soleil (Lasco et al., 2014). L'impact positif du système agroforestier sur le cycle de l'eau conduit à l'amélioration de la qualité de l'eau et à une meilleure utilisation/disponibilité de l'eau pour la production hydroélectrique (Gómez-Delgado et al., 2011).

Régulation des bioagresseurs

Les conditions microclimatiques créées par les agroforêts peuvent être défavorables pour le développement des bioagresseurs (Avelino et al., 2011). La conservation d'une biodiversité peut également introduire des organismes auxiliaires ou antagonistes affectant les populations de bioagresseurs (Beer et al., 1998).

La fourniture de l'ensemble de ces services écosystémiques est fortement dépendante de l'interaction entre l'ombrage du système et son environnement (Rapidel et al., 2015).

Rapport-Gratuit.com

Le changement climatique est une menace pour la fourniture de services écosystémiques et en particulier pour le recyclage des nutriments, donc pour la qualité du sol et, en définitive, pour la production du système. Les systèmes agroforestiers sont souvent cités pour leur effet protecteur du sol. Pourtant aucune étude n'a encore mis en évidence leur impact sur la répartition des pluies et sur l'énergie cinétique des gouttes, considérées comme une cause majeure de l'érosion des sols. En effet de nombreuses études montrent qu'en écosystème forestier, la canopée peut augmenter l'énergie cinétique des gouttes de pluie (Vis, 1986; Geißler et al., 2013; Goebes et al., 2015). Par ailleurs, si l'ombrage est souvent cité comme une option pour s'adapter au changement climatique, le type d'ombrage qui permet de mieux contrer les effets du changement climatique n'est en général pas indiqué.

IV. Identifier un SAF adapté pour lutter contre le changement climatique

L'étude réalisée au cours de ce stage s'insère directement dans le projet CASCADE qui vise à identifier le type de système agroforestier le mieux adapté aux petits producteurs dans la lutte contre le changement climatique. Notre postulat se base sur l'évidence que les écosystèmes fournissant le plus de services écosystémiques apportent une meilleure résilience et par conséquent une meilleure efficacité de lutte face aux conséquences du changement climatique (Altieri, 1999). L'objectif est donc d'identifier quels seraient les systèmes agroforestiers mis en pratique aujourd'hui et qui permettent de fournir la plus grande quantité de services écosystémiques. Une étude intégrative permet de répondre à cet objectif et dans notre cas, deux services écosystémiques menacés par le changement climatique ont été sélectionnés : le recyclage des nutriments, et la production de café. Un troisième service menacé a pu être étudié lors d'un stage réalisé simultanément : la régulation des bioagresseurs. Pour comprendre l'impact de l'ombrage sur ces services écosystémiques nous avons caractérisé les voies d'action mises en jeu et en particulier provenant de la régulation du microclimat : effet de l'ombrage sur les températures et l'énergie cinétique des gouttes de pluie. Ce rapport présente les résultats obtenus d'une première étude menée pendant ce stage où les effets de l'ombrage sur les différents fonctionnements écosystémique ont été étudiés simultanément.

Dans un premier temps nous allons étudier l'effet de l'ombrage sur le microclimat de la caféière et tenter de comprendre l'impact du type d'ombrage sur les températures de l'air, des feuilles et du sol (1). Nous souhaitons vérifier si le système agroforestier joue un rôle tampon sur les températures extrêmes : réduction des températures journalières maximale et minimale, à la fois au niveau de l'air, des feuilles du caféier et du sol. et que cet effet diffère suivant les systèmes agroforestiers. D'autre part nous voulons connaître comment le type d'ombrage modifie l'énergie cinétique des gouttes de pluie (2). L'hypothèse sous-jacente est que l'arbre agroforestier se comporterait comme en forêt et augmenterait l'énergie cinétique des gouttes de pluie et cet effet dépendrait de la hauteur et du type de canopée.

Nous tenterons ensuite de voir comment l'ombrage affecte la fertilité du sol, testée par la quantification de la croissance de caféiers en culture expérimentale, sur des sols provenant de différents types d'ombrage (3). Nous voulons vérifier par cette expérimentation l'idée que l'arbre d'ombrage améliore la disponibilité des nutriments et en particulier d'autant plus dans le cas de fixateurs d'azote. Nous irons compléter ces résultats par la quantification de la minéralisation de la matière organique (4). Notre hypothèse est que la matière organique apportée par l'arbre d'ombrage, améliore la fertilité du sol par l'augmentation de la minéralisation de la matière organique du sol et en particulier la matière azotée dans le cas des fixateurs d'azote.

Enfin nous voulons savoir si le type d'ombrage affecte différemment la production *in situ* du caféiers : croissance végétative (5) et production fruitière (6). Nous vérifierons l'hypothèse d'une plus forte croissance végétative associée à une plus faible quantité de fruits en condition

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

d'ombrage, puis celle d'une variation des niveaux de production selon les systèmes agroforestiers.

Matériels et Méthodes

I. Description du réseau de parcelles

L'étude a eu lieu sur un réseau de neuf parcelles en situation réelle de production situées dans les altitudes de la région de Turrialba, au Costa Rica (Annexe 1). Trois systèmes de cultures caféiers (*Coffea arabica*, variété : Caturra) ont été choisis, comme représentatifs de la diversité existante : un premier système correspondait aux plantations de caféiers en conditions de plein soleil, le second système étudié associait le caféier à *Erythrina poeppigiana,* un arbre d'ombrage très répandu au Costa Rica ; enfin le dernier système était une plantation de caféiers sous ombrage plurispécifique. Trois localités différentes ont été sélectionnées : La Suiza, Pavones et Santa Teresita. Dans chaque localité, 3 parcelles correspondant aux 3 systèmes de cultures décrits ont été sélectionnées. Les caractéristiques des parcelles sont détaillées dans le Tableau 1. Les sols sont globalement de nature limono-sableuses, avec des taux d'argiles relativement plus élevés dans les sols de la Suiza, possédant des taux d'argile de 18 à 33%. Les arbres présents dans ces parcelles sont décrits dans le Tableau 2. Ces neuf parcelles étaient conduites depuis au moins un an avec de faibles apports d'intrants. Le détail des quantités de fertilisants appliquées dans chaque parcelle est indiqué en annexe 2.

Au sein de chaque parcelle, nous avons délimité une sous-parcelle de 8 rangs et 15 plantes par rang, comprenant ainsi 120 caféiers. Les surfaces pouvaient varier selon les densités de plantation (Tableau 1) des parcelles, mais étaient en moyenne de 245 m^2. Les densités correspondaient en moyenne à des inter-rangs de 1,70 m et 1,20 m d'espacement entre chaque plant.

II. Quantification de l'ombrage

La quantité d'ombrage que produisent les canopées a été mesurée à l'aide d'un densiomètre (Lemon, 1956). L'observation ponctuelle permet de quantifier l'ombrage en pourcentage de couverture. Afin d'estimer l'ombrage à l'échelle de la parcelle, 5 emplacements ont été choisis aléatoirement et à chacun de ces points, 4 mesures ont été réalisées à 90° les unes des autres. Les mesures ont ensuite été répétées en mars-avril, mai et juillet. La moyenne de ces 60 pourcentages est utilisée afin de caractériser la quantité d'ombrage d'une parcelle.

III. Variables microclimatiques

Une centrale d'acquisition de données Campbell Scientific© CR1000 munie de thermomètres a été placée au centre de la sous-parcelle afin de mesurer l'évolution des températures atmosphériques, tellurique et foliaires des différentes plantations de caféiers. La station était installée une première fois lors de la saison sèche (avril-mai), puis en saison humide (juin-juillet). Pour chaque saison la station a été installée pendant une période de 10 jours. La mise en place des stations a été réalisée afin que sur une même période de 10 jours les trois parcelles d'une même localité récoltent les données aux mêmes dates. Seules les dates de mesure entre les trois localités diffèrent.

I.1. Températures

La température de l'atmosphère et du sol de la parcelle était mesurée à l'aide de thermocouples (type T, la référence étant la température du panneau de contrôle), placés respectivement dans un

abri de protection du rayonnement solaire à environ 1m70 de hauteur et enterré dans le sol à 20 cm de profondeur. Les mesures de ces températures étaient répétées à deux endroits distants au sein de la sous-parcelle. Enfin la température de la surface foliaire des feuilles de caféiers a été également mesurée. Les thermocouples étaient placés contre la face inférieure des feuilles. Trois feuilles ont été suivies de cette manière, une feuille en partie basse de la canopée du caféier, une seconde au milieu puis une feuille dans la partie haute. Les mesures sont répétées sur quatre caféiers choisis aléatoirement. La température de référence pour ces thermocouples était la température de l'air à l'extérieur de la parcelle. Elle était mesurée dans le système plein soleil par la mise en place d'un thermocouple dans un abri de protection du rayonnement solaire à environ 3 m de hauteur, soit entre 1 et 1,5 m au-dessus des caféiers. Dans les systèmes agroforestiers, les conditions d'ombrage des parcelles ont contraint d'aller rechercher une référence externe plus éloignée de la parcelle. Des thermomètres de type iButton ont donc été placés hors de l'ombrage des arbres. La calibration de ces températures obtenues par iButton est décrite en annexe 3.

A partir des données obtenues dans chacune des parcelles, les températures journalières moyennes, maximale et minimale ont été conservées pour les trois compartiments atmosphère, sol et feuilles. Les différences de températures étaient ensuite calculées par la différence à la température de référence située à l'extérieur de la parcelle. Enfin l'analyse statistique de ces différences de température a été réalisée par un modèle linéaire à effets mixtes dont les dates de mesure les localités étaient choisies comme variables aléatoires emboîtées.

I.2. Pluviométrie et énergie cinétique des gouttes de pluie

Les pluies reçues par les caféiers ont été étudiées lors de la seconde installation des stations Campbell Scientific© CR1000 en saison humide. Un pluviographe installé à l'extérieur de la plantation de caféiers a permis de mesurer les quantités totales de précipitation en mm, les intensités de précipitation en $mm.h^{-1}$ toutes les 10 minutes, et les durées de précipitation. Les pluviographes utilisés ont été préalablement calibrés au laboratoire (annexe 4).

La mesure de l'énergie cinétique des gouttes de pluie est basée sur les travaux de Scholten et al., (2011). Le principe est de quantifier l'énergie cinétique de la pluie par la quantification d'une perte de sable. Un « splash cup » correspond à une tasse contenant un cylindre de 5 cm de diamètre rempli de sable (de 150 à 250 µm, densité 1 410 kg/m^3). Le sable est humidifié par capillarité grâce à une mèche de coton trempant dans un réservoir d'eau (Figure 1). Les « splash cups » contenant le sable sont placées au-dessus du niveau des caféiers à environ 2,5 m de hauteur. La mesure se fait sur une durée d'au moins 24h incluant au moins une pluie. Après cela le récipient est mis à sécher pendant 48 heures à 80 °C. La perte de sable est calculée par différence à la masse sèche initiale de sable et exprimée en $g.m^{-2}$. La relation établie par Scholten et al. (2011) nous permet de traduire la perte de sable en énergie cinétique en $J.m^{-2}$. Pour chaque parcelle, des « splash cups » sont installés en condition de plein soleil et sous la canopée de chaque espèce d'ombrage. Chaque modalité est installée avec 5 répétitions à l'intérieur de la parcelle et jusqu'à 4 répétitions dans le temps (jours de pluies). La parcelle correspondant au système à ombrage pluri-spécifique (S3) de Pavones ne présente que 4 répétitions spatiales par modalités d'ombrage. Au niveau de Guayabo, la parcelle du système S3 a permis de réaliser uniquement 2 mesures par « splash cup » et 3 mesures pour les 2 autres parcelles de cette localité ainsi que de La Suiza.

La caractérisation des feuilles d'ombrage a été effectuée par la quantification des surfaces foliaires spécifiques (SLA : Specific Leaf Area, $m^2.kg^{-1}$) et du rapport périmètre/surface (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). La SLA est obtenue via le rapport de la surface des feuilles fraîches par leur masse sèche. Pour chaque espèce d'arbre d'ombrage, au moins 10 feuilles adultes, bien ensoleillées et sans dommage important sont récoltées. Ces feuilles ont été transportées dans des sacs hermétiques placés dans une glacière afin de limiter la déshydratation, puis conservées au

réfrigérateur. Chaque feuille a été photographiée puis numérisée afin de mesurer son périmètre et sa surface via le logiciel ImageJ. Elle a été ensuite séchée (48h à 80°C) puis pesée. Un échantillon correspond à un lot d'une dizaine de feuilles par espèce et à la moyenne de mesures de SLA, surface foliaire et périmètre de ce lot de feuille. Les mesures ont été réalisées sur des échantillons de 20 feuilles répétées 8 fois pour *E. poeppigiana*, 5 fois pour *Cordia alliodora*, 3 fois pour *Citrus sp.* et *Bactris gasipaes* 2 fois pour *Inga sp. 1 et I. sp.2*. Seulement 2 répétitions de 10 feuilles ont pu être réalisées pour *Carapa guianensis*.

Pour le cas spécifique de la feuille de bananier, les mêmes mesures ont été réalisées sur des fragments de feuilles, naturellement découpées. En effet, d'un point de vue fonctionnel (en particulier vis à vis de l'accumulation d'eau libre sur le limbe), les fragmentations de feuilles sont considérées comme des feuilles ou folioles. Seules deux répétitions sont présentes pour cette espèce.

L'analyse statistique des énergies cinétiques obtenues est réalisée par la construction d'un modèle linéaire à effets mixtes. Les localités et les dates sont placées comme variables aléatoires avec l'effet de la date emboîté dans celui des localités. Le modèle permet de mettre en relation les énergies cinétiques des gouttes de pluie avec les caractéristiques de la canopée (espèce, quantité et type d'ombrage, SLA et périmètre/surface) et celles des pluies (quantité, intensité maximale et durée de précipitations). Le modèle doit permettre de pouvoir comparer l'effet de l'ombrage sur l'énergie cinétique de la pluie et pour chaque espèce.

II. Qualité du sol

II.1. Couverture du sol

La couverture du sol a été observée ponctuellement au niveau des inter-rangs de la sous-parcelle. 70 observations du sol ont été réalisées le long d'une trajectoire au sein de chaque inter-rang. 2 passages ont été réalisés dans le réseau de parcelles à deux semaines d'intervalle et pendant la saison humide. La nature de la couverture du sol située à la pointe du soulier, était notée selon qu'il s'agissait de sol nu, d'une pierre, de litière (feuilles mortes, matière organique en décomposition), de branche ou d'une plante adventice. L'ensemble de ces 140 observations a ensuite permis d'obtenir une répétition de deux pourcentages pour chaque classe de couverture du sol pour chaque parcelle. Des analyses de variance sur chaque catégorie de couverture du sol ont permis de caractériser les systèmes de culture.

II.2. Prélèvement des échantillons de sol

Les vingt premiers centimètres de sol, retirés de la litière, ont été prélevés au centre des inter-rangs afin de minimiser les effets d'une fertilisation appliquée au pied des caféiers. Un échantillon correspondait à quatre prélèvements de sol d'une même parcelle situés en plein soleil ou sous l'ombrage d'une espèce ou d'un groupe d'espèces d'arbres d'ombrage. Les quatre carottes de sol ont ensuite été séparées des cailloux et des racines de grande taille puis homogénéisées. 5 répétitions ont été réalisées pour chaque modalité d'ombrage au cours de la saison sèche (mi-mars) et puis en saison humide (mi-juin).

II.3. Quantification de l'azote minéral et de la vitesse de minéralisation de l'azote organique du sol

L'idée est d'identifier l'effet éventuel de l'arbre d'ombrage sur l'état de l'azote dans le sol par la quantification de l'azote minéral du sol et la vitesse de minéralisation de l'azote suite à une incubation anaérobique (Klute and Page, 1982). L'azote minéral sous forme nitratée et ammoniacale (mg N.kg sol^{-1}) a été quantifié sur un échantillon de 10 g de sol préalablement homogénéisé. L'échantillon était ensuite incubé en conditions anaérobies à 40°C pendant 7 jours.

L'azote minéralisé était alors quantifié par un dosage de la quantité finale d'ammonium. Enfin une vitesse de minéralisation a été calculée par la quantité d'azote minéralisée, la quantité de sol utilisée et la durée d'incubation. Cette vitesse s'exprime en mg N.kg sol^{-1}.$jour^{-1}$.

La détermination de l'humidité des échantillons de sol nécessaire au calcul de quantités d'azote minéral a été effectuée sur 10 g de sol frais. Les échantillons ont été séchés pendant 24h à 105°C après quoi ils ont été pesés.

L'extraction de l'azote inorganique a été réalisée par l'utilisation de KCL 2 N : les 10 g de sol frais sont dilués dans 100 mL de réactif KCL 2 N, agitée pendant une heure puis centrifugée pendant 5 mn à 2 500 rpm. L'extrait est conservé à 4°C. Un échantillon blanc a été réalisé suivant ces même étapes.

Enfin la quantité d'azote minéral a été déterminée par méthode de distillation. Une faible quantité de l'extrait de sol (10 à 30 mL) a été placée dans le ballon de distillation Kjeldahl avec 0,2 g de MgO (base faible) afin de récupérer 30 mL de solution distillée. Cette étape est répétée mais ajoutant à l'extrait de sol 0,2 g de Cu (agent réducteur). Chaque produit de distillation a ensuite été titré par une solution de H^2SO^4 0,005N jusqu'au virage de couleur du vert au mauve claire. Ces étapes ont été effectuées sur les échantillons blancs. Les quantités d'ammonium et de nitrate ont ensuite été calculées par les formules suivantes :

N-NH4 (mg/kg) = [(mlm-mlbl)*N*0.014*(100/aliq)*1000*1000] / [pm*(%ms/100)]

N-NO3 (mg/kg) = [(mlm-mlbl)*N*0.014*(100/aliq)*1000*1000] / [pm*(%ms/100)]

mlm: mL de H2SO4 consommé pa l'échantillon

mlbl: mL de H2SO4 consommé par le blanc

N: Normalité des extrait de H2SO4

0.014 : poids miliequivalent de l'azote

aliq : aliquote prélevé dans l'extrait pour la distillation

pm : masse fraîche de l'échantillon de sol

%ms : pourcentage de matériel sec obtenu lors de la détermination de l'humidité

Les analyses statistiques de ces quantités d'azote initial et des vitesses de minéralisation ont été réalisées par l'application d'un modèle à effets mixtes. La localité et la parcelle sont placées en variables aléatoires. Les modèles mettaient en relation ces résultats avec la provenance des échantillons, c'est-à-dire à la période d'échantillonnage, le système de culture, la quantité d'ombrage reçu puis, lorsqu'un arbre était présent, l'espèce de l'arbre.

II.4. Bioessai

Des échantillons de sol préparés ont été placés dans des sacs en plastique cylindriques où deux jeunes caféiers (*Coffea arabica*, variété : Caturra) de 2 mois ont ensuite été transplantés. 10 plantes témoins ont été installées dans 5 sacs contenant un mélange de vermiculite et de sable aux proportions massiques de 75% pour la vermiculite et 25% pour le sable. Les caféiers ont été placés aléatoirement dans une serre afin qu'ils se développent pendant une période de 4 mois (du 20/03 au 07/07). L'irrigation était réalisée par capillarité en plaçant les sacs dans des coupelles quotidiennement alimentées en eau du robinet jusqu'à environ 1 cm de hauteur afin de se positionner au-dessous du niveau des racines du caféier. Un passage d'insecticide (organophosphoré, 1 L/ha) a été appliqué au cours de l'essai le 30/04/2015.

Les deux caféiers d'un échantillon de sol étaient considérés comme un seul individu. Ainsi la masse fraîche de chaque paire de plantes a été mesurée initialement puis la masse fraîche de 10

échantillons au bout de cinq mois de croissance. L'ensemble de ces 10 masses fraîches ont été mises en relation avec les masses sèches de ces mêmes individus. La régression linéaire obtenue a permis d'estimer les masses sèches initiales de chacun des individus à partir de leur masse fraîche (Figure 2). L'ensemble des échantillons récoltés, dont le sol contenu dans les pots, a été mis à sécher à 80°C pendant 48 heures avant d'être pesé. Les taux de croissance calculés à partir de ces masses sèches initiales et finales sont exprimés en $g.MS.jour^{-1}$.

L'analyse statistique a été réalisée par l'application d'un modèle linéaire à effets mixtes, où la localité et la parcelle était mises en variables aléatoires emboîtées. Le modèle a mis en relation les taux de croissance des caféiers avec la provenance des échantillons de sol, la biomasse initiale des caféiers ainsi que les quantités et vitesse de minéralisation de l'azote de ces sols précédemment décrits.

IV. Production des caféiers

Le suivi de la production végétative et fruitière a été réalisé sur 6 caféiers marqués choisis aléatoirement dans chaque parcelle. Une plante a été marquée par rang afin de recouvrir la variabilité intra-parcellaire. La hauteur de cette plante a été mesurée afin d'avoir un indicateur de l'âge du rejet de caféier. 3 rameaux plagiotropes primaires ont été marquées par plants avec un premier rameau dans la partie basale, un second au milieu et le troisième dans la partie supérieure de la plante marquée. Le nombre de segments délimités par la base du rameau, chaque entre-nœuds courts et la pointe du rameau été comptabilisé afin de connaître l'âge du rameau.

II.1. Croissance végétative

La croissance des plantes a été estimée par une série de mesures physiologiques appliquées à cinq dates différentes de fin mars à mi-juillet et espacées toutes les quatre semaines. La croissance du caféier a été estimée par le gain de biomasse des branches plagiotropes. La biomasse des branches a été estimée d'après la relation établie par (Charbonnier, 2013). La biomasse est déterminée par le diamètre basal du rameau et de la longueur de celui-ci, comme l'exprime l'équation suivante :

$B_{plagio}=0.033 * D^{0.423} * L^{1.013}$

Validation du modèle : $B_{mod}=0.98*B_{meas}+3.7$

B : biomasse du rameau (g) ; D: diamètre basal du rameau (mm); L: longueur du rameau (cm)

Les taux de croissance ont été calculés entre chaque date de mesure en $g.jour^{-1}$. Ces taux de croissance ont ensuite été analysés par un modèle linéaire à effets mixtes associant la localité comme variable aléatoire. La construction du modèle a été réalisée afin de mettre en relation les taux de croissance avec les périodes correspondantes, les quantités et types d'ombrage de la parcelle, la taille des caféiers, l'âge des rameaux.

Nous voulons ensuite vérifier si les variations expliquées par système de culture ne seraient en réalité l'effet des quantités de fertilisants apportées et des niveaux d'azote dans le sol. Pour cela nous avons construit un modèle permettant d'expliquer les taux de croissance avec les quantités d'azote minéral mesurées dans les sols et d'azote apportées à la parcelle par fertilisation.

II.2. Déterminants du rendement

Le rendement a été estimé par la charge fruitière des caféiers, c'est-à-dire le nombre de fruits par plante. Cette charge fruitière a été estimée à son tour par le comptage du nombre de nœuds fruitiers des caféiers marqués, multiplié par le nombre de fruits par nœud fruitier moyen observé sur les trois rameaux aléatoires du même plant. Les composantes du rendement ont également été identifiées sur ces 6 caféiers marqués. Le nombre de branches productives, c'est-à-dire

produisant des fruits, a été compté sur la plante entière. Le nombre de nœuds fruitiers par branche productive, a été estimé par la moyenne des taux observés sur 3 rameaux choisis aléatoirement. Enfin le nombre de fruits par nœud fruitier a été quantifié comme décrit précédemment.

L'analyse statistique des résultats a été réalisée par l'utilisation d'un modèle linéaire à effets mixtes, plaçant la localité comme variable aléatoire. Les types de système de culture ainsi que les quantités d'ombrage ont été intégrés comme variables qualitatives expliquant les niveaux de rendements et de ces composantes. Les quantités d'ombrage ont été regroupées en trois catégories, celles de plein soleil, de faible densité d'ombrage puis de forte densité d'ombrage. La significativité des différences entre traitements a été obtenue par des comparaisons multiples de moyennes sur ce modèle linéaire à effets mixtes.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées sur le logiciel R. La significativité des résultats statistiques sont indiquées par une probabilité critique (Pc).

Résultats

I. Effets de l'ombrage sur le microclimat

I.1. Comparaison de la température de la caféière à la température plein soleil

La température de l'air dans la plantation, mesurée en plein soleil, ne diffère pas de celle externe à la parcelle (Figure 3). Effectivement, les différences de températures journalières moyenne, maximale et minimale entre l'atmosphère interne et externe de la caféière sont nulles (Pc = 0,72 ; 0,10 et 0,57 respectivement).

Le sol montre des températures moins variables que celles observées dans l'air. Les températures minimales atteintes à 20 cm de profondeur sont en moyenne plus élevées de 2.89°C de celles atteintes par l'atmosphère (Pc < 0,01). Il en est de même des températures moyennes du sol qui sont plus élevées que l'air de 1.81°C (Pc < 0,01). De plus les variations de température au niveau du sol ne sont pas synchronisées avec celles observées dans l'atmosphère : les températures maximales atteintes par le sol surviennent entre 16h et 18h, soit plusieurs heures après le pic de températures atmosphériques survenant entre 11h et 13h. Les températures de surface foliaire du caféier suivent parfaitement les variations de températures observées dans l'atmosphère. Les moyennes de ces deux températures ne diffèrent pas (Pc = 0,66) mais les caféiers atteignent des températures plus extrêmes que l'air. Les températures maximales sont plus élevées et les minimales plus basses de + 1.77°C et -0.46°C respectivement (Pc < 0.01).

I.2. Effet du type d'ombrage sur les températures de la caféière

L'ombrage affecte négativement les températures dans la caféière. Les températures moyennes sont réduites au sein de chacun des compartiments air, surface foliaire du caféier (Pc < 0,01) et sol (Pc = 0,01). De même les températures maximales de l'air et des feuilles sont diminuées par l'augmentation de la quantité d'ombrage (Pc < 0,01). Les températures minimales atteintes par l'atmosphère et les feuilles sont aussi diminuées par l'augmentation de l'ombrage (Pc < 0,01). Enfin le sol se refroidit d'autant plus que l'ombrage est dense (Pc < 0,01), sauf pour les températures maximales qui ne semblent pas être affectées pas l'ombrage (Pc = 0,50).

Toutefois les effets de l'ombrage diffèrent selon les systèmes agroforestiers mis en place. L'association du café avec *E. poeppigiana* produit un microclimat globalement plus frais qu'avec un système plus diversifié (Figure 4). Les températures maximales journalières sont particulièrement réduites. Cette diminution des températures élevées affecte l'air et le sol (Pc <

0,01). Les feuilles sont affectées uniquement en condition de forte densité d'ombrage, c'est-à-dire >25% de couverture (Pc < 0,01). Les parcelles associant le caféier à une canopée pluri-spécifique montrent eux une diminution des températures maximales de l'air (Pc < 0,01) mais avec un effet moindre qu'en présence de *E. poeppigiana*. Le sol n'en est pas affecté (Pc = 0,92). Comme pour l'association caféier et *E. poeppigiana*, les associations plus diversifiées n'affectent les températures maximales des feuilles uniquement en forte densité d'ombrage (Pc = 0,02). En faible densité d'ombrage (≤25%) ces plantations à canopée pluri-spécifique montrent même une augmentation de ces températures foliaires d'environ 1°C (Pc < 0,01).

Les températures minimales journalières de l'air les plus extrêmes sont retrouvées dans les plantations associées à un ombrage pluri-spécifique (Pc < 0,01), toutefois d'une différence très faible, inférieure à 0,01°C. Les plantations associées à *E. poeppigiana* n'affectent pas ces températures (Pc = 0,15). Les températures minimales des feuilles sont réduites quel que soit le système d'ombrage, avec une diminution plus faible en association avec *E. poeppigiana* (entre 0,15 et 0,32°C) qu'en association avec une canopée pluri-spécifique (entre 0,37 et 0,49°C). Enfin les températures minimales journalière atteintes par le sol ne sont augmentées qu'en situation de faible ombrage et quelle que soit la diversité d'association (Pc < 0,01). En forte densité d'ombrage l'association du caféier et de *E. poeppigiana* augmente ces températures d'environ 0,02°C (Pc < 0,01) alors qu'elles ne sont pas affectées par les plantations associées à une canopée diversifiée (Pc = 0,20).

Récapitulatif des niveaux de température journalière maximale et minimale au sein des système de culture :			
Température maximale	-	+ / -	+
Air	*Erythrina peoppigiana*	Pluri-spécifique	Plein Soleil
Feuille	*Erythrina peoppigiana*	Pluri-spécifique	Plein Soleil
Sol	*Erythrina peoppigiana*	Pluri-spécifique	Plein Soleil
Température minimale	-	+ / -	+
Air	Pluri-spécifique	*Erythrina peoppigiana* / Plein Soleil	
Feuille	Pluri-spécifique	*Erythrina peoppigiana*	Plein Soleil
Sol	Plein Soleil	Pluri-spécifique	*Erythrina peoppigiana*

I.3. Calibration de la mesure d'énergie cinétique

L'utilisation de « splash cup » semble être une méthode valable afin de quantifier l'énergie des gouttes de pluie. Nous avons dans un premier temps mis en relation les énergies cinétiques de pluies mesurées sans effet de canopée, à trois caractéristiques de la pluie : la quantité (mm), l'intensité horaire maximale mesurée sur 10 mn ($mm.h^{-1}$) et la durée (heure) de la (ou des) pluie(s) reçue(s) par la plantation. Le premier constat est que la relation n'est pas linéaire, notamment avec l'intensité maximale de la pluie (Figure 5). A partir d'une certaine quantité de pluie ainsi que d'une certaine intensité, l'énergie cinétique tend à se stabiliser vers un seuil maximal. Le passage de ces variables en logarithme permet d'obtenir une relation linéaire (Figure 6). De ces travaux de calibration résulte finalement des relations relativement forte entre l'énergie cinétique et l'intensité des pluies appliquées (r^2 = 0,69) ainsi qu'avec la quantité de pluie (r^2 = 0,68). En revanche la durée totale de la pluie n'est pas une variable corrélée à l'énergie cinétique des gouttes de pluie (r^2 = 0,14).

Les mesures d'énergie cinétique effectuées dans les caféières confirment les conclusions de la calibration. La variabilité des résultats est encore plus forte en condition ombragée qu'en plein soleil. L'intérêt d'appliquer une fonction logarithmique sur ces variables d'énergie cinétique, de quantité et d'intensité de pluie est de diminuer cette variabilité et d'obtenir de meilleures corrélations linéaires. Nous confirmons à nouveau que l'énergie cinétique est aussi bien corrélée

à la quantité de pluie qu'à son intensité horaire maximale mesurée sur 10 mn (r^2 = 0,60 pour chacune de ces variables).

I.4. Effet des arbres d'ombrage sur l'énergie cinétique des gouttes de pluie

Afin d'identifier l'effet de différentes espèces d'arbres d'ombrage sur la dispersion et par conséquent sur l'énergie cinétique des gouttes de pluie, nous avons construit un modèle prenant en compte les caractéristiques de la pluie vues précédemment. Les seules variables retenues afin d'expliquer la variabilité des énergies cinétiques sont l'intensité maximale et la quantité de pluie (P < 0,01 pour chacune des variables). Toutefois l'effet de l'intensité de pluie est variable selon les espèces d'ombrage (Pc < 0,01). La hauteur de la canopée n'est pas significative (Pc = 0,06), comme la durée totale de la pluie (Pc = 0,22). Ainsi le modèle retenu afin d'expliquer l'énergie cinétique de la pluie se définit par la relation entre le logarithme de l'énergie cinétique, les logarithmes de la quantité et de l'intensité de la pluie. Le modèle intègre en plus l'interaction entre l'intensité maximale de la pluie et l'espèce d'arbre d'ombrage.

La majorité des espèces étudiées augmente l'énergie cinétique des gouttes de pluies par rapport à la pleine exposition solaire (Figure 7). L'énergie cinétique la plus forte est retrouvée sous la canopée de *Cordia alliodora* avec une augmentation de 2,8 $J.m^{-1}$ en comparaison à l'effet d'une pluie en condition de plein soleil. Les espèces *Carapa guianensis*, *Citrus* sp., *Inga densiflora*, et les Musas, montrent également une augmentation (Pc < 0,01 ; 0,02 ;0,05 et < 0,01 respectivement), égale entre eux, mais moindres que *C. alliodora*. Enfin *E. poeppigiana*, *Inga edulis* et *Bactris gasipaes* n'affectent pas l'énergie cinétique de la pluie, où les mesures ne se distinguent pas de celles effectuées en plein soleil (Pc = 0,17, 0,52 et 0,09 respectivement).

Récapitulatif des augmentation d'énergie cinétique des gouttes de pluie sous la canopée des arbres d'ombrage		
=	+	++
E. poeppigiana *Inga edulis*	*Bactris gasipaes* *Citrus sp* *Inga densiflora* *Musa sp.* *Carapa guianensis*	*Cordia alliodora*

Enfin nous avons tenté d'expliquer cet effet spécifique sur la pluie par les caractéristiques de la canopée propres à l'espèce que sont la SLA et le rapport du périmètre/surface des feuilles. Aucune de ces deux caractéristiques n'est corrélée avec les énergies cinétiques (Pc = 0,64 et 0,29 respectivement).

II. Effet de l'ombrage sur le sol et le cycle des nutriments

I.1. Couverture du sol des différents systèmes de culture

Afin d'étudier la vulnérabilité du sol à l'érosion nous avons caractérisé la nature de la couverture du sol. Nous pouvons observer que la quantité de litière est en général plus importante lors d'associations avec des arbres d'ombrage (Figure 8). Cependant, seul le système associant caféier et *E. poeppigiana* a un taux significativement plus important de litière que les systèmes plein soleil (Pc = 0,04). La proportion de rameaux morts sur le sol en revanche ne semble pas montrer de différence suivant les systèmes (Pc = 0,34). Notons que les plantes adventices sont présentes en plus grande proportion dans les systèmes plein soleil que dans les systèmes avec *E. poeppigiana* (Pc = 0,03). Le système pluri-spécifique ne diffère pas du plein soleil sur ce point (Pc = 0,12).

I.2. Teneur d'azote minérale dans les sols des caféières

Les différents systèmes de culture présentent différent intrants nutritionnels. Les arbres d'ombrage peuvent être considérés comme source d'apport de matière organique au sol et donc d'éléments nutritifs pour la plante. Les quantités de nitrate dans les sols des parcelles ombragées sont plus élevées qu'en conditions de plein soleil. Les taux de nitrate les plus élevés de l'ordre d'une vingtaine de $mg.kg^{-1}$ sol sont principalement retrouvés dans l'association caféier-*E. poeppigiana* (Figure 9). Ces taux de nitrate sous *E. poeppigiana* sont en moyenne supérieurs de 4,71 mg N. kg^{-1} de sol par rapport à ceux retrouvés dans les systèmes plein soleil. Sous ombrage pluri-spécifique, les quantités mesurées sont supérieures de 2,31 mg N. kg^{-1} de sol seulement. Ces systèmes ombragés reçoivent par ailleurs un plus faible apport de fertilisants azotés chimiques (Annexe 5). Nous n'avons pas pu montrer l'effet de l'espèce d'arbre d'ombrage sur la présence de nitrate dans le sol (Pc = 0,11), à l'exception d'une tendance à réduire la quantité de nitrate de 4,7 mg N. kg^{-1} sous l'ombrage de *Carapa guianensis* (Pc = 0,06).

I.3. Analyses de minéralisation de l'azote

Les vitesses de minéralisation de l'azote organique en incubation anaérobique, mesurées dans les échantillons de sols sont supérieures dans les plantations sous ombrage multi-spécifique (Pc < 0,01). Nous n'avons pas pu mettre en évidence une différence de vitesse de minéralisation entre un ombrage sous *E. poeppigiana* et en plein soleil (Pc = 0,44). Enfin, lorsque l'on évalue l'effet au niveau de l'arbre d'ombrage, nous montrons que certaines espèces, Musa et *Citrus sp.* (Pc < 0,01), augmentent la vitesse de minéralisation de l'azote de 4,57 et 4,68 $mgN.kg^{-1}sol.jour^{-1}$ respectivement. Les autres espèces étudiées ne présentent pas d'effet significativement différent d'un sol en plein soleil (Figure 10).

I.4. Bioessai : culture de jeunes caféiers sur les échantillons de sol des caféières

La culture de jeunes caféiers dans les échantillons de sols a produit des caféiers aux aspects très variables. De manière générale la biomasse sèche de la plante a augmenté de 63% avec un écart-type de 7%. Cependant les biomasses sèches initiales étaient également très variables et montrent une forte relation linéaire avec les biomasses finales (r^2 = 0,74) (Figure 11). Cette relation peut s'écrire de la façon :

$$\text{Biomasse finale} = 2{,}32 * \text{Biomasse initiale} + 1{,}64.$$

L'ordonnée à l'origine de ce modèle de régression linéaire est positif (Pc < 0,01) montrant ainsi que le taux de croissance est d'autant plus élevé que la biomasse initiale du caféier est faible (Pc = 0,03).

La croissance des caféiers ne semble pas être affectée par la provenance du type de système de culture (Pc = 0,97) mais des différences peuvent être discernées selon l'espèce d'arbre d'où proviennent les sols (Pc = 0,01) (Figure 12). En moyenne les meilleurs taux de croissance proviennent des sols sous influence des espèces *Inga* sp. et *E. poeppigiana* avec des gains de biomasse respectif de 64% et 62%. Les résultats provenant de conditions de plein soleil ainsi que des espèces *Cordia alliodora* et *Citrus* ne sont pas significativement différents de ces deux premières espèces. L'influence de *Musa* montre des résultats plus contrastés. Les taux de croissance de caféiers sur les sols prélevés sous les Musas (bananiers) sont les plus bas enregistrés et significativement inférieurs aux trois meilleurs taux de croissance, c'est-à-dire ceux correspondant aux sols prélevés sous *Inga*, *E. poeppigiana* et en conditions de plein soleil.

Récapitulatif des caractéristiques des sols des 3 système de culture :			
	-	+ / -	+
Couverture	Plein soleil / Pluri-spécifique		*Erythrina peoppigiana*

N minéral	Plein Soleil	Pluri-spécifique	*Erythrina peoppigiana*
Minéralisation (systèmes)	*Erythrina peoppigiana* / Plein Soleil		Pluri-spécifique
Minéralisation (arbres)	*E. poeppigiana* *Inga sp.* *Cordia alliodora*		*Musa sp.* *Citrus sp*
Bioessai (systèmes)	*Erythrina peoppigiana* / Plein Soleil / Pluri-spécifique		
Bioessai (arbres)	*Musa sp.*	*E. poeppigiana* *Inga sp.* *Citrus sp* *Cordia alliodora*	

II.

III. Effet de l'ombrage sur la production : croissance végétative et rendement

II.1. Croissance végétative des caféiers par système de culture

L'estimation de la biomasse des rameaux à partir des mesures de diamètre basale et de longueur des rameaux montrent dans un premier temps que suivant les systèmes de culture, les caféiers ne présentent pas les mêmes quantités de biomasse (Figure 13). En effet la longueur des rameaux sous ombrage pluri-spécifique est en moyenne de 21 cm et est plus courte de 9 cm en comparaison aux caféiers situés en plein soleil (Pc = 0,02) et de 5,3 cm en comparaison à l'association caféiers-*E. Poeppigiana*. (Pc = 0,16). Bien que les rameaux semblent plus long en plein soleil qu'en association avec *E. Poeppigiana*, cette tendance n'est pas significative (Pc = 0,32).

La quantification des taux de croissance des rameaux plagiotropes du caféier n'a pas confirmé l'existence d'une relation entre cette croissance végétative du caféier et la quantité d'ombrage reçu (Pc = 0,88). Néanmoins, les différents systèmes de culture montrent des taux de croissance différents (Pc < 0.01). D'autre part, les dates d'observation influencent le taux de croissance mesuré (Figure 14). A la période à laquelle ont été réalisés les relevés (d'avril à juillet), les taux de croissance mesurés diminuent avec le nombre de jours passé depuis la première observation (Pc < 0,01). L'âge du caféier estimé par sa hauteur ne semble pas avoir d'effet sur la croissance des rameaux (Pc = 0,63). C'est au contraire, le cas de l'âge du rameau : les vieux rameaux croissent moins vite que les jeunes (Pc = 0,01). Les branches les plus anciennes mesurées ont jusqu'à 6 ans et se positionnent en partie basse de la plante tandis que les plus jeunes se trouvent plus proches de l'apex caulinaire. La diminution du taux de croissance avec l'âge du rameau est similaire pour les trois systèmes de culture étudiés (interaction système de culture et âge du rameau non significative : 0,15). Finalement, le modèle retenu explique les taux de croissance par le système de culture, le nombre de jours passés depuis la première mesure et l'âge du rameau mesuré.

Nous avons vérifié que les quantités de fertilisants apportées et les niveaux d'azote dans le sol ne permettent pas d'expliquer les taux de croissance. La construction d'un modèle remplaçant les système de culture par les niveaux de fertilisation et les niveaux de nitrate dans les sol n'ont montré aucune significativité (Pc = 0,22 et 0,30 respectivement). Ces résultats montrent ainsi que les différences de croissance entre les différents systèmes de cultures proviennent d'autres effets que la fertilisation et la quantité de nitrate dans les sols.

Le modèle retenu afin d'expliquer les taux de croissance des caféiers comprend les effets du système de culture, la durée depuis la première mesure et l'âge du rameau. Le système sous ombrage pluri-spécifique permet d'atteindre des taux de croissance plus élevés que les autres systèmes. Ensuite la croissance de caféiers en condition de plein soleil est légèrement inférieure bien que le risque d'erreur dans l'affirmation de cette différence de croissance avec l'ombrage pluri-spécifique soit légèrement plus élevée (Pc = 0,11). A l'opposé, c'est dans un système associé à *E. Poeppigiana* que se trouvent les taux de croissance les plus faibles, inférieurs aux caféiers sous ombrage pluri-spécifique (Pc < 0,01). et aux caféiers d'une plantation en plein soleil avec aussi un risque d'erreur sur cette dernière affirmation plus élevée (Pc = 0,11).

Récapitulatif des niveaux de croissance végétative :			
	-	+ / -	+
Système de culture	*Erythrina peoppigiana*	Plein Soleil	Pluri-spécifique

II.2. Composantes du rendement par système de culture

Le rendement en café à l'échelle de la plante est négativement impacté par la quantité d'ombrage. Lorsque les densités d'ombrage sont > 25%, aucun fruit n'a été produit pour cette année 2015 et ce pour les deux systèmes agroforestiers étudiés. En condition de plein soleil la charge fruitière produite est en moyenne de 542,8 fruits/plante. Ce rendement a été déterminé par un taux de 2,46 fruits/nœud pour une moyenne de nœuds fruitiers par branche et de branches productives par plante de 4,2 et 3,2 respectivement.

Aucune diminution de rendement n'est observée quand l'ombrage est faible (≤25%) par rapport au plein soleil. Sous ombrage pluri-spécifique, la charge fruitière ne diffère pas significativement de celle obtenue en plein soleil (Pc = 0,99), bien que la tendance montre une diminution de la charge fruitière. Cette tendance est confirmée par les plus faibles taux de fruits/nœud, de nœuds/branche et du nombre de branches productives, -1,7 ; -2,2 et 29,6 respectivement (Pc respectifs de < 0,01 ; 0,02 et 0,04) (Figure 14). Sous ombrage d'*E. poeppigiana* le nombre de fruits/nœud et de nœuds/branche sont similaires à ceux observés en plein soleil (Pc = 0,83 et 0,99 respectivement). Le nombre de branches productives par plante est significativement supérieur sous ombrage d'*E. poeppigiana* en comparaison aux autres systèmes avec +35,0 branches par rapport aux caféiers de plein soleil et + 64,6 aux caféiers sous un ombrage pluri-spécifique de faible densité (Pc < 0,01).

Récapitulatif des niveaux des composantes du rendement :			
	-	+ / -	+
Charge fruitière	Pluri-spécifique / Plein soleil		*Erythrina peoppigiana*
Fruits/nœud	Pluri-spécifique	Plein soleil / *Erythrina peoppigiana*	
Nœuds/rameau	Pluri-spécifique	Plein soleil / *Erythrina peoppigiana*	
Rameaux/plante	Pluri-spécifique	Plein soleil	*Erythrina peoppigiana*

Discussion

I. Effets tampon des systèmes agroforestiers sur les températures

Le profil des températures obtenues au sein des parcelles sans ombrage est confirmé par les phénomènes énergétiques déjà décrits dans la littérature (Nobel, 1983). Les températures les plus extrêmes retrouvées à la surface des feuilles de caféiers est une conséquence directe de l'application du premier principe thermodynamique de l'équilibre énergétique. La feuille reçoit de l'énergie du rayonnement solaire et du rayonnement infra-rouge de son environnement et en libère par l'émission de rayonnement infra-rouge. Les forts rayonnements solaires en journée contraignent la feuille à compenser ces gains énergétiques par l'émission de chaleur. La transpiration est le moyen le plus efficace pour la plante d'émettre de la chaleur. Les feuilles de caféiers portant de relativement faibles densités de stomates, ce mode de déperdition d'énergie est limité, ce qui explique l'augmentation des températures maximales journalières que nous avons mesurées à la surface des feuilles de caféier (qui permettent d'augmenter le flux de chaleur sensible, l'autre moyen de perdre de l'énergie). La nuit au contraire, l'absence de rayonnement solaire inverse l'équilibre énergétique des feuilles. La feuille, dont l'environnement céleste devient plus froid qu'elle, a un bilan énergétique négatif, et par conséquent sa température diminue. La forte capacité thermique du sol explique une plus faible variation de température.

Les résultats de cette étude confirment partiellement l'effet tampon de l'arbre d'ombrage sur le microclimat avec une régulation diurne des températures : des températures maximales plus faibles et des températures minimales plus élevées (Victor L. Barradas, 1986; Heverly Morais, 2006; Siles et al., 2009; López-Bravo et al., 2012). Ces précédentes études n'ont toutefois pas permis d'identifier une variation de cet effet tampon selon le type d'ombrage. Cette étude a montré que ces deux ombrages affectent les températures de la caféière mais aussi que leurs impacts sur ces températures diffèrent. Les températures maximales du sol, des feuilles et de l'air, sont réduites sous ombrage, et en association avec *E. poeppigiana* cette réduction est plus efficace qu'en association pluri-spécifique. En revanche les systèmes agroforestiers étudiés ne présentent pas le comportement attendu des systèmes agroforestiers en termes d'augmentation des températures minimales journalières. Elles sont légèrement plus faibles pour les températures des surfaces foliaires et de l'air.

II. Différentes gestions des caféières et conséquences sur les températures

Cette incohérence des températures minimales sous ombrage peut s'expliquer au travers deux hypothèses. Tout d'abord, d'après nos observations de terrain, bien que les densités de plantation ne varient pas (**Tableau 1**), la densité de végétation (masse foliaire) diffère suivant les systèmes : la densité la plus faible est dans les plantations associées à une canopée pluri-spécifique. Effectivement les caféiers sous cet ombrage sont fortement taillés, de plus petite taille et présentent moins de rameaux plagiotropes. Les mesures de biomasse (longueur des rameaux plagiotropes) le confirment : les caféiers sous ombrage pluri-spécifique présentaient les rameaux les plus courts des 3 systèmes étudiés. Rappelons que la température des feuilles du caféier est mesurée à l'aide de 3 thermocouples branchés en série et placés sur une feuille de la partie basse, au milieu et en haut de la canopée du caféier. Une diminution de la densité de feuillage réduit la quantité d'auto-ombrage des feuilles et expose davantage les feuilles des parties basses de la plante au rayonnement. Cette situation a pour conséquence de réduire la quantité de rayonnement thermique provenant de l'environnement de la feuille et d'augmenter la quantité de rayonnement solaire diurne. Les températures des feuilles de cette partie basse sont ainsi augmentées de jour et diminuées la nuit ce qui, par conséquent, réduit la température mesurée de nuit sur l'ensemble de

la plante et l'augmente de jour. Les températures maximales des feuilles plus élevées sous ombrage pluri-spécifique en comparaison à une association avec *E. poeppigiana* sont cohérentes avec l'idée d'une plus faible densité de feuillage sous les ombrages pluri-spécifiques. Nous avons tenté de vérifier cette hypothèse par l'analyse des taux de croissance des différents rameaux. Nous nous attendions à observer une diminution du taux de croissance avec l'âge des rameaux (inversement lié à la hauteur du rameau sur la plante) plus faible sous ombrage pluri-spécifique que les autres systèmes étudiés. Finalement nous n'avons pas réussi à montrer une différence de l'effet de l'âge selon les systèmes de culture. En revanche, bien que la densité d'ombrage soit supérieure, les températures maximales et minimales du sol et de l'air y sont plus extrêmes en comparaison à l'ombrage d'*E. Poeppigiana*. Ces résultats semblent indiquer que les rayonnements pénètrent plus facilement dans la caféière et donc sont moins interceptés par les caféiers. L'état plus chétif des caféiers sous ombrage pluri-spécifique refléterait principalement d'une gestion moins intensive associée à ce système de culture et une meilleure gestion dans les autres systèmes, favorisant le développement des caféiers.

III. Effet du sol sur les températures du caféier

Si les températures minimales journalières plus fraîches sous ombrage qu'en plein soleil peuvent s'expliquer par la faible masse foliaire des caféiers dans le système associant caféiers et canopée pluri-spécifique, cette explication ne tient pas pour l'association avec *E. poeppigiana*. La nuit, les températures du sol peuvent avoir un effet sur les températures des feuilles situées proches de lui. Le sol accumule de la chaleur la journée et la retransmet à son environnement la nuit par des phénomènes de rayonnement et de conduction (Nobel, 1983). Ainsi lorsque la température du sol est plus élevée, et c'est notamment le cas des plantations en plein soleil en comparaison aux plantations associées à *E. poeppigiana*, les feuilles situées en bas de canopée reçoivent plus de chaleur venant du sol. Le sol moins protégé en plein soleil par de la litière et plus exposé au rayonnement solaire accumule plus de chaleur qu'un sol couvert par de la litière et ombragé.

Pourquoi les les températures minimales journalières des feuilles sont-elles plus basses en condition d'ombrage qu'en plein soleil :	
1- Cas de l'association caféiers – canopée pluri-spécifique	Plus faible densité de la végétation accélérant le refroidissement des feuilles
2- Cas de l'association caféiers – *E. poeppigiana*	Le sol permet un meilleur réchauffement nocturne des feuilles en conditions de plein soleil

IV. Augmentation de l'énergie cinétique des gouttes de pluie par l'arbre d'ombrage

Notre étude s'est ensuite portée sur un second effet d'importance de l'ombrage sur le microclimat d'une caféière qu'est l'interception des pluies. Dans la littérature sur l'agroforesterie, l'interception des pluies par les arbres d'ombrage est généralement considérée comme bénéfique, diminuant les risques d'érosion et de « splashing » des spores (Verbist et al., 2010; Gómez-Delgado et al., 2011; Boudrot et al., 2015). Il a été montré, en revanche, que l'énergie cinétique des pluies est augmentée sous couvert forestier (Scholten et al., 2011; Geißler et al., 2013; Goebes et al., 2015). La canopée intercepte la pluie et l'accumule sur son feuillage. Par conséquent, les gouttes qui tombent des feuilles des arbres sont plus grosses que les gouttes de pluie à l'extérieur, tandis que leur vitesse n'est guère plus élevée.

Notre étude est généralement conforme à ce qui a été montré dans les systèmes forestiers : en général, les arbres d'ombrage augmentent l'énergie cinétique des pluies. Mais cet effet n'est toutefois pas homogène, certains arbres ont clairement un effet très fort sur l'augmentation de l'énergie cinétique, comme *Cordia alliodora* (Annexe 6). Cette particularité a déjà été mentionnée par les producteurs de café au Costa Rica, qui considèrent que cette espèce favorise l'érosion du sol (Cerdán et al., 2012). En revanche les résultats indiquent que certaines espèces se comportent mieux pour transmettre une pluie similaire à celle qu'elle reçoit. C'est en particulier le cas de *E. poeppigiana* et *Inga edulis* , des espèces couramment associées aux caféiers dans les plantations d'Amérique Centrale. Ces espèces semblent donc plus efficaces dans la protection des sols contre l'érosion, mais aussi pour freiner la dispersion des pathogènes par splashing.

Les stratégies de lutte contre le changement climatique et notamment l'augmentation du taux de CO^2 dans l'atmosphère promeuvent la séquestration de carbone par la plantation d'arbres dans les systèmes agroforestiers (Montagnini and Nair, 2004). C'est le cas de *Cordia alliodora* et *Carapa guianensis* qui, comme nous le montrons, présentent des inconvénients pour la protection des sols contre l'érosion. Il pourrait être important de caractériser l'effet sur l'énergie cinétique des pluies des différentes espèces d'arbres d'ombrage utilisées dans les systèmes agroforestiers, pour éviter celles qui l'augmentent beaucoup, comme *Cordia alliodora*.

L'impact des gouttes de pluie à énergie cinétique élevée dépend fortement de l'exposition du sol minéral (Vis, 1986) : la présence d'une litière améliore fortement la protection du sol. Les sols les mieux couverts par de la matière organique sont présents en association avec *E. poeppigiana.* Ce système d'ombrage monospécifique minimise la compétition entre les arbres d'ombrage et avec les caféiers, ce qui par conséquent améliore la production de biomasse et de litière (Glover and Beer, 1986). L'association caféiers avec *E. poeppigiana* semble être un système agroforestier efficace dans la lutte contre l'érosion du sol.

V. Utilisation de « splashcups » pour mesurer l'énergie cinétique des gouttes de pluie

L'originalité de la démarche afin d'étudier l'effet de l'arbre d'ombrage sur la répartition des pluies a été de quantifier l'énergie cinétique des gouttes de pluie dans ces systèmes agroforestiers à l'aide de « splashcups ». Les principaux avantages de cette méthode reposent sur la simplicité de mesure et son coût relativement bas.

Les relations linéaires obtenues entre les énergies cinétiques estimées par les pertes de sable et les quantités de pluie et leur intensités maximales mesurées sur 10 mn confirment les relations obtenues par ses concepteurs entre la perte de sable et l'énergie cinétique des gouttes de pluie (Scholten et al., 2011). Cependant les pertes de sable que nous avons mesurées sont nettement plus élevées que celles obtenues lors des premiers travaux de calibration de Scholten *et al*. (2011). Les énergies cinétiques des pluies mesurées au Costa Rica sont environ 100 fois supérieures aux énergies mesurées dans les forêts de Chine. La différence entre ces deux travaux pourrait venir d'une plus grosse taille des gouttes de pluie mais il est très peu probable que cela augmente l'énergie cinétique de la pluie d'un facteur 100. Les « splashcups » ont été construits à l'identique du prototype publié par Scholten *et al*. (2011) et utilisé par Geißler *et al.* (2013). Une seconde hypothèse (plus probable) est que la perte de sable peut varier suivant l'origine du sable. Le sable utilisé dans notre étude est un sable de roche volcanique, récolté dans le secteur de Turrialba. Bien que la nature du sable utilisée dans la précédente étude ne soit pas précisée, nous pensons que la densité du sable varie. Une densité de sable moindre, et en particulier se rapprochant de la densité de l'eau aurait pour conséquence de faciliter l'éjection des grains de sable par les gouttes de pluie. Dans la mesure où les systèmes de mesure sont identiques pour

tous les arbres étudiés, le doute sur les énergies cinétiques n'a probablement aucune conséquence sur les comparaisons entre espèces d'arbre d'ombrage discutées dans la section précédente.

Selon Sholten (communication personnelle), le dispositif de mesure de l'énergie cinétique des pluies est très sensible à la hauteur du sable dans le cylindre, par un effet de bord. Nous l'avons vérifié dans la période de calibration en laissant le dispositif deux jours consécutifs sans mesure. Mais ce raisonnement s'applique aussi au cas où les pluies journalières correspondent à plusieurs événements distincts, les deuxième et/ou troisième pluies auront un effet moindre sur la quantité de sable éjecté, proportionnellement à leur intensité. Il est donc préférable de mesurer les énergies des gouttes de pluie sur un seul événement.

Enfin les mesures réalisées par le système de « splashcups » montrent une variabilité plus importante sous les arbres d'ombrage en comparaison à celles effectuées en plein soleil. De plus à certains endroits sous la canopée, les mesures de perte de sable sont inférieures à celles obtenues en plein soleil. Ces résultats décrivent le phénomène d'interception des pluies par la canopée, où les gouttes d'eau s'accumulent à certains endroits et protégeant ainsi le sol situées en dessous. Les gouttes d'eau plus grosses tombent au niveau de l'extrémité des feuilles avec une plus forte énergie cinétique.

VI. Effet de l'arbre d'ombrage sur la fertilité du sol

Les conséquences de l'arbre d'ombrage sur le risque d'érosion et la restitution de matière organique vont affecter le sol et maintenir ou non un équilibre dans le cycle des nutriments. Cet équilibre est dépendant de nombreux facteurs et particulièrement de l'espèce d'ombrage présente (Rapidel et al., 2015). Nous avons donc voulu tester si les différents systèmes d'ombrage affectent différemment ces cycles de nutriments. Pour cela nous avons réalisé des analyses sur l'état de l'azote minéral et organique du sol. Les résultats montrent que les plus forts taux de nitrate se trouvent dans les sols des plantations de caféiers associés avec *E. poeppigiana* et à l'inverse les sols les plus pauvres en nitrate dans les plantations en plein soleil. Sachant que les parcelles ombragées sont moins fertilisées que les plantations en plein soleil, ces quantités d'azote minéral soulignent l'apport important d'azote et plus généralement de nutriments par les arbres d'ombrage.

Lorsque nous comparons ces taux de nitrate entre différents emplacements à l'intérieur de ces plantations associées à *E. poeppigiana*, nous ne pouvons pas discerner de différence entre (i) le sol sous les caféiers et l'ombrage d'*E. poeppigiana* et (ii) le sol situé uniquement sous les caféiers en conditions de plein soleil. L'effet d'*E. poeppigiana* sur la quantité d'azote du sol ne peut donc pas être confirmé.

L'homogénéité du sol dans les plantations peut être expliquée par un effet moyen de l'espèce sur la parcelle, plutôt qu'un effet local. Le système racinaire d'*E. poeppigiana* peut s'étendre sur plus d'une dizaine de mètres et créer un réseau continu au sein de la parcelle. La décomposition des racines et de nodules fixateurs d'azote au niveau de ses racines favoriserait l'enrichissement du sol en azote minéral (Beer et al., 1998). De plus, la chute de feuilles et la coupe de rameaux des érythrines apportent une quantité importante de matière organique au sol et pourrait s'épandre sur des surfaces suffisamment éloignées de l'arbre pour enrichir le sol au niveau de la parcelle (Haggar et al., 2011). Ce rôle bénéfique des légumineuses sur la quantité de nitrate dans le sol a par ailleurs déjà été montré sur des systèmes agroforestiers de caféiers au Costa Rica (Gutierrez Castillo et al., 2004).

A la quantification de l'azote minéral du sol doit s'ajouter la quantification de la vitesse de minéralisation de l'azote organique afin d'estimer au mieux l'état de la situation azotée d'un sol. Nous ne montrons pas de différences entre les sols des plantations de plein soleil et en

association avec *E. poeppigiana.* Les meilleurs taux d'azote minéral retrouvés dans les plantations associées à *E. poeppigiana* pourraient alors être expliqués par une plus faible demande en azote du sol par la végétation. Quantifier la demande en azote du sol par la végétation est difficile, mais la caractérisation de la couverture du sol peut nous donner une idée sur le niveau de compétition pour les nutriments du sol que peut amener la présence de plantes adventices. Les résultats montrent qu'en plein soleil la quantité de plantes adventices est plus importante en comparaison aux plantations associées à *E. poeppigiana* et ces plantes sont probablement stimulées par un plus grand rayonnement solaire. La demande en azote des plantations de plein soleil pourrait donc bien être plus importante. De plus, *E. poeppigiana* est une espèce fixatrice d'azote atmosphérique et donc faiblement compétitrice pour l'alimentation azotée (Beer et al., 1998).

Enfin nous pouvons supposer que la matière organique présente dans les sols des plantations sous *E. poeppigiana*, sur laquelle est mesurée la vitesse de minéralisation, ne soit pas représentative de la source d'azote minéral du sol. Effectivement *E. poeppigiana* est principalement utilisée comme arbre d'ombrage pour sa qualité de fertilisant provenant de la fixation symbiotique de l'azote mais également de sa biomasse très facilement décomposable due au faible rapport C/N (Cerdán et al., 2012). La matière organique azotée provenant de cette espèce serait très rapidement décomposée par la biomasse microbienne à la surface du du sol et produirait une matière organique plus récalcitrante dans les cm inférieurs du sol (Cotrufo et al., 2013). Gutierrez Castillo et al. (2004) ont effectivement montré que les feuilles de légumineuses et notamment de *E. poeppigiana* se minéralisent plus rapidement que d'autre espèces non fixatrices. Ainsi la forte concentration de nitrate retrouvée dans les sols proviendrait de l'effet d'*E. poeppigiana*, mais la vitesse de minéralisation trop élevée n'a pas permis de le confirmer.

La quantité d'azote organique dans les sols de caféières sous ombrage pluri-spécifique est la plus élevée des trois systèmes étudiés, mais comme pour le cas d'*E. poeppigiana*, nous ne pouvons pas affirmer que la minéralisation de l 'azote organique du sol y est plus importante. Compte tenu des niveaux d'azote minéral similaires entre les systèmes à ombrage diversifié et en plein soleil, l'équilibre du cycle de l'azote ne peut être maintenu en raison d'une plus forte demande en azote par la végétation. La compétition entre les caféiers avec les arbres d'ombrage et les plantes adventices peuvent expliquer une plus importante consommation d'azote dans ce système. La texture des sols étant comparable entre les systèmes présents par localité, nous considérons l'effet du lessivage négligeable sur ces quantités d'azote inorganique dans les sols. Nous montrons qu'aucune espèce d'arbre d'ombrage ne présente d'effet négatif sur cette fourniture d'azote et que les sols sous l'ombrage des Musas et *Citrus sp* fournissent de meilleures quantités d'azote.

Nous avons appliqué une autre méthode afin de comparer la fertilité des sols par la mise en culture de jeunes plants de caféiers en serre sur des échantillons de sol provenant des parcelles étudiées. Les résultats correspondent partiellement aux conclusions des analyses d'azote du sol. Les espèces fixatrices d'azote semblent produire des sols plus favorables à la croissance des caféiers et confirment le bénéfice de ces espèces, en particulier *E. poeppigiana*, sur le cycle de l'azote. Contrairement à ce que montrent les analyses de minéralisation, les Musas semblent défavorables à la nutrition du caféier. On sait que la principale source de compétition entre café et Musa est la disponibilité en potassium, non mesurée dans notre étude. . Cependant la grande variabilité des résultats ne peut pas nous amener à conclure sur le réel effet des espèces d'ombrage. La croissance des plantes témoins sur sable montre que le caféier peut résister pendant plusieurs mois à une situation de carence sans affecter sa production de biomasse. Les observations de la couleur des feuilles nous permettent d'affirmer que les plantes cultivées sur sable souffraient d'une condition de carence. Les caféiers semblent donc montrer une capacité de dilution des nutriments au sein de la biomasse. L'effet de carence sur la biomasse pourrait

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

probablement être observé avec une plus longue durée d'expérience. Un essai similaire sur des échantillons provenant de sols sous différents ombrages montre que le maïs pourrait être un meilleur indicateur de la fertilité des sols et particulièrement de la disponibilité de l'azote (Gutierrez Castillo et al., 2004).

VII. Effet du type d'ombrage sur la production du caféier

La quantification de l'effet d'ombrage sur la croissance végétative du caféier a été menée par un suivi de la longueur de rameaux plagiotropes primaires. Il est reconnu que l'ombrage a un effet positif sur la croissance végétative du caféier en inhibant les bourgeons floraux et stimulant la croissance des rameaux (DaMatta, 2004; Descroix and Snoeck, 2004). Nos résultats signalent un effet contraire pour le cas d'un ombrage d' *E. poeppigiana* où la croissance des rameaux est supérieure à celle du plein soleil. À l'inverse, les caféiers croissent plus vite sous l'ombrage pluri-spécifique. Ces meilleures taux de croissance peuvent être la conséquence de l'effet d'ombrage mais aussi de l'effet de la gestion des parcelles sous ombrage pluri-spécifique. La taille plus fréquente des rameaux et donc le rajeunissement plus fréquents des axes orthotropes peuvent conduire à une plus forte stimulation de la croissance végétative des rameaux primaires.

Nous avons voulu expliquer la contradiction des croissances opposées entre les deux types d'ombrage par la densité de végétation. L'hypothèse sous-jacente est que l'auto-ombrage des caféiers peut être tel que les rameaux situés en bas de la plante sont en forte compétition pour la lumière. La conséquence de cette compétition conduirait à réduire la quantité de photosynthétats produits par la plante et donc à réduire la croissance végétative. Cette vérification est identique à l'analyse réalisée pour vérifier les températures des feuilles en partie basse de la plante et les résultats ne permettent pas de confirmer des variations de densité de la végétation selon les systèmes de culture.

L'analyse des composantes du rendement nous apporte un élément supplémentaire permettant de penser que la densité de végétation est supérieure dans les plantations associées à *E. poeppigiana*. En effet, le nombre de branches productives par plante est largement supérieur dans ce système d'ombrage (plus 35 à 65 branches en plus par plante) et serait probablement la conséquence d'une moindre mortalité de rameaux. Les effets de l'ombrage d'*E. poeppigiana* sur le microclimat et la fertilité du sol confirment cette idée. L'atténuation des températures extrêmement élevées évite l'exposition des caféiers aux fortes chaleurs provoquant généralement des dommages jusqu'à la mortalité de rameaux (DaMatta and Ramalho, 2006). De plus, la meilleure disponibilité des nutriments dans le sol couplée à la réduction de la quantité de lumière améliore l'équilibre nutritionnel des caféiers et réduit le risque de « die-back », c'est-à-dire de mortalité des rameaux par dessèchement (DaMatta, 2004). Par ailleurs, la meilleure production de fruits sous un faible ombrage (taux de couverture inférieur à 25%) d'*E. poeppigiana* affecte également la croissance végétative du caféier. Effectivement la compétition pour les photosynthétats entre les fruits et les parties végétatives conduit à réduire le taux de croissance végétative par rapport à un caféier ne produisant pas de fruits (Cannell, 1985). Les faibles valeurs de chacun des déterminants du rendement (nombre de fruits/nœud, nombre de nœuds/rameau productif et nombre de rameaux productifs/plante) dans les systèmes pluri-spécifiques à faible densité d'ombrage sont en faveur de cette hypothèse.

Les densités d'ombrage supérieures à 25% ne semblent pas bénéfiques pour la production quel que soit le type d'ombrage. Toutefois ces résultats doivent être considérés avec précaution. En effet, nous avons observé six parcelles présentant des densités d'ombrage variables mais aussi des qualités d'ombrage différentes (composition d'espèce, hauteur de canopée). Dans des conditions plus homogènes, des études ont montré que l'ombrage n'affecte pas la production de fruits en-dessous de 50 % d'ombrage (Soto-Pinto et al., 2000). De plus l'année 2015 se trouve

être une année intermédiaire entre 2 années de forte production. L'ensemble des parcelles avait donc un faible rendement, ce qui rend difficile la comparaison. En réalité, sur le long terme, les caféiers sous ombrage peuvent produire des rendements proches de ceux obtenus en plein soleil (Haggar et al., 2011).

VIII. Implications dans le choix du système d'ombrage

Les systèmes agroforestiers étudiés confirment l'effet bénéfique de l'ombrage sur l'agroécosystème à base de caféiers : l'atténuation des températures extrêmes et le maintien d'une fertilité du sol produisent un environnement moins stressant pour les caféiers (Beer et al., 1998; Descroix and Snoeck, 2004). La meilleure efficacité de régulation du microclimat et du cycle des nutriments serait apportée sous l'ombrage d'*E. poeppigiana*. L'absence d'effet négatif en relation avec l'interception des pluies dans ce système, montre qu'*E. poeppigiana* fournit une quantité de services écosystémiques favorable à la croissance et au développement du caféier, des services qui vont bien au-delà du rôle de l'Erythrine comme fixateur d'azote. Compte tenu des faibles niveaux de production discutés précédemment, nous constatons tout de même que la charge fruitière des caféiers sous l'ombrage d'*E. poeppigiana* peut augmenter en comparaison à une plantation de plein soleil.

Les résultats de cette étude coïncident avec les connaissances des agriculteurs. L'érythrine est un arbre très communément associé au caféiers en Amérique centrale et particulièrement au Costa Rica. Cette sélection par les agriculteurs a été faite à partir de leurs observations des conséquences de l'érythrine sur leur parcelle et la décrivent comme bénéfique pour le sol et la production des caféiers (Cerdán et al., 2012).

Les systèmes d'ombrage diversifié étudiés ne semblent pas aussi performants dans la fourniture de services écosystémiques favorisant la production de café. Les services écosystémiques ne sont pas indépendants et la fourniture de certains services peut réduire la production d'autres services. Il est alors question de compromis (trade-offs) entre les différents services fournis par les arbres d'ombrage. Les arbres, bien que pouvant affecter négativement la production, ont d'autres utilités. L'implantation d'espèces productrices de biomasse est généralement promue, par un système de paiement national, afin d'augmenter la séquestration de carbone atmosphérique et d'atténuer les effets du changement climatique (Montagnini and Nair, 2004). Les arbres peuvent aussi diversifier les productions de l'agriculteur, améliorant ainsi ses revenus et son auto-consommation (Toledo and Moguel, 2012).

Conclusion et Perspectives

Le système agroforestier associant caféiers et *Erythrina poeppigiana* est identifié comme le système fournissant la plus grande quantité de services écosystémiques affectant la production de café : régulation des températures, cycle des nutriments et croissance et fructification du caféier. Cependant l'importance de ces services dépend essentiellement de l'état et le type de gestion de la caféière associés au système de culture (fréquence et intensité de la taille et de la fertilisation).

L'effet tampon de l'ombrage sur les températures extrêmes du microclimat (air, sol et feuille) est vérifié uniquement sur les températures maximales journalières et sont plus fortement réduites dans les plantations associées à *E. poeppigiana* qu'associées à une canopée pluri-spécifique.

La quantification de l'énergie cinétique des gouttes de pluie confirme l'idée que l'arbre d'ombrage peut augmenter cette énergie cinétique et certaines espèces comme *Cordia alliodora* peuvent l'affecter plus fortement. D'autres comme *E. poeppigiana* ne semblent pas affecter les

gouttes de pluie. Ces résultats motivent à poursuivre les mesures d'énergie cinétique mais sur plus d'espèces d'arbres d'ombrage et avec plus de répétitions par espèce afin de comprendre de quelles caractéristiques de la canopée dépend cet effet sur la répartition des pluies.

Les deux approches utilisées afin d'estimer la fertilité du sol montrent des résultats convergent. Nous avons constaté dans chacune des expérimentations (bioessai et analyse de minéralisation) que les espèces fixatrices d'azote améliorent la disponibilité des nutriments dans le sol. La mesure de croissance *ex situ* des caféiers (bioessai) a été réalisée sur une période 4 mois et semble trop courte afin de distinguer des différences significatives sur les niveaux de biomasses entre les traitements. Des mesures de concentrations foliaire d'éléments nutritifs (N et P en particulier) pourraient améliorer la précision de nos résultats.

Enfin le taux de croissance *in situ* semble être lié négativement à la charge fruitière des caféiers mais pas nécessairement à une situation ombragée. La charge fruitière la plus élevée est produite en système d'ombrage avec *E. poeppigiana* et la moins élevée en système d'ombrage pluri-spécifique.

Cette étude s'est déroulée pendant une année de faible production pour l'ensemble des parcelles et une thèse actuellement en cours au Costa Rica sur l'évaluation de la production de différents systèmes agroforestiers permettra de préciser les effets du type d'ombrage en meilleures conditions de production. Aussi la prise en compte d'autre services écosystémiques que peuvent apporter les arbres d'ombrage (production alimentaire, revenus supplémentaire, etc) fournira plus d'information sur les compromis (trade-offs) qui existent entre ces services et enfin une meilleure identification des conséquences pour le choix d'un type d'ombrage.

Rapport-Gratuit.com

Bibliographie

Alcamo J, Bennett EM, Millennium Ecosystem Assessment (Program), eds (2003) Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Island Press, Washington, DC

Altieri MA (1999) The ecological role of biodiversity in agroecosystems. Agriculture, Ecosystems & Environment **74**: 19–31

Avelino J, Cristancho M, Georgiou S, Imbach P, Aguilar L, Bornemann G, Läderach P, Anzueto F, Hruska AJ, Morales C (2015) The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. Food Sec **7**: 303–321

Avelino J, Hoopen GMT, 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 / Rapidel Bruno (ed.), DeClerck Fabrice (ed.), Le Coq Jean-Francois (ed.), Beer John (ed.). Earthscan Publications, Londres, pp 91–117

Baca M, Läderach P, Haggar J, Schroth G, Ovalle O (2014) An Integrated Framework for Assessing Vulnerability to Climate Change and Developing Adaptation Strategies for Coffee Growing Families in Mesoamerica. PLoS ONE **9**: e88463

Bazzaz FA, Sombroek WG (1996) Global Climate Change and Agricultural Production: Direct and Indirect Effects of Changing Hydrological, Pedological and Plant Physiological Processes. Food & Agriculture Org.

Beer J, Muschler R, Kass D, Somarriba E (1998) Shade management in coffee and cacao plantations. *In* PKR Nair, CR Latt, eds, Directions in Tropical Agroforestry Research. Springer Netherlands, pp 139–164

Boudrot A, Pico J, Merle I, Granados E, Vílchez S, Tixier P, Virginio Filho E d. M, Casanoves F, Tapia A, Allinne C, et al (2015) Shade effects on the dispersal of airborne Hemileia vastatrix uredospores. Phytopathology Submitted:

Bunn C, Läderach P, Rivera OO, Kirschke D (2014) A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. Climatic Change **129**: 89–101

Cannavo P, Sansoulet J, Harmand J-M, Siles P, Dreyer E, Vaast P (2011) Agroforestry associating coffee and Inga densiflora results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. Agriculture, Ecosystems & Environment **140**: 1–13

Cannell MGR (1985) Physiology of the Coffee Crop. *In* MN Clifford, KC Willson, eds, Coffee. Springer US, pp 108–134

Cerdán CR, Rebolledo MC, Soto G, Rapidel B, Sinclair FL (2012) Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. Agricultural Systems **110**: 119–130

Charbonnier F (2013) Mesure et modelisation des bilans de lumiere, d'eau, de carbone et de productivite primaire nette dans un systeme agroforestier a base de cafeier au Costa Rica. These. These de doctorat : Biologie vegetale et forestiere

Cotrufo MF, Wallenstein MD, Boot CM, Denef K, Paul E (2013) The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? Glob Change Biol **19**: 988–995

DaMatta FM (2004) Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. Field Crops Research **86**: 99–114

DaMatta FM, Ramalho JDC (2006) Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. Brazilian Journal of Plant Physiology **18**: 55–81

Descroix F, Snoeck J (2004) Environmental Factors Suitable for Coffee Cultivation. *In* JN Wintgens, ed, Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production. Wiley-VCH Verlag GmbH, pp 164–177

FAO (2013) Climate Smart Agriculture Sourcebook.

FAOSTAT (2015) FAOSTAT. FAOSTAT, http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E

Geißler C, Nadrowski K, Kühn P, Baruffol M, Bruelheide H, Schmid B, Scholten T (2013) Kinetic Energy of Throughfall in Subtropical Forests of SE China – Effects of Tree Canopy Structure, Functional Traits, and Biodiversity. PLoS One. doi: 10.1371/journal.pone.0049618

Glover N, Beer J (1986) Nutrient cycling in two traditional Central American. Agroforest Syst **4**: 77–87

Goebes P, Seitz S, Kühn P, Li Y, Niklaus PA, Oheimb G von, Scholten T (2015) Throughfall kinetic energy in young subtropical forests: Investigation on tree species richness effects and spatial variability. Agricultural and Forest Meteorology **213**: 148–159

Gómez-Delgado F, Roupsard O, Le Maire G, Taugourdeau S, Pérez A, van Oijen M, Vaast P, Rapidel B, Harmand JM, Voltz M, et al (2011) Modelling the hydrological behaviour of a coffee agroforestry basin in Costa Rica. Hydrology and Earth System Sciences **15**: 369–392

Gutierrez Castillo M, Harmand JM, Dambrine E (2004) Disponibilidad de nitrogeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de #Coffea arabica#. Agroforesteria en Las Americas **11**: 69–76

Haggar J, Barrios M, Bolaños M, Merlo M, Moraga P, Munguia R, Ponce A, Romero S, Soto G, Staver C, et al (2011) Coffee agroecosystem performance under full sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America. Agroforest Syst **82**: 285–301

Heverly Morais PHC (2006) Microclimatic characterization and productivity of coffee plants grown under shade of pigeon pea in Southern Brazil. Pesquisa Agropecuária Brasileira **41**: 763–770

Houghton J (2003) Global Warming :: The Complete Briefing, 3 edition. Cambridge University Press

Imbach P, Fung E, Ciais P, Imbach P, Locatelli B, Calderer L, Bruno Locatelli, Juan Carlos Zamora, Luis Molina, Juan Carlos Zamora (2015) Impacts of climate change on ecosystem hydrological services of Central America. Climate Change Impacts on Tropical Forests in Central America: An ecosystem service perspective

International Coffee Organization (2015) International Coffee Organization - Trade Statistics Tables. http://www.ico.org/trade_statistics.asp

Klute A, Page AL, eds (1982) Methods of soil analysis, 2nd ed. American Society of Agronomy : Soil Science Society of America, Madison, Wis

Läderach P, Haggar J, Lau C, Eitzinger A, Ovalle O, Baca M, Jarvis A, Lundy M (2010) Mesoamerican Coffee: Building a Climate Change Adaptation Strategy. 4

Lasco RD, Delfino RJP, Espaldon MLO (2014) Agroforestry systems: helping smallholders adapt to climate risks while mitigating climate change. WIREs Clim Change **5**: 825–833

Lemon PE (1956) A Spherical Densiometer For Estimating Forest Overstory Density. Forest Science **2**: 314–320

López-Bravo DF, Virginio-Filho E de 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

Maestri M, Barros RS (1977) CHAPTER 9 - Coffee. *In* P de TAT Kozlowski, ed, Ecophysiology of Tropical Crops. Academic Press, pp 249–278

Mahlstein I, Knutti R, Solomon S, Portmann RW (2011) Early onset of significant local warming in low latitude countries. Environ Res Lett **6**: 034009

Montagnini F, Nair PKR (2004) Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. Agroforestry Systems **61-62**: 281–295

Neelin JD, Münnich M, Su H, Meyerson JE, Holloway CE (2006) Tropical drying trends in global warming models and observations. PNAS **103**: 6110–6115

Nobel PS (1983) Biophysical plant physiology and ecology. 608pp.

Oreskes N (2004) The Scientific Consensus on Climate Change. Science **306**: 1686–1686

Ovalle-Rivera O, Läderach P, Bunn C, Obersteiner M, Schroth G (2015) Projected Shifts in Coffea arabica Suitability among Major Global Producing Regions Due to Climate Change. PLoS ONE **10**: e0124155

Pérez-Harguindeguy N, Díaz S, Garnier E, Lavorel S, Poorter H, Jaureguiberry P, Bret-Harte MS, Cornwell WK, Craine JM, Gurvich DE, et al (2013) New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. Aust J Bot **61**: 167–234

Rapidel B, Allinne C, Cerdan C, Meylan L, Filho EV, Avelino J (2015) Efectos ecologicos y

productivos del asocio de arboles de sombra con cafe en sistemas agroforestales. Sistemas Agroforestales. Funciones Productivas, Socioeconomicas y Ambientales / Montagnini F. ; Somarriba E. ; Murgueitio E. ; Fassola H. ; Eibl B. (eds.). CATIE, Colombia, pp 5–20

Rauscher SA, Giorgi F, Diffenbaugh NS, Seth A (2008) Extension and Intensification of the Meso-American mid-summer drought in the twenty-first century. Clim Dyn **31**: 551–571

Scholten T, Geißler C, Goc J, Kühn P, Wiegand C (2011) A new splash cup to measure the kinetic energy of rainfall. Z Pflanzenernähr Bodenk **174**: 596–601

Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2009) Connecting Biodiversity and Climate Change Mitigation and Adaptation: Report of the Second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change. Montreal

Siles P, Harmand J-M, Vaast P (2009) Effects of Inga densiflora on the microclimate of coffee (Coffea arabica L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. Agroforest Syst **78**: 269–286

Soto-Pinto L, Perfecto I, Castillo-Hernandez J, Caballero-Nieto J (2000) Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. Agriculture, Ecosystems & Environment **80**: 61–69

Souza HN de, de Goede RGM, Brussaard L, Cardoso IM, Duarte EMG, Fernandes RBA, Gomes LC, Pulleman MM (2012) Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. Agriculture, Ecosystems & Environment **146**: 179–196

St.Clair SB, Lynch JP (2010) The opening of Pandora's Box: climate change impacts on soil fertility and crop nutrition in developing countries. Plant Soil **335**: 101–115

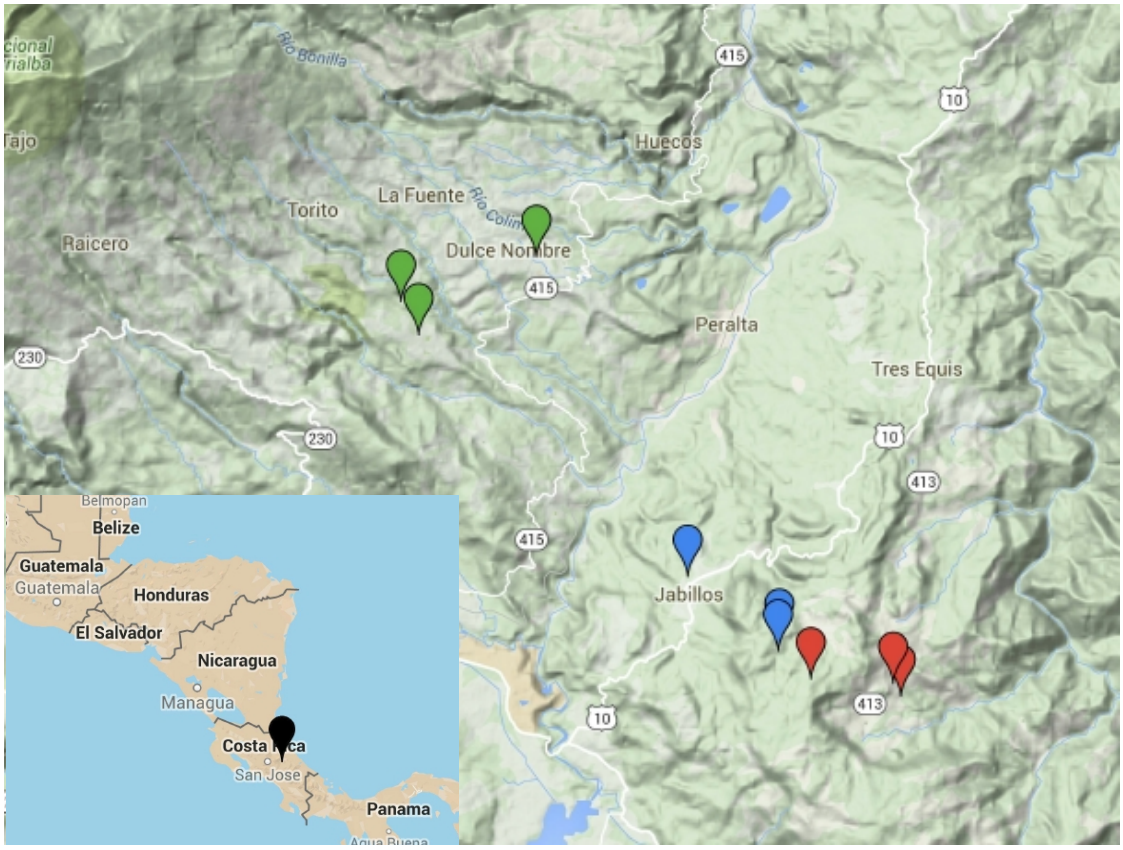
Toledo VM, Moguel P (2012) Coffee and Sustainability: The Multiple Values of Traditional Shaded Coffee. Journal of Sustainable Agriculture **36**: 353–377

Verbist B, Poesen J, van Noordwijk M, Widianto, Suprayogo D, Agus F, Deckers J (2010) Factors affecting soil loss at plot scale and sediment yield at catchment scale in a tropical volcanic agroforestry landscape. CATENA **80**: 34–46

Victor L. Barradas LF (1986) Microclimatic characterization of shaded and open-grown coffee (Coffea Arabica L.) plantations in Mexico. Agricultural and Forest Meteorology **38**: 101–112

Vis M (1986) Interception, drop size distributions and rainfall kinetic energy in four colombian forest ecosystems. Earth Surf Process Landforms **11**: 591–603

Annexe 1 : Localisation du réseau de parcelle



Localités :

- La suiza (rouge)
- Pavones (bleu)
- Santa Teresita (vert)

Annexe 2 : Calcul des quantités d'intrant azoté

Localité	Système de culture	Année	Mois	Produit	Surface traité	Quantité par application	Quantité par application	Quantité d'azote	Quantité d'azote
Unité					ha	qq	kg	kg	kg/ha
La Suiza	Plein soleil	2014	Février	Nutrán	0,15	2	92	30,8	205,5
La Suiza	Plein soleil	2014	Juin	Fórmula completa	0,15	1,5	69	9,0	59,8
La Suiza	*E. poeppigiana*	2014	Mars	Nutrán	0,5	5	230	77,1	154,1
La Suiza	*E. poeppigiana*	2014	Juin	Fórmula completa	0,5	5	230	29,9	59,8
La Suiza	Diversifié	2014	Juin	Nutrán	0,35	2	92	30,8	88,1
Pavones	Plein soleil	2014	Mai	Nutrán	0,25	2	92	30,8	123,3
Pavones	*E. poeppigiana*	2014	Mai	Nutrán	1	4	184	61,6	61,6
Santa Teresita	Plein soleil	2014	Mars	Nutrán	1	5	230	77,1	77,1

Localité	Système de culture	Quantité d'azote (kg/ha)
La Suiza		
	Plein soleil	265,3
	E. poeppigiana	213,9
	Diversifié	88,1
Pavones		
	Plein soleil	123,3
	E. poeppigiana	61,6
Santa Teresita		
	Plein soleil	77,1

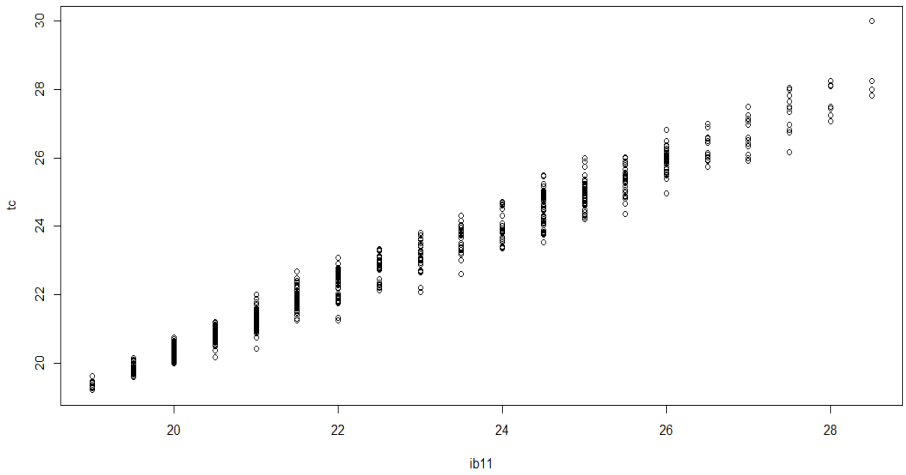
Annexe 3 : Calibration des iButtons

Dispositif

Afin de calibrer mesures réalisées par les iButton aux mesures obtenues par les thermocouples, tous les iButton utilisés ont été placés avec un thermocouple dans une même protection météorologique. L'ensemble des thermomètres a été placé en condition de plein soleil pendant une semaine.

Transformation des températures

La relation linéaire entre les températures du thermocouple et les températures de l'Ibutton nous permet d'obtenir les coefficients de cette relation, propre à chaque iButon. L'application de ces coefficients sur les températures provenant des iButtons fournie des températures comparables à celles obtenue par les thermocouples.



	b	a
ib1	1.47234965	0.9175325
ib5	1.48384383	0.94026531
ib6	1.80362959	0.91469462
ib8	1.57103331	0.92858956
ib9	1.56089949	0.92274628
ib10	1.56089949	0.92274628
ib11	1.72682809	0.93233344

La correction des températures mesurées par les iButton a été réalisée par l'équation suivante :

Tr = a x Tm + b

Tr : Température réelle

Tm : température mesurées

a et b/ coefficients des regréssion linéaire propre à l'Ibutton

Annexe 4 : Calibration des pluviomètres

Dispositif

Un système de goutte à goutte est réalisé à l'aide d'une burette puis placée au-dessus du pluviomètre à calibrer. Un volume de 20 mL d'eau est introduit dans la burette et laissé s'écouler dans le pluviomètre à différentes intensités. Le temps que met l'eau à s'écouler ainsi que le nombre de mesure (basculement) du pluviomètre sont relevés. Le volume restant dans l'auge du pluviomètre est soustrait au 20mL versés afin d'en déduire le volume réellement versé. L'intensité réellement appliquée est calculé à partir du volume réellement versé (mm3), de la surface du pluviomètre (mm) ainsi que du temps effectué pour versée le volume d'eau (heure).

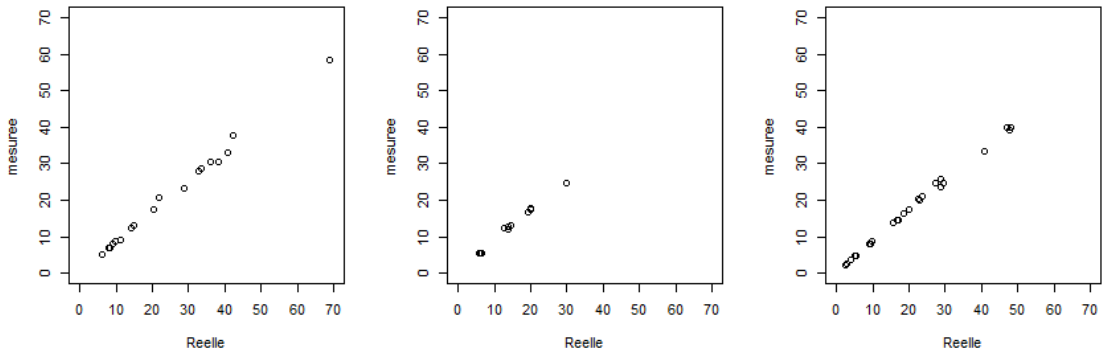
Iréelle = Eauversé/(surfacepluviomètre*Temps)

De même l'intensité mesurée par le pluviomètre est calculée à partir de la quantité d'eau que renseigne le pluviomètre (mm) :

Imesurée = Eaumesurée/(surfacepluviomètre*Temps)

Relation entre les intensités de pluie

La relation linéaire entre ces deux intensités permet d'obtenir un coefficient à appliquer sur les intensités de pluies mesurées pour connaître les intensités de pluie réellement survenue.



Annexe 5 : Photographies de Splashcups

En plein soleil

Sous l'ombrage de Cordia alliodora

Disposition d'un splashcup (plein soleil)

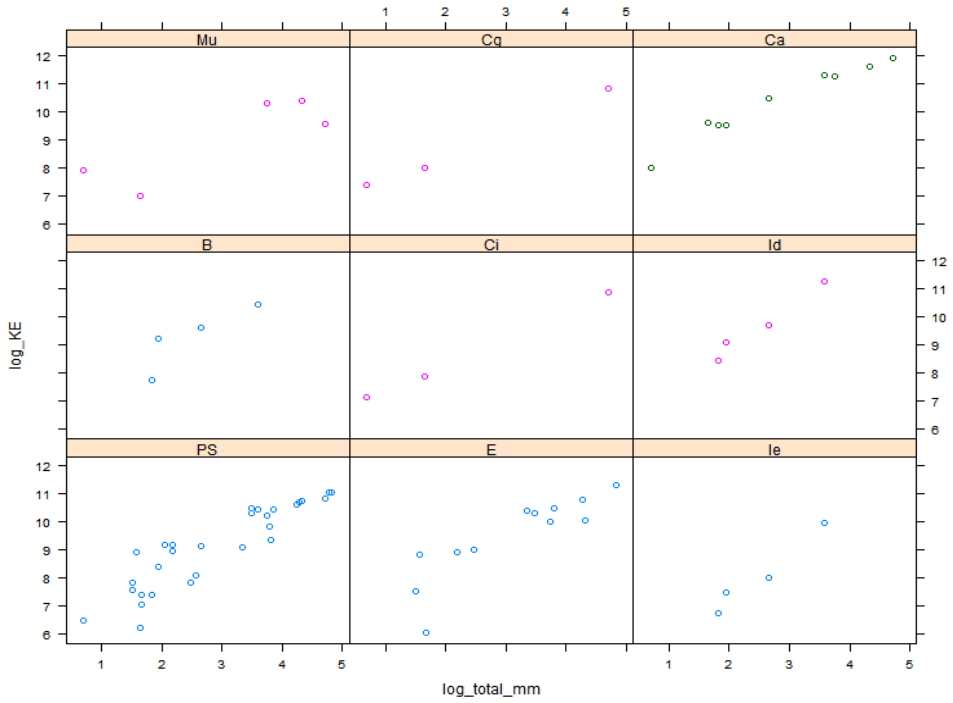
Sous l'ombrage de E. poeppigiana

Annexe 6 : Relations entre l'énergie cinétique des gouttes et la quantité de pluie mesurée

Les différentes conditions correspondent à la présence et aux différentes espèces d'arbre d'ombrage.

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*

Les points représente la moyenne de 5 répétitions.



Diplôme / Mention : Master 2 Sciences Technologie Santé
Mention Biologie Agronomie Santé

Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV)

Parcours II. Sélection, Production et Valorisation des Végétaux (SPVV)

Option : Production Végétale Intégrée

Responsable d'option : M. Carof

Auteur(s) :Meven Cabon

Date de naissance* :22/11/1992

Organisme d'accueil :CIRAD

Adresse :CATIE, Turrialba, COSTA RICA

Co-encadrants :

K. Van den Meersche ; B. Rapidel ; J. Avelino

Nb pages 33: Annexes : 6

Année de soutenance : 2015

Titre français :Effet de l'ombrage sur le microclimat, la fertilité du sol et la croissance et le rendement du caféier, au Costa Rica

Titre anglais : Effect of shade on microclimate, soil fertility, coffee growing and yield, in Costa Rica

Résumé :La culture du café (Arabica) en Amérique centrale est gravement menacée par le changement climatique. L'agroforesterie est présentée comme une solution prometteuse pour lutter contre les événements climatiques extrêmes (températures élevées et fortes pluies) et maintenir un équilibre dans le cycle des nutriments. En revanche aucun type d'agroforêt n'est aujourd'hui connu pour optimiser ces effets. Notre objectif était d'étudier les effets de deux types d'ombrage : *E. poeppigiana*, couramment utilisé au Costa Rica et un ombrage pluri-spécifique, sur le microclimat, la fertilité du sol, la croissance végétative et le rendement du caféier, en comparaison à un système plein soleil. L'originalité de cette étude était de quantifier l'énergie cinétique de la pluie dans des systèmes agroforestiers. Nous avons mesuré des énergies cinétiques plus fortes sous ombrage et en particulier sous certains arbres comme *Cordia alliodora*. D'autres espèces, comme *E. poeppigiana* ne montrent pas d'effet. De plus en association avec *E. poeppigiana*, l'effet tampon des températures est plus efficace et la fertilité du sol semble plus favorable, ce qui est cohérent avec le nombre de fruit produit plus élevé que dans les autres plantations. Ce système agroforestier permettrait de mieux s'adapter au changement climatique mais la gestion des caféiers (taille, fertilisation) doit être prise en compte.

Abstract :Arabica coffee in Mesoamerica is seriously threatened by climate change. Agroforestry seems to be a promising way to fight against extreme climatic events (high temperatures and intense rainfall) and maintain a balance in nutrient cycle. By contrast no shade type is known to optimise these effects. The objective was to investigate the impact of two shade type in real cultivation conditions : *E. poeppigiana*, a common tree shade in Costa Rica and multispecific shade, on microclimate, soil fertility, vegetative growth and yield of shaded coffee in comparison to full sun system. The uniqueness of this study was to quantify kinetic energy of rainfall in agroforest systems. Kinetic energy was higher under shade and especially for some tree as *Cordia alliodora*. No effect was observed for other species as *E. poeppigiana*. Thus, buffering effects on temperature and soil fertility was better under *E. poeppigiana* shade which is consistent with the higher yield estimated than the other coffee plantations. Coffee associated with *E. poeppigiana* would allow a better adaptation of climate change but the coffee management (pruning and fertilisation) should be taken in account.

Mots-clés :*Coffea arabica*, Changement climatique, Agroforesterie, *Erythrina poeppigiana*, Érosion du sol, Énergie cinétique des gouttes de pluie, Minéralisation de l'azote

Key Words: *Coffea arabica*, Climate change, Agroforestry, E*rythrina poeppigiana*, Soil erosion, Kinetic energy of raindrop, Ntrate mineralisation

	Surface	Altitude	Pente	Sable	Limon	Argile	Age	Densité
La Suiza								
Plein soleil	0,2	950	45	55,8	25,7	18,5	3	4116,4
E. poeppigiana	0,5	882	25	47,7	22,0	30,3	20	4652,9
Diversifié	0,4	890	15	33,4	33,6	33,0	10	4128,0
Pavones								
Plein soleil	0,3	995	35	59,8	13,9	26,3	10	5963,5
E. poeppigiana	1,0	987	0	83,5	13,6	2,9	27	3699,6
Diversifié	2,0	827	36	59,8	14,1	26,1	40	4570,3
Santa Teresita								
Plein soleil	1,0	940	20	71,9	17,8	10,3	30	4807,7
E. poeppigiana	6,0	1 069	9	71,8	21,6	6,6	25	4817,7
Diversifié	0,3	1 030	11	74,0	20,1	5,9	30	4323,9

Tableau 1 : Caractéristiques des parcelles d'études : surface (ha) ; altitude (mslm), pente(%) ; granulométrie (% terre fine) ; âge de la parcelle (an, estimé par l'âge du plus vieux caféier) ; densité (plante .ha^{-1})

	Nom scientifique	Famille	Usage	Abréviation
La Suiza				
Plein soleil	-	-	-	-
E. poeppigiana	*Erythrina poeppigiana*	Papilionoideae	Ombrage	E
Diversifié	*Cordia alliodora*	Boraginaceae	Production de bois	Ca
	Carapa guianensis	Meliaceae	Production de bois	Cg
	Cedrela odorata	Meliaceae	Production de bois	Co
	Citrus	Rutaceae	Production de fruits	Ci
	Musa sp.	Musaceae	Production de fruits	Mu
	Citrus	Rutaceae	Production de fruits	Ci
Pavones				
Plein soleil	-	-	-	-
E. poeppigiana	*Erythrina poeppigiana*	Papilionoideae	Ombrage	E
Diversifié	*Inga edulis*	Mimosoideae	Production de fruits	I
	Inga densiflora	Mimosoideae	Production de fruits	I
	Bactris gasipaes	Arecaceae	Production de fruits	B
	Cordia alliodora	Boraginaceae	Production de bois	Ca
	Erythrina poeppigiana	Papilionoideae	Ombrage	E
Santa Teresita				
Plein soleil	-	-	-	-
E. poeppigiana	*Erythrina poeppigiana*	Papilionoideae	Ombrage	E
Diversifié	*Musa sp.*	Musaceae	Production de fruits	Mu
	Cordia alliodora	Boraginaceae	Production de bois	Ca
	Erythrina poeppigiana	Papilionoideae	Ombrage	E

Tableau 2:Liste des espèces d'arbre d'ombrage des différentes parcelles

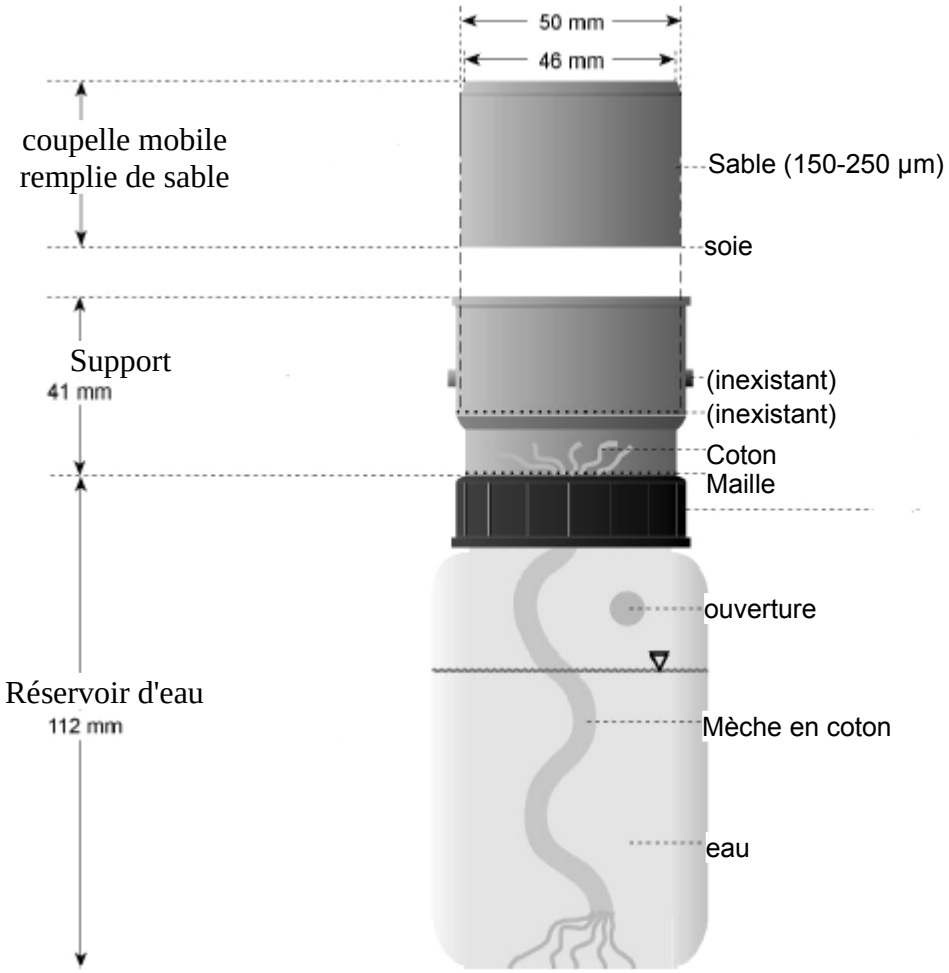


Figure 1:Composants du « splash cup » (Scholten et al., 2011)

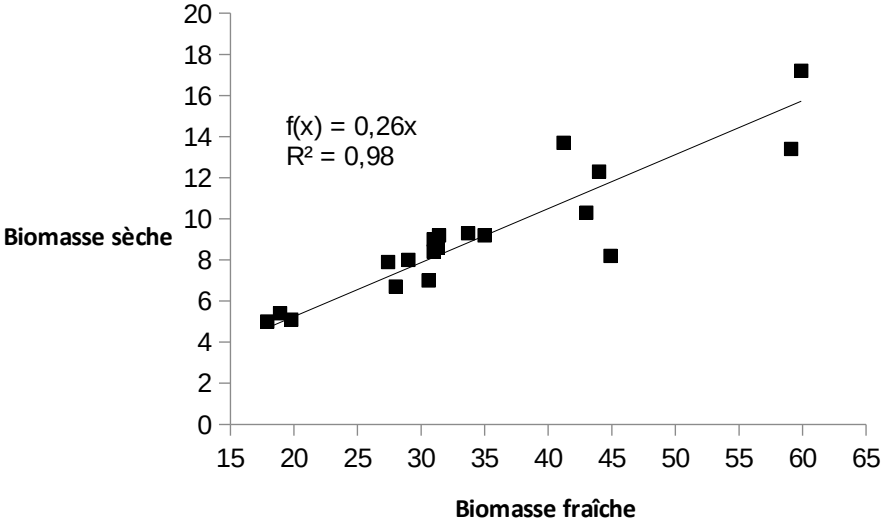


Figure 2 :Relation entre la biomasse fraîche (g) et la biomasse sèche (g) de 20 individus (2 jeunes caféiers par individu) choisis aléatoirement parmi les caféiers cultivé pendant 4 mois en serre.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

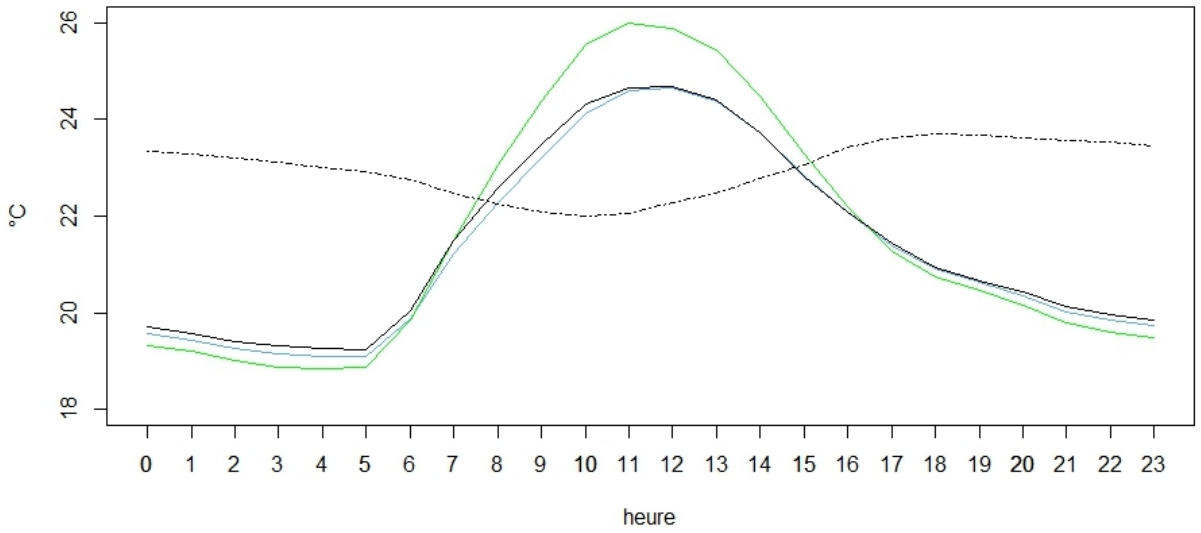


Figure 3 : Évolution journalière des températures : air (courbe bleue), surface foliaire du caféier (courbe verte) et sol (courbe en pointillé), de plantations caféières en condition de plein soleil et de la température de l'air externe à la parcelle (courbe noire).

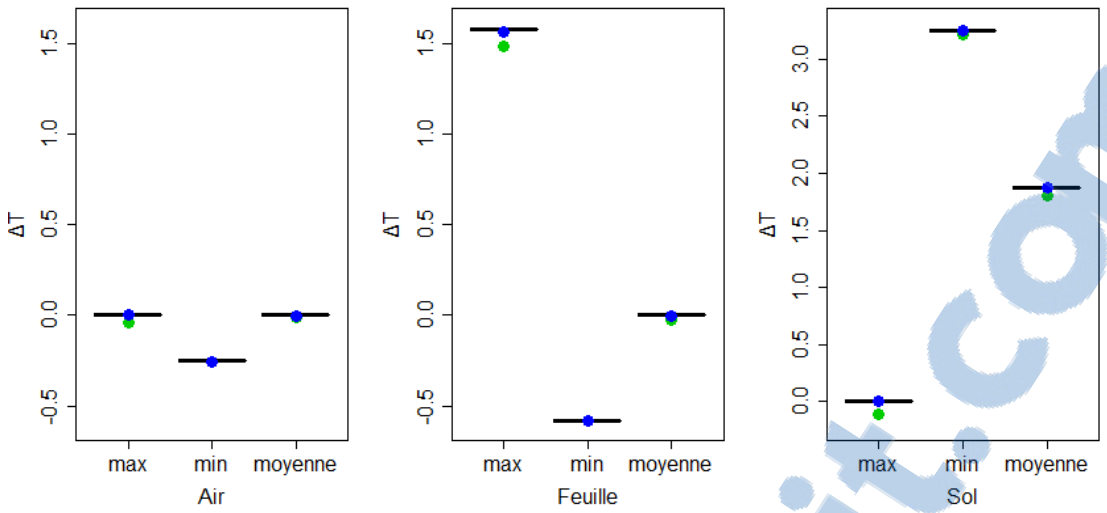


Figure 4 : Différences entre les températures (°C) maximales, minimales et moyennes de la caféière en (air, feuilles et sol), et une référence plein soleil placée à l'extérieur de la plantation. Les différences de température ont été estimées par un modèle linéaire mixte et associant les densité d'ombrage (%) et les systèmes de culture : plein soleil (segment noir), association avec E ; poeppigiana (point vert) et association pluri-spécifique (point bleu).

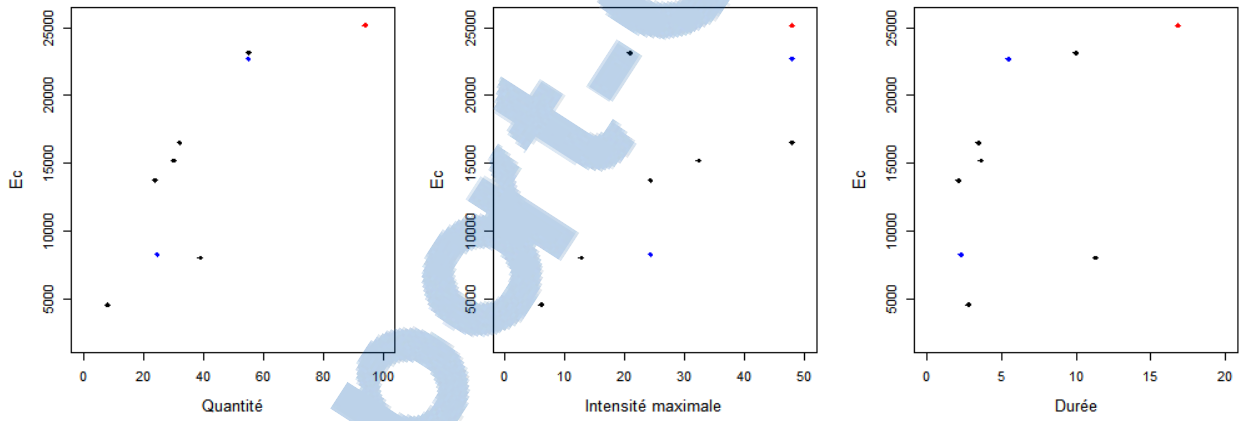


Figure 5 : Relations entre l'énergie cinétique ($J.m^2$) et le la quantité (mm),l'intensité maximale ($mm.h^{-1}$) de la pluie. Les énergies ont été mesurées sur une pluie (points noirs), deux pluies (points bleus) et trois pluies (points rouges)

Rapport-Gratuit.com

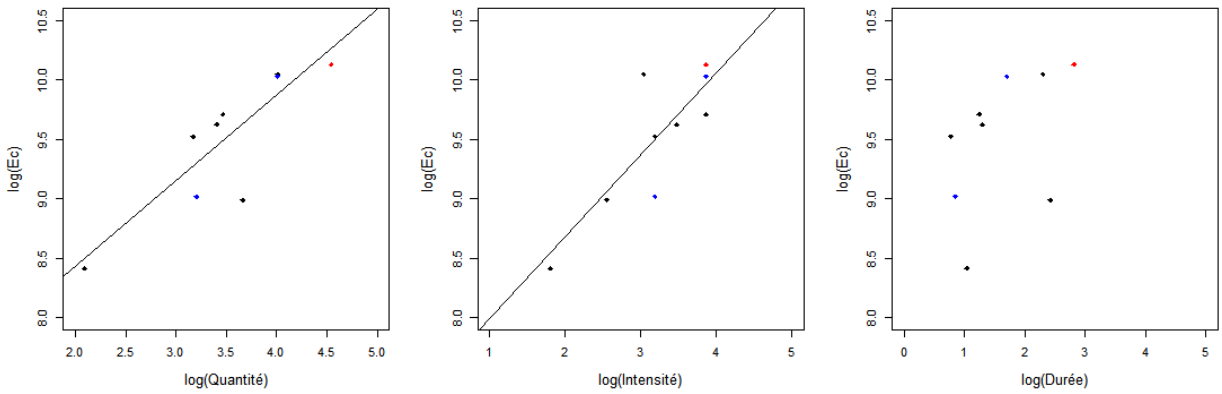


*Figure 6 :*Relations entre le logarithme de l' énergie cinétique (log(J.m^2)) et le logarithme de la quantité (log(mm)) ou le logarithme de l'intensité maximale (log(mm.h^{-1})) de la pluie. Les énergies ont été mesurées sur une pluie (points noirs), deux pluies (points bleus) et trois pluies (points rouges)

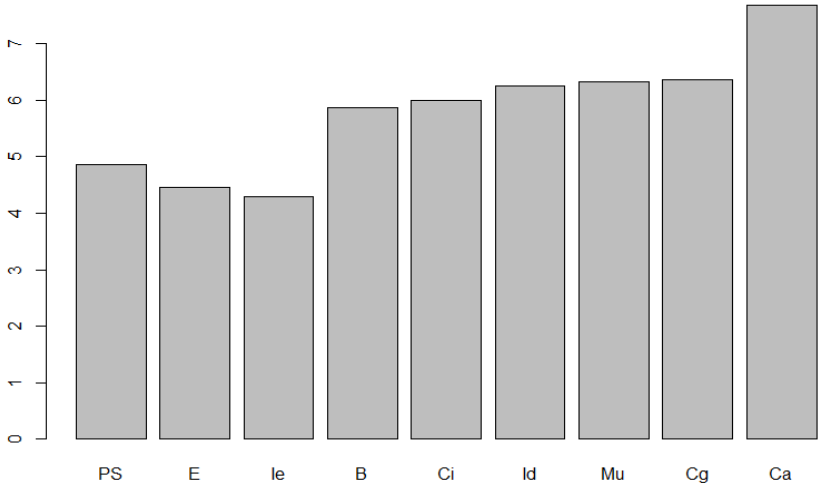


Figure 7 : Logarithme de l'énergie cinétique des gouttes de pluie en plein soleil et pour chaque espèce d'arbre (PS : plein soleil ; E : E. poeppigiana ; Ie : Inga edulis ; B :Bactris gasipaes ; Ci : Citrus sp; Id : Inga densiflora, Mu : Musa sp. ; Cg : Carapa guianensis; Ca : Cordilla alliodora

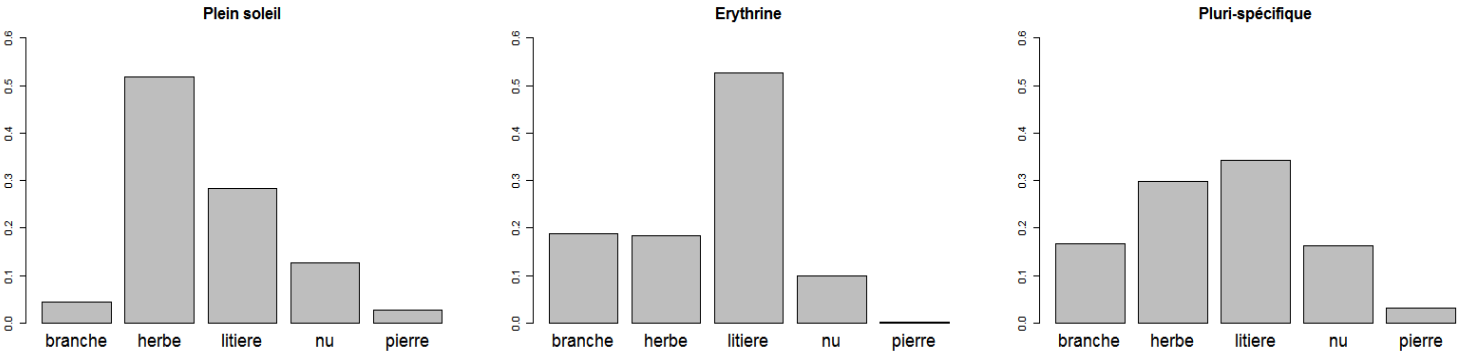


Figure 8 : Caractérisation de la couverture du sol des différents systèmes de culture étudiées (en % de couverture du sol) : Plantation de plein soleil, associées à E. poeppigiana et associée à une canopée pluri-spécifique. Une barre correspond à la fréquence d'observation sur 460 observations totales.

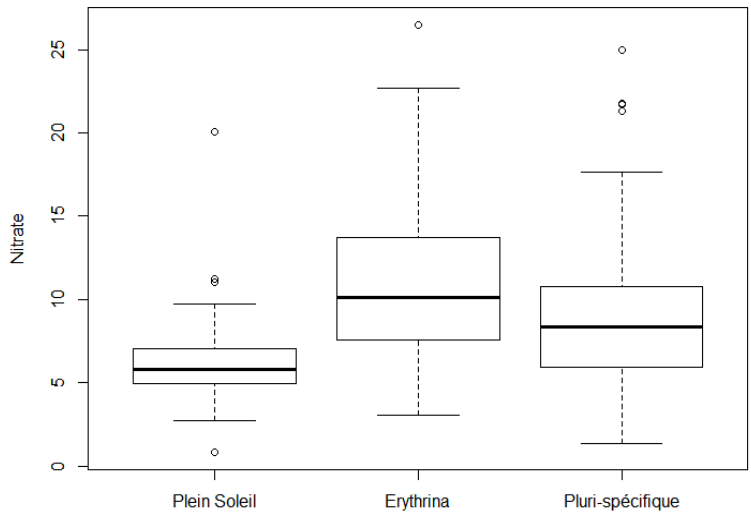


Figure 9 : Boîte de dispersion des quantités de nitrate (mg.kg^{-1}sol.jour-1) dans les sols des systèmes de culture : Plein soleil, en association avec E. poeppigiana et en association avec une canopée pluri-spécifique.

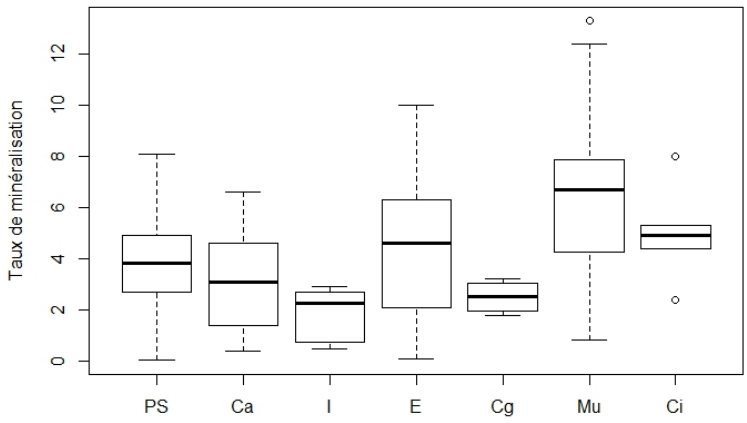


Figure 10: Boîte de dispersion des taux de minéralisation (mgN.kg^{-1}sol.jour^{-1}) après 7 jours d'incubation en anaérobie dans les sols plantation à ombrage pluri-spécifique, en plein soleil (PS) et sous arbre d'ombrage (Ca : Cordia alliodora ; I : Inga sp. ; E : Erythrina poeppigiana ; Cg : Carapa guianensis ; Mu : Musa sp. ; Ci : Citrus sp.)

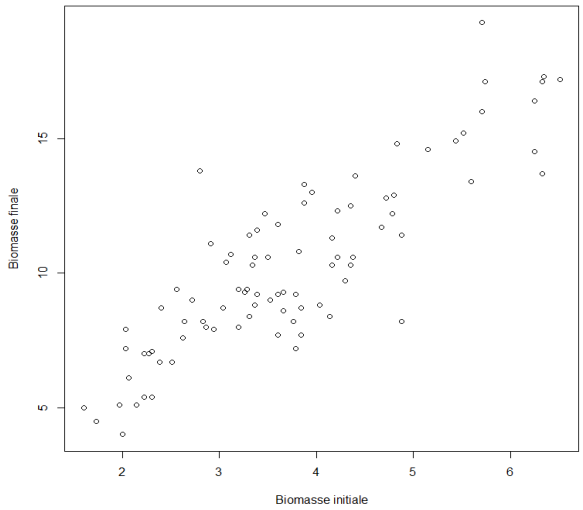


Figure 11 : Relation entre la biomasse (g) des caféiers âgés à l'initiation et à l'issu du bioessai, après 4 mois de culture sous serre. Un point correspond à la biomasse des 2 plants par pot.

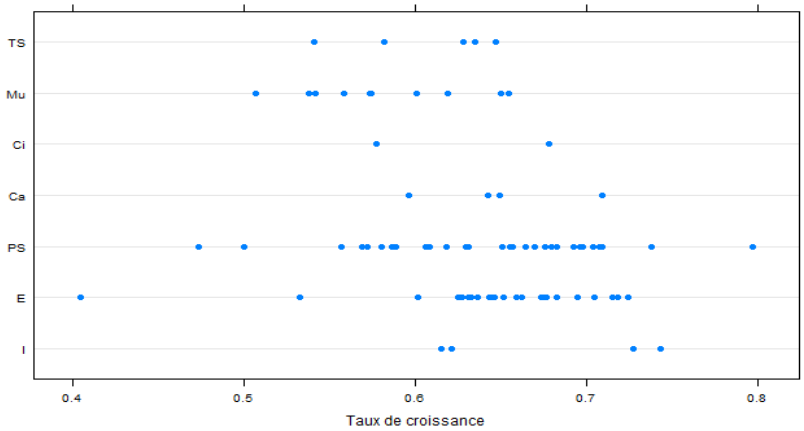


Figure 12 : Taux de croissance en % de la biomasse initiale des caféiers cultivés sur sable (TS) et sur des échantillons de sol provenant d'inter-rang de caféiers situé en plein soleil (PS) ou sous ombrage.d'ombrage (E : Erythrina poeppigiana ; I : Inga sp. ; Ci : Citrus sp. ;Mu : Musa sp. ; Cg : Carapa guianensis ; Ca : Cordia alliodora)

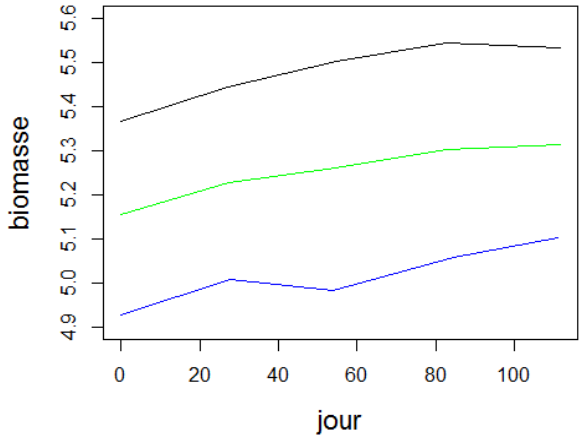


Figure 13 : Evolution de la biomasse (g) des rameaux plagiotropes primaires (du 24/03/15 au 16/07/15) par systèmes de cultures : plein soleil (courbe noire), association avec E. poeppigiana (courbe verte) et association pluri-spécifique (courbe bleue). Les mesures ont été réalisée sur 5 dates et chaque courbe représente la moyenne de 3 parcelles avec 6 caféiers par parcelle et 3 rameaux par caféier.

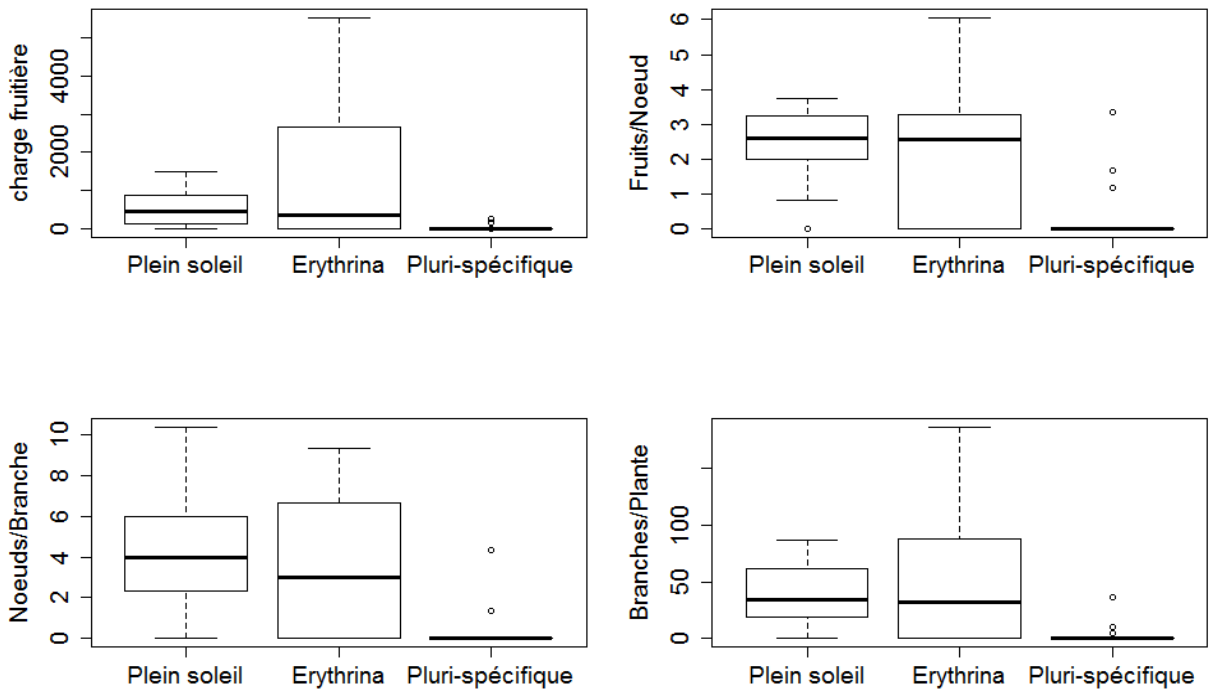


Figure 14 : Estimation du rendement en café (charge fruitière en nombre de fruits/plante) et de ses 3 composantes (nombre de fruits/nœud, de nœuds/branche et de branches productives/plante) des 3 systèmes de culture : plein soleil, association avec E. poeppigiana et association pluri-spécifique. Le nombre de fruits et de nœuds est quantifiés sur 3 rameaux par caféier. Le nombre de fruits/nœud est calculé par le rapport de ces 2 nombres par rameau. La charge fruitière est calculée par le produit du nombre de nœuds/plante et du nombre de fruits/nœud. Le nombre de nœuds/plante correspond au produit du nombre de nœuds/branche productive et du nombre de branches productives/plante.