

MASTER FAGE  
Biologie et Ecologie pour la Forêt, l'Agronomie et  
l'Environnement  
Spécialité :  
Interaction plante-environnement

**Productivité aérienne du caféier  
Agroforestier :  
effets des arbres d'ombrage et de l'âge  
des rejets.**



AUDEBERT LOUISE

Mémoire de stage  
Année universitaire 2010-2011  
Sous la direction d'Olivier Roupsard et de Fabien Charbonnier

UMR Eco&Sols « Ecologie fonctionnelle & Biogéochimie des Sols &  
des Agro-écosystèmes » (UMR 111)

## Remerciements

Je tiens à remercier dans un premier temps, mes deux encadrants durant ce stage.

A mon maître de stage Olivier Rounsard pour m'avoir proposé ce stage au Costa Rica dans les plantations de café. Pour m'avoir accordé toute sa confiance; pour le temps qu'il m'a consacré tout au long de cette période, pour tous ses conseils et les remarques intéressantes qu'il m'a faites ; sans oublier sa participation au cheminement de ce rapport.

A Fabien Charbonnier pour son aide dans tout le traitement et l'analyse de données, dans l'interprétation des résultats et pour ses nombreux conseils.

Grâce à eux et leur soif de connaissances, on a pu en 6 mois avancer sur de nombreuses idées originales.

Au CATIE pour son accueil et la confiance accordée dès mon arrivée en me permettant d'avoir une chambre dans une des résidences étudiantes sur le campus.

Au Labo stat CATIE, et particulièrement à Fernando Cassanoves, pour son aide précieuse à la réalisation du modèle statistique, à sa patience et sa pédagogie pour m'expliquer ce modèle.

Au labo analyses du CATIE: Patricia Leandro et son collègue, pour leur disponibilité et leur aide.

A l'UMR Eco&Sols pour la bourse, et au PCP Agroforesterie Cirad-CATIE Amérique (Bruno Rapidel, Jacques Avelino, Clementine Allinne, Nicole Sibelet) pour leur accueil sympathique et leur coopération professionnelle tout au long de ces six mois.

A la Finca d'Aquiara: Alfonso Robelo (CEO), Luis Guillermo Ramirez, Rafael Acuna Vargas et Manuel Jara pour m'avoir permis d'effectuer mes mesures.

Un grand merci très spécial à toute l'équipe de terrain : à la famille Barquero : Alejandra, Jenny et Alvarro Barquero ainsi que les filles, pour leur aide inestimable sur le terrain et pour m'avoir si bien accueillie.

A Carlos Roberto Cerdán Cabrera et Louise Meylan mes voisins de bureaux pour leur dynamisme, leur joie de vivre et leur aide dans l'apprentissage de l'espagnol.

A Laetitia ma colocataire qui dans les bons et les mauvais moments avait toujours une histoire drôle à me raconter !!

A tous les habitants de l'Andino : Abner (Guatemala), Ricky (Pérou), Paola (Ecuador), Ana (Ecuador), Inès (Belgique), Marcela (Pérou), Sandra (Paraguay), Zanya (Panama), Byron (Ecuador), Leslie (Canada), Carlos Mauricio (Colombie), Natividad (Pérou), Natasha (Brésil), Nelly (Ecuador), Rosa (Mexique), Isabel (Nicaragua), Luis (Pérou) y German (Colombie) pour leur accueil, leur gentillesse, leur joie de me faire découvrir leurs pays, et leur patience quand je leur parlais en espagnol.

Aux différents chercheurs, étudiants et stagiaires sur le CATIE : Sergio, Adriana, Jean Pierre, Susan, Carolina, Nereyda, Yazmin, Rosalina, Romain, Jérôme, Julian, Nestor, Oscar, Pedro, Rolando, Santiago, Henry, Mauricio, Karime, Maria, Claudia, Diana, Pepe, Lourdes, Elisa, Laura et Laura, Alejandra y David qui m'ont fait passer un super séjour dans un magnifique pays.

Et enfin à Mariel, Juan Carlos et Grafiti, ma deuxième famille au Costa Rica, merci pour tous les bons moments passés avec vous, votre soutien moral aura été mon pilier durant les deux derniers mois de mon séjour.

## Abréviations

C: Carbone

CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

B<sub>ortho</sub>: Biomasse du Rameau orthotrope (g)

B<sub>plagio</sub>: Biomasse du Rameau plagiotrope (g)

D: diamètre intermédiaire du tronçon (cm)

E<sub>x</sub>: Exportations (cas des fruits seulement)

FAO: Food and Agriculture Organization

G: croissance visible, obtenue par allométrie (tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)

GPP: Productivité Primaire Brute (tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)

HI: Harvest Index

i: nombre de tronçons du rameau orthotrope du rejet étudié

ICO: International Coffee Organization

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

l: longueur de la feuille, suivant la nervure principale (cm)

L: Mortalité ou production de Litière (tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)

LAI: Leaf Area Index (m<sup>2</sup><sub>feuille</sub> m<sup>-2</sup> sol)

LER: Land Equivalent Ratio

Lg: Longueur du rameau (cm)

LMA: Leaf Mass per Area (g m<sup>-2</sup>)

MOS: Matière Organique du Sol

MS: Masse Sèche (g)

N: Azote

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NPP<sub>allo</sub>: Productivité Primaire Nette estimée par relations allométriques (t<sub>MS</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> ou tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)

NPP: Productivité Primaire Nette (t<sub>MS</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> ou tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)

PAR: Photosynthetically active radiation (μmol photon.m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

PIB: Produit Intérieur Brut

SAE: Surfaces d'Asselement Equivalentes

SE: Services Eco-systémiques

Sf: surface foliaire de chaque feuille (cm<sup>2</sup>)

SLA: Specific Leaf Area (g m<sup>-2</sup>)

W: la plus grande largeur perpendiculaire à la nervure principale de la feuille (cm)

α: coefficient de régression empirique

## Sommaire

Introduction .....	1
Matériels & Méthodes .....	3
I. Structure du peuplement des caféiers et de leurs rejets obtenue par inventaires .....	4
II. Conception du modèle statistique et installation du dispositif expérimental au champ..	6
1. Alternatives possibles pour le choix du dispositif statistique .....	6
2. Choix final du dispositif statistique .....	6
3. Set de calibration (rejets sacrifiés) .....	8
III. Variables utilisées pour le suivi de croissance (expérience non destructive).....	8
IV. Variables utilisées pour la construction des relations allométriques et des teneurs en Carbone et Azote (set de calibration destructif).....	8
1. Relation allométrique pour les rameaux plagiotropes.....	9
2. Relation allométrique pour les rameaux orthotropes .....	9
3. Relation allométrique des feuilles.....	9
4. La teneur en C et N des compartiments .....	10
V. Expérimentation pour le suivi de litière .....	10
VI. Calcul de NPP .....	11
Résultats .....	12
I. Construction des relations allométriques par compartiment et composition en C et N (rejets sacrifiés) .....	12
1. Allométrie des plagiotropes .....	12
2. Allométrie des orthotropes.....	13
3. Allométrie des feuilles (SLA OU LMA) .....	14
4. Teneurs en C et N des organes aériens .....	14
II. Application des relations allométriques à l'estimation de la biomasse et des stocks de C et N (rejets suivies en croissance) .....	16
1. Biomasse des rejets .....	16
2. Stocks de C et de N .....	17
3. Croissance visible et extrapolation à la parcelle .....	18
4. Variabilité saisonnière de la mortalité par compartiments.....	19
5. NPP annuel.....	20
Discussion .....	21
I. Variabilité intra-parcelle .....	22
1. Effets de l'âge des rejets (induit par la taille) .....	22
2. Effets de la distance aux arbres d'ombrage .....	22
3. Effets intra-couronne.....	23
II. NPP et sa partition.....	23
Conclusions et Perspectives .....	25
Bibliographie .....	26

## Introduction

Le café (variétés arabica et robusta essentiellement) est une des valeurs marchandes les plus importantes au monde après le pétrole, représentant environ 17 G\$ an<sup>-1</sup> (FAO<sup>1</sup>). La production mondiale fut de 120 millions de sacs de 60 kg de café vert en 2009 (ICO<sup>2</sup>). Environ 500 millions de personnes dépendent de cette filière (DaMatta et al., 2007). En Amérique Centrale, le café est le premier produit d'exportation de ces 100 dernières années. Au Costa Rica, la variété cultivée est seulement de l'arabica (*Coffea arabica* L.), représentant 15% des exportations agricoles et 4% du PIB en 2008. Dans ce pays, la filière permet de financer plus de 300.000 personnes (ICO). Les marchés boursiers exercent de fortes pressions sur les prix du café, ce qui engendre des fluctuations des cours par cycle de 7 ans environ. Cela affecte fortement la rentabilité de la filière au niveau des producteurs. Les prix hauts favoriseraient le café à fort niveau d'intrants et stimuleraient la production, alors que les prix bas favoriseraient une dés-intensification (ex : agroforesterie) ou de bas niveau d'intrants (ex : organique) ou encore le développement des marchés de niches (certifications: organique, équitable...). Suite à la crise de surproduction, à partir des années 90 et à la chute des cours qui l'a suivie, la diversification des revenus des producteurs de café est devenue nécessaire pour garantir la rentabilité.

Parallèlement, des critères de production durable et écologique se sont peu à peu imposés en complément des objectifs de productivité, donnant naissance au concept d'intensification écologique (Griffon, 2006). Le monde du café a pris beaucoup d'initiatives dans ce domaine, en développant des écolabels ou des certifications, notamment en faveur de modes de production plus durables (café agroforestier, café organique, café bird-friendly, café fair-trade etc.). Plus récemment, et en particulier, le Paiement pour Services Eco-systémiques (SE) (eau, carbone, biodiversité, lutte contre l'érosion etc.) est devenu une opportunité majeure. Les SE répondent à une demande des sociétés civiles du Nord, favorisant des systèmes de production plus durables et permettant de les normaliser à terme (Vaast et al., 2005b).

Les systèmes agroforestiers sont une forme privilégiée d'intensification écologique dans les situations où l'association des arbres et des cultures favorise la productivité globale de la parcelle (par complémentarité des niches ou par effets de facilitation). Dupraz et Liagre ont montré qu'en comparant la culture agricole seule et la plantation forestière seule ou l'association agroforestière, selon la méthode des Surfaces d'Assolement Equivalentes (SAE ou Land Equivalent Ratio, LER), la productivité du système agroforestier pouvait être supérieure à la somme des productivités des deux monocultures (Dupraz and Liagre, 2008). Il y aurait dans ce cas une complémentarité entre les strates pour l'utilisation des ressources. Ainsi, des études ont montré qu'il existait une complémentarité entre le système racinaire des arbres d'ombrage et de caféiers pour l'utilisation de l'eau du sol, la présence d'arbres permettant aux racines du caféier de se développer plus en profondeur (Cannavo et al., 2011). En outre, l'agroforesterie a la réputation d'aider à préserver les ressources naturelles et de permettre de diminuer les intrants. Ce qui permettrait une meilleure provision de SE (Albrecht and Kandji, 2003; Gómez-Delgado et al., 2011b; Montagnini and Nair, 2004; Siles et al., 2010b). De plus ce type de système permet aux petits producteurs de faire face aux fluctuations des prix du café, en stabilisant et diversifiant leurs revenus, avec le bois et les fruits des arbres. Cependant, les conclusions de nombreuses études consacrées aux effets de

---

<sup>1</sup> [http://www.fao.org/index\\_fr.htm](http://www.fao.org/index_fr.htm)

<sup>2</sup> <http://www.ico.org/>

l'ombrage sur le rendement du caféier sont parfois contradictoires et les conditions des expériences sont difficiles à comparer (niveaux d'ombrages, cultivars, altitude, sols).

Les effets de l'ombrage sur la culture du caféier ont été largement documentés : à l'échelle du rameau sur la photosynthèse, sur la durée de maturation des grains, sur la qualité et le taux de remplissage des grains et sur la production de café (Vaast et al., 2006; Vaast et al., 2008). Le caféier est une plante d'ombre (Cf. annexe 1), avec un faible point de compensation et sensible à la photo inhibition sous forte lumière (Da Matta, 2004; Kumar and Tieszen, 1980). Mais les feuilles peuvent maintenir un haut rendement photosynthétique sous lumière faible (Franck and Vaast, 2009). L'ombrage affecte également la morphologie du caféier et donc l'allocation du carbone (C) (Franck, 2005). On définit l'allocation du C comme étant la fraction du C assimilé par la photosynthèse et attribuée à une fonction donnée (par exemple la reproduction, le stockage de réserve ou la croissance) (Dickson and Isebrands, 1993). De plus, l'ombrage conduit généralement à une diminution de l'assimilation du C, entraîne une modification du coût biochimique des différentes fonctions métaboliques (les puits) et/ou à un changement dans la manière dont le C est réparti entre ces puits. La répartition du C est définie comme la fraction du C contenu dans un organe ou un compartiment donné (par exemple, les racines, le tronc, les branches ou partie aérienne et souterraine) (Litton et al., 2007). Ainsi, la force de puits des grains qui sont constitués de réserves, est susceptible de concurrencer d'autres puits de C tels que la croissance (Cannell, 1975; Chapin et al., 1990; Vaast et al., 2005a).

La Productivité Primaire Nette (NPP) occupe une position centrale pour la compréhension de la productivité et de la séquestration de C des écosystèmes. Celle-ci a d'ailleurs bénéficié de nombreuses études depuis les années 1960. Récemment, la NPP a connu un regain d'intérêt au travers des projets de bilan de C des écosystèmes terrestres (FLUXNET, 2008), bénéficiant de bases de données actualisées (ORNL-DAAC, 2009), ou en cours de construction (ex. SOERE/F-ORE-T<sup>3</sup>). Cependant, en ce qui concerne les cultures pérennes tropicales (cocotier, palmier à huile, caféier, hévéa), et plus encore les cultures agroforestières, l'évaluation de la NPP, de sa partition et de sa variabilité saisonnière restent très fragmentaires.

Notre première hypothèse de travail est que les arbres d'ombrage, même plantés à faible densité affectent le comportement de la culture principale (ici le caféier). Les études portant sur les effets de l'ombrage sur la productivité du caféier se sont principalement intéressées aux rendements en café marchand. Ici, nous allons nous intéresser en particulier à quantifier les effets de l'ombrage sur l'allocation de C et de l'azote dans toutes les parties aériennes du caféier.

Notre seconde hypothèse est que la taille du caféier (qui consiste à éliminer les rejets qui sont les moins productifs, généralement au bout de 5 ans) affecte l'allocation du C et de N. La taille est un événement majeur dans la pratique culturale du caféier en Amérique Centrale; elle affecte sans aucun doute l'équilibre nutritionnel et carboné du caféier. Nous faisons donc l'hypothèse que la « distance à l'arbre » et « l'âge du rejet après la taille », sont 2 facteurs principaux influençant la productivité à l'échelle du caféier et à l'échelle de la parcelle. D'autres facteurs majeurs pouvant influencer la productivité (fertilité et réserve en eau du sol) ne seront pas étudiés car ils sont jugés peu ou pas limitant dans nos conditions expérimentales (Gomez Delgado, 2010).

---

<sup>3</sup> [http://www.allenvi.fr/?page\\_id=768](http://www.allenvi.fr/?page_id=768)

L'objectif de recherche de ce master est d'estimer la NPP aérienne apparente (qui ne prend pas en compte ni la croissance racinaire ni les réserves de la plante), dans une plantation de caféier (*Coffea arabica* var. *Catura*), à l'échelle des rejets de souche et en extrapolant à la population de rejets de la parcelle, en se basant sur des suivis de croissance (phénologie, diamètres, longueurs, dénombrée etc.) relayés par des méthodes allométriques à établir spécifiquement.

La NPP apparente (sans réserves ni parties racinaires) sera calculée comme suit (Eq. 1):

$$NPP = G + L + Ex \quad \text{Eq. 1}$$

Où: **G** = croissance visible aérienne, obtenue par observations et relations allométriques.  
**L** = mortalité ou production des litières des parties aériennes.  
**Ex** = Exportations (cas des fruits seulement)

Pour ce faire, nous allons estimer la variabilité de la croissance visible aérienne (G), de la répartition par organe (feuilles, axe orthotrope, rameaux plagiotropes, fruits), du % C et du % N et de la surface foliaire. Des relations allométriques, seront construites *in situ* à partir de variables indépendantes mesurables sur les parties aériennes de rejets de caféiers intacts. On va également mesurer la mortalité des compartiments Feuille, Fruit, Fleurs et Rameau à l'aide de pièges à litière. NPP des parties ligneuses ne pourra être calculé qu'entre les deux dates de mesures successives réalisées dans le cadre strict de ce Master.

L'objectif de ce Master est intégré dans la thèse de doctorat de Fabien Charbonnier qui cherche à contribuer à la compréhension des déterminants de la production du caféier, à partir d'enregistrements de la productivité brute (acquisition du C), de la respiration autotrophe, de la productivité nette (croissance visible, mortalité, allocations aériennes et souterraines), de l'allocation et de la dynamique des réserves dans une plantation de caféiers (*Coffea arabica* var. *Catura*) avec arbres d'ombrage (*Erythrina poeppigiana*). Cette thèse contribue elle-même au projet « Coffee-Flux »<sup>4</sup> de bilan de C, eau et sédiments d'un bassin versant agroforestier à base café au Costa Rica (Cf annexe 2).

## Matériels & Méthodes

L'étude a été réalisée sur l'hacienda d'Aquiaries<sup>5</sup>, qui est une des plus grandes fermes commerciales de production de café au Costa Rica avec une superficie de 660 ha (Fig. 1). Elle se trouve sur les contreforts du volcan Turrialba à 15 km du CATIE<sup>6</sup>. Cette ferme est certifiée « Rainforest Alliance TM »<sup>7</sup>. Cette certification veille à ce que les forêts soient protégées et que les rivières, les sols et la faune soient préservés.

---

<sup>4</sup> [http://www.montpellier.inra.fr/ecosols/recherche/projets\\_de\\_recherche\\_finances/coffeeflux](http://www.montpellier.inra.fr/ecosols/recherche/projets_de_recherche_finances/coffeeflux)

<sup>5</sup> <http://cafeaquiares.com/cof-eng.htm>

<sup>6</sup> <http://www.catie.ac.cr/>

<sup>7</sup> <http://www.rainforest-alliance.com/fr/>

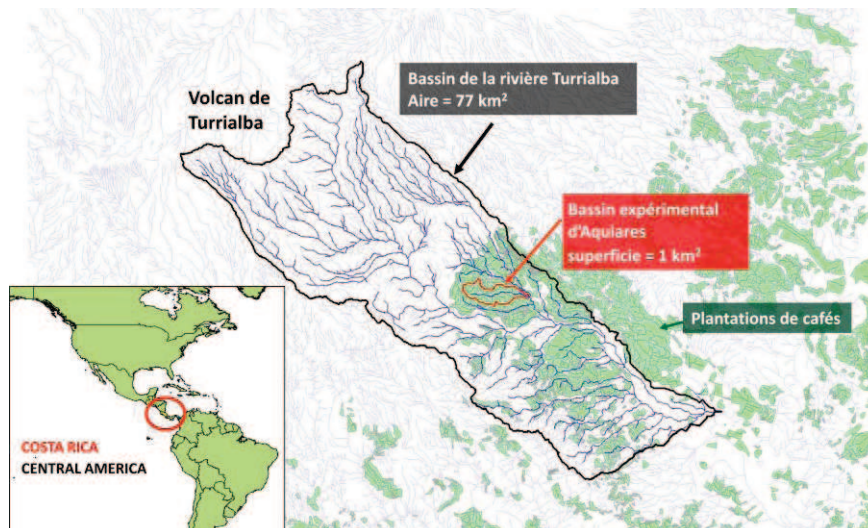


Figure 1 : Localisation des bassins fluviaux du Rio Turrialba, du bassin expérimental (plate forme Coffee Flux) et des plantations de caféier (surfaces en vert). Source (Gomez Delgado, 2010).

Notre parcelle expérimentale couvre environ 1 ha dans le bas-fond du bassin-versant et comprend la tour à flux du site expérimental « Coffee-flux » (Gómez-Delgado et al., 2011a) (Cf. annexe 1). La pente moyenne est inférieure à 5 %. Les rangées de caféiers sont orientées à 21 degrés Nord-Est, avec une densité de plantation initiale de 6300 emplacements  $\text{ha}^{-1}$ . Il y a deux variétés d'arabica (Cf. annexe 2), essentiellement du Caturra (une mutation du Bourbon), et en remplacement un peu de Catimor. Nous ne travaillerons que sur la variété Caturra dans la suite.

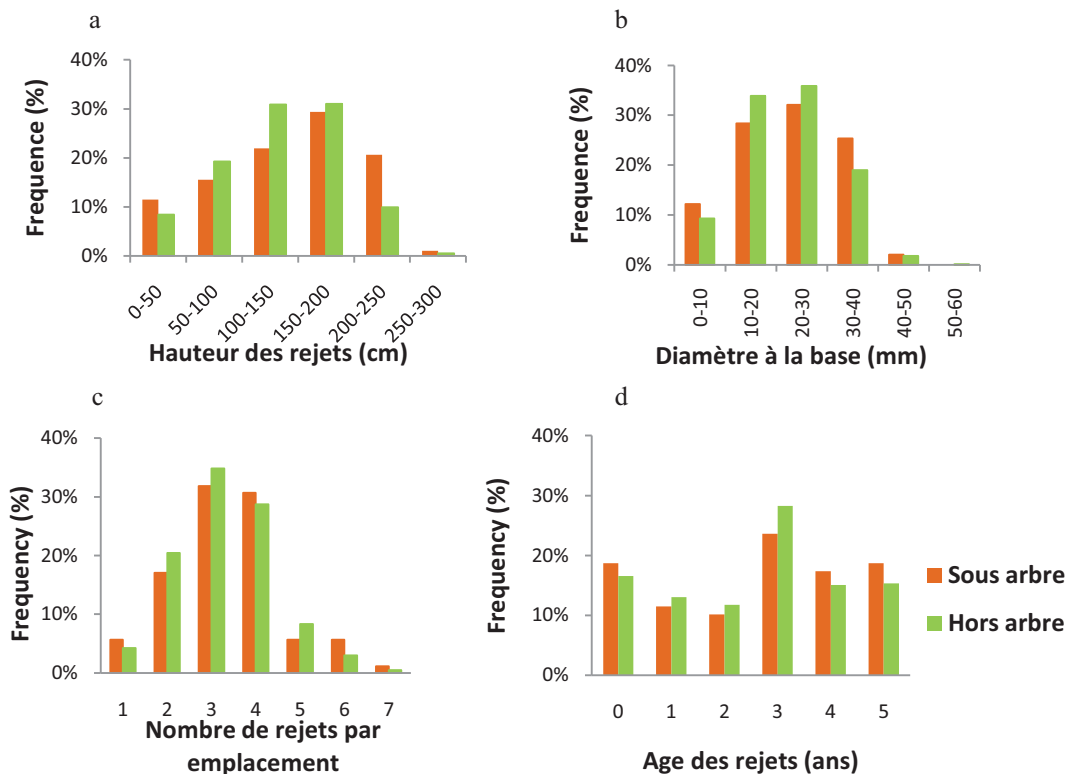
Les souches de caféiers ont toutes le même âge ( $\geq 30$  ans) et peuvent porter plusieurs rejets de caféiers d'âges différents (1 à 5), en raison de la taille sélective des rejets qui est pratiquée tous les 5-6 ans. L'âge des rejets varie entre 0 et 6 ans.

## I. Structure du peuplement des caféiers et de leurs rejets obtenue par inventaires

La parcelle de café est constituée d'emplacements, comprenant chacun deux souches juxtaposées en général, chaque souche portant un certain nombre de rejets. La taille annuelle s'effectue pour éliminer les vieux rejets qui s'épuisent et deviennent improductifs, elle affecte environ 15 % des rejets (observation effectuée en 2011). Les rejets de souche de caféiers ont donc entre 0 et 6 ans et n'ont donc pas les mêmes LAI. Les rejets se situent dans des environnements lumineux hétérogènes dus à la présence de grands arbres d'ombrage mais aussi à l'environnement local (lié aux rejets voisins). Il existe également une variabilité pour l'état trophique des rejets, fonction du nombre et de l'âge de rejets présents sur une même souche. Afin de mettre en place un dispositif expérimental représentatif de la population, il convenait de décrire *a priori* cette variabilité intra-parcelle à l'aide d'inventaires.

0,1 ha ont été inventoriés à 4 dates (avril et novembre 2009, juillet 2010 et février 2011) dont les 3 premières réalisées avant le début de mon étude. Mille rejets environ ont été inventoriés à chaque passage. Pour décrire la structure de la parcelle, chaque souche a été positionnée dans la parcelle et brièvement décrite : âge des rejets, nombre de rejets par souche, hauteur et diamètre de chacun des rejets. Les caféiers en hors arbre ont été distingués des caféiers sous arbre (sous la projection de la canopée des Erythrines).





**Figure 2 : Structure du peuplement des rejets de caféiers obtenue à partir d'un inventaire de 1000 emplacements à 2 dates (juillet 2010 et février 2011) dans la parcelle expérimentale.**

**a : fréquence en % des hauteurs des rejets en cm, de la population de la parcelle.**

**b : fréquence en % des différents diamètres à la base des rejets en mm, de la population de la parcelle.**

**c : fréquence en % du nombre de rejets par emplacement, dans la parcelle.**

**d : fréquence en % des âges des rejets en année, de la population de la parcelle.**

Nous avons observé une répartition quasi uniforme de l'âge des rejets dans la parcelle (Fig. 2d). On remarque que le mode du nombre de rejets par emplacement était de 3-4 (Fig. 2c). Nous avons pu définir que la densité résiduelle de notre parcelle était de 5580 emplacements par hectare, soit environ 17338 rejets par hectare si l'on considère 3-4 rejets par emplacement en moyenne. Sur l'ensemble de ces rejets, la hauteur moyenne était de  $164 \pm 56$  cm (à laquelle il faut rajouter la hauteur de souche d'environ 40 cm pour connaître la hauteur du caféier) et le diamètre moyen de  $2,27 \pm 0,95$  cm.

L'âge du rejet est facilement identifiable chez le caféier du fait de ralentissements de croissance chaque année, interprétables non pas par des effets climatiques forts mais par la compétition d'autres puits. Nous avons défini les classes d'âge des rejets à partir de mesures de terrain. Nous avons obtenu une relation nette entre le diamètre à la base du rejet et son âge (Avelino, Comm. Pers.), même s'il subsiste une incertitude de plusieurs mois sur l'âge réel des rejets (Fig. 3).

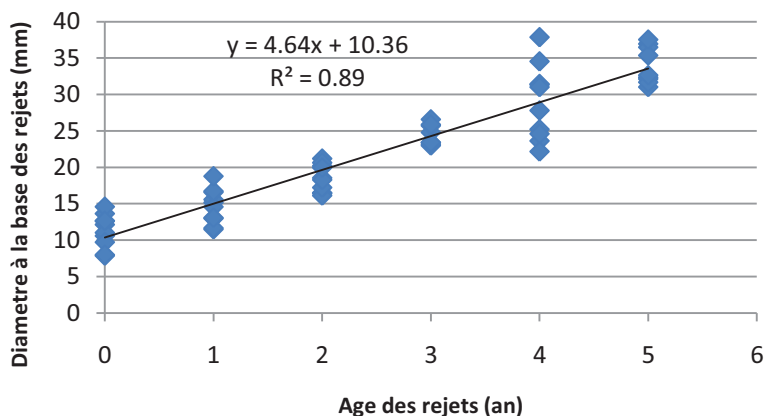


Figure 3 : Relation entre le diamètre à la base et l'âge des rejets.

## II. Conception du modèle statistique et installation du dispositif expérimental au champ

### 1. Alternatives possibles pour le choix du dispositif statistique

Afin de caractériser les effets de la taille et des arbres d'ombrage sur les rejets, on a dû estimer la faisabilité de plusieurs modèles statistiques pour finalement retenir une option qui soit pertinente, précise et réalisable à la fois.

Premièrement, il fallait choisir l'unité expérimentale, c'est-à-dire soit « souche » soit « rejet ». Avec une unité de type souche, le grand nombre de combinaisons observées (nombre de rejets par souche\*âge de chacun des rejets) nous aurait obligés à construire un dispositif statistique démesuré, conclusion d'une étude préliminaire de faisabilité destinée à calculer le nombre minimum de répétitions nécessaires pour mettre en évidence d'éventuels effets traitements, simulation réalisée à l'aide des données de l'inventaire. Nous avons donc choisi le rejet de caféier comme unité.

Deuxièmement, il nous fallait distribuer nos rejets dans le plan expérimental de terrain, soit 1 rejet par souche (toutes les observations indépendantes), soit plusieurs rejets par souche (possibilité de remonter à l'échelle souche éventuellement, mais observations non indépendantes ce qui nous a conduits à écarter cette option). Une option intermédiaire était de suivre 2 rejets par plants avec toutes les combinaisons d'âges possibles, un dispositif connu sous le nom de « Balanced Incomplete Block Design ». Cette option a également été écartée en raison de l'extrême sensibilité du modèle de variance à la perte probable d'une unité expérimentale au cours des deux ans minimum d'observation. Nous avons donc finalement choisi d'étudier des rejets totalement indépendants (autant de souches que de rejets). On étudiera donc essentiellement l'effet de la taille sur le rejet et non pas les interactions entre les rejets dans une même souche. Ces éventuelles interactions seront prises en compte à l'aide de covariables, de type effet arbre autour d'un rejet.

Troisièmement, il s'agissait de choisir les âges des rejets, avec possibilité de choisir 3 âges différents et d'interpoler les âges manquants à partir des données de la 2<sup>nde</sup> année d'observation (1-3-5 ans la 1<sup>er</sup> année et donc 2-4-6 ans la 2<sup>nde</sup> année). Cependant NPP est potentiellement dépendante de l'état des réserves de la plante, et donc de la production de l'année antérieure. On a donc opté pour observer les 6 âges possibles dès la première année.

### 2. Choix final du dispositif statistique

En définitive, on a retenu un dispositif statistique définissant le rejet comme unité d'observation : le taux de renouvellement des rejets étant de 15 % et la distribution des rejets selon les âges uniforme, nous avons choisi 6 classes d'âges considérées de fréquence similaire

ou égale. Le facteur « effet arbre » est composé de 2 traitements contrastés: hors arbre (les caféiers sont aussi loin que possible des arbres), et sous arbre (les caféiers sont sous la projection au sol de la canopée des Erythrines).

Le modèle que nous avons sélectionné doit pouvoir expliquer la variance de NPP des rejets par 4 facteurs principaux : il s'agit d'un modèle mixte, combinant 2 facteurs d'intérêt placés en effets fixes (âge du rejet et arbre d'ombrage), 1 facteur temps (lié à la phénologie et au climat), un facteur bloc placés en effets aléatoires et une co-variable décrivant l'environnement compétitif local du rejet (*i.e* la transmittance locale du couvert). Nous en avons conclu, suite à la comparaison de plusieurs modèles possibles (F. Charbonnier et F. Casanoves, comm. Pers.) que la meilleure classe de modèle pour répondre à nos questions de recherche serait un modèle mixte hiérarchique pour des données répétées de la forme suivante :

$$Y_{i,t} = \mu_t + \pi_t + \alpha_{i,t} + \beta_{i,t} + \delta_t + \alpha\beta\delta + cov_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad \text{Eq. 2}$$

- Où :
- i      rejet étudié
  - t      intervalle de temps sur lequel est calculé NPP
  - $Y_{i,t}$     NPP entre 2 dates (t) pour le rejet (i)
  - $\mu_t$     NPP moyenne pour t
  - $\pi_t$     Effet bloc (effet aléatoire)
  - $\alpha_{i,t}$     Effet des arbres d'ombrages pour t, pour i (effet fixe)
  - $\beta_{i,t}$     Effet de l'âge du rejet après recépage en t, pour i (effet fixe)
  - $\delta_t$     Effet date (effet aléatoire)
  - $\alpha\beta\delta$     Terme d'interactions
  - $Cov_{i,t}$     Co-variable, l'environnement compétitif local
  - $\varepsilon_{i,t}$     Erreur

Ce modèle servira de référence générique pour l'analyse du dispositif expérimental. Le plus souvent, nous avons été amenés à simplifier ce modèle générique pour ne considérer que les effets principaux, quand le critère de parcimonie le justifiait. Il devra permettre de quantifier la biomasse et la NPP de chacun des organes des caféiers.

Le dispositif expérimental a été conçu par blocs pour tenir compte d'une éventuelle variabilité intra-parcelle (effet des arbres ou de la pente par exemple). Un bloc comprend à la fois une zone ombragée sous un arbre et un espace hors arbre (Fig. 4). On a choisi 5 blocs (soit 5 arbres) dans la parcelle (Fig. 4). Nous avons 12 rejets par bloc, 6 sous arbre et 6 hors arbre. Les 6 rejets que l'on a sélectionnés ont 0, 1, 2, 3, 4 ou 5 ans. Le nombre total de rejets observés est de 60 (5 blocs\*2 effets arbre\*6 âges) et le nombre de répétitions vraies est de 5.

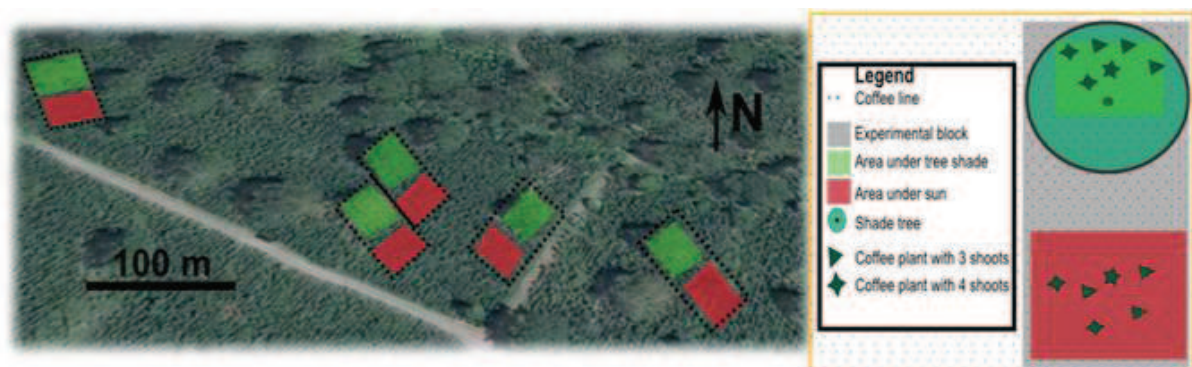


Figure 4 : Dispositif expérimental statistique au champ pour le suivi de la NPP aérienne des caféiers.

### 3. Set de calibration (rejets sacrifiés)

En outre, on a sélectionné 12 autres rejets « jumeaux » destinés aux analyses destructives (mesures de la biomasse et des teneurs en C et N), situés à proximité des caféiers en suivi de croissance. C'est notre set de calibration. Nous avons choisi 6 rejets par traitement d'ombrage, de 2 âges différents (3 et 6 ans), soit 3 répétitions vraies de rejets. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel InfoStat (IS, version p, 2011) <sup>8</sup>.

### III. Variables utilisées pour le suivi de croissance (expérience non destructive)

Un suivi biométrique des 60 rejets va être effectué tous les mois durant deux ans, mais dans le cadre strict de notre Master, compte-tenu du travail préliminaire de choix du dispositif statistique et de sa mise en place au champ, nous n'avons observé que les résultats des deux premiers inventaires, le premier du 8 au 29 mars et le seconde du 25 au 17 mai.

Tous les organes aériens des rejets sélectionnés ont été inventoriés et mesurés. Le caféier possède un rameau orthotrope qui porte des rameaux plagiotropes d'ordre 1 (P1), eux-mêmes portant des rameaux plagiotropes d'ordre 2 (P2), etc. (Fig. 5). La longueur, le diamètre à la base et le nombre de nœuds de chaque rameau ont été mesurés. Le rameau orthotrope a fait l'objet de mesures particulières : la hauteur et le diamètre de tous les nœuds pour les rejets de 0 et 1 an, tous les 2 nœuds pour les rejets de 2 ans, tous les 3 nœuds pour les rejets de 3 ans, tous les 4 nœuds pour les rejets de 4 ans et tous les 5 nœuds pour les rejets de 5 ans. Le nombre de feuilles et de fruits par rameau a également été inventorié. La dimension des feuilles (longueur, largeur) a été mesurée sur quelques rameaux de chaque rejet de l'ensemble du rejet (Fig. 5) afin d'en estimer la surface.

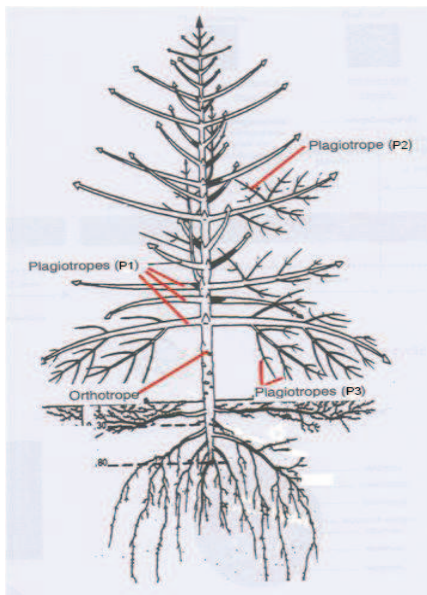


Figure 5 : Description morphologique du caféier. Source (Pendergrast, 1999).

### IV. Variables utilisées pour la construction des relations allométriques et des teneurs en Carbone et Azote (set de calibration destructif)

On a effectué une description architecturale détaillée (même mesures que pour le suivi) des rejets de notre set de calibration pour les mesures destructives. Afin de mesurer leur biomasse, ils ont été coupés à leur point d'insertion sur la souche, en séparant les différents organes (rameaux orthotropes, plagiotropes par nœud orthotrope et par niveau de ramification,

<sup>8</sup> <http://www.infostat.com.ar/>

feuilles). Les organes et sous organes ont été mis en sacs de papier, puis séchés au four (à 65 °C), avant pesée de la matière sèche (MS). Ces échantillons ont également servi à mesurer le pourcentage de C et de N au laboratoire (Cf. annexe 3).

### 1. Relation allométrique pour les rameaux plagiotropes

Nos relations allométriques ont été construites sur les rejets sacrifiés avec pour objectif final d'estimer la biomasse et la croissance des différents organes de nos rejets en suivi (Clark et al., 2001). Dans un premier temps, diverses variables biométriques ont été testées pour identifier celles qui peuvent le mieux caractériser la biomasse, selon un double cahier des charges de précision et de parcimonie. Différents modèles ont été comparés.

### 2. Relation allométrique pour les rameaux orthotropes

Pour l'axe orthotrope, nous avons pesé des tronçons de 5 nœuds pour les rejets de 5 ans et de 3 nœuds pour les rejets de 3 ans. Pour l'ensemble de ces tronçons, nous avons mesuré la longueur et le diamètre à la base de chaque tronçon.

### 3. Relation allométrique des feuilles

Après avoir été mesurées en longueur et largeur, les feuilles de chaque rejet ont été récoltées par classe de hauteur (haute, moyenne et basse). Les feuilles ont été mises dans une glacière afin d'éviter qu'elles ne se déshydratent trop vite. Avant chaque mesure de surface (planimètre LI-3100C Area Meter) et de biomasse, les feuilles ont été réhydratées. Les classes de hauteurs sont définies en fonction de la taille totale de l'axe orthotrope du rejet que l'on divise ensuite par 3 afin d'obtenir trois tronçons de taille égale, et non pas en fonction du nombre total de nœuds sur l'axe orthotrope.

Une relation allométrique (Eq. 3) très forte existait entre les dimensions des feuilles et leur surface. L'équation suivante a été développée dans la parcelle (B. Rapidel, Comm. Pers.):

$$Sf = 0,7481 l.W \quad (N = 191 \text{ feuilles} ; R^2 = 0,98) \quad \text{Eq. 3}$$

Où Sf = chaque surface foliaire (cm<sup>2</sup>)  
l = longueur de la feuille suivant la nervure principale (cm)  
W = la plus grande largeur perpendiculaire à la nervure principale (cm)

Pour pouvoir estimer la biomasse foliaire du rejet de caféier, nous avons besoin de la surface foliaire spécifique (SLA, en m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>), ou bien de l'inverse du SLA, la masse foliaire par surface (Leaf Mass per Area ou LMA en g m<sup>-2</sup>). SLA fut mesurée sur des échantillons des 12 rejets de caféiers du set de calibration (mais pas du set de validation) en distinguant par classe d'âge de rejet, effet arbre et de hauteur dans le rejet (position haute, moyenne et basse). Pour ce faire, nous avons récupéré l'ensemble des feuilles de chaque rejet en les mettant, pour chaque rejet, dans 3 sacs différents selon leur position sur le rejet (haute, moyenne, basse). Une fois la distribution du LMA établie dans les classes, il suffit de le diviser par la surface foliaire de chacune des classes suivies en croissance (pour le compartiment feuilles, on a mesuré tous les mois le nombre total de feuilles et la longueur/largeur de 5 % des feuilles) pour estimer la biomasse de feuilles en gramme par rejet de caféier et par date. Nous ferons l'hypothèse que la répartition du SLA ou LMA ne varie pas dans le temps, et appliquerons les valeurs par classe obtenues dans le set de calibration à toutes les dates de suivi.

Pour l'ensemble de ces relations allométriques, nous avons ensuite utilisé un set de validation. Ce set de validation comprend 11 rejets de caféiers différents, provenant de la

parcelle adjacente à la nôtre, analysés durant le projet Lee-Dare<sup>9</sup> qui a eu lieu durant mon séjour au Costa Rica, et qui avait pour objectif la comparaison de méthode pour décrire l'architecture fine des caféiers (par LIDAR).

#### 4. La teneur en C et N des compartiments

Pour l'analyse des teneurs de C et de N, nous avons utilisé des sous-échantillons provenant des 3 rejets sacrifiés par âge et par type d'ombrage (Cf. II.3). Ces sous-échantillons correspondent à 6 rameaux plagiotropes (regroupement des plagiotropes d'ordres 1, 2 et 3 avec 2 rameaux par hauteur prédéfinie), 3 tronçons de rameau orthotropes (correspondants aux hauteurs de rameaux plagiotropes sélectionnés) et 1 échantillon de 100 feuilles par hauteur. Soit un total de 12 échantillons, par rejet sacrifiés en vue de l'analyse de C et de N.

Après que ces échantillons aient été séchés dans une étuve à 65°C pendant au moins 48h, leurs contenus en C et N ont été mesurés avec un analyseur élémentaire automatique modèle Thermo Finigan Flash EA 1112 (Cf. annexe 3).

Pour le calcul des stocks de C et de N par rejet et par hectare, dans le cas où les teneurs montraient des différences significatives entre traitements, nous avons appliqué des valeurs distinctes par traitement, sinon, nous avons appliqué pour tous les traitements des valeurs moyennes.

#### V. Expérimentation pour le suivi de litière

Un dispositif de pièges à litières a été mis en place (juillet 2010) principalement dans la zone des 3 arbres autour de la tour à flux, le long des transects également utilisés pour la mesure du LAI (Fig. 6).

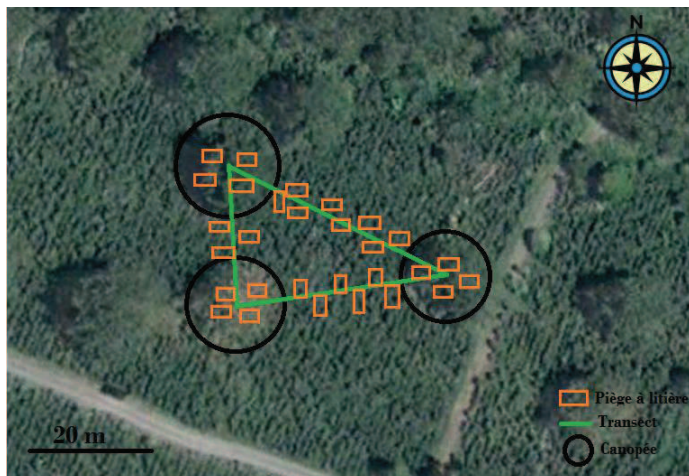


Figure 6 : vue satellite de la zone des 3 arbres autour de la tour à flux avec indication des transects de LAI 2000 et de la position des pièges à litières. Source Google Earth.

Chaque piège était constitué d'un filet à petites mailles, d'une superficie d'environ 1m<sup>2</sup>, suspendu à 2cm du sol et tendu entre 4 caféiers, chaque filet étant disposé en correspondance avec la maille élémentaire de plantation.

Les pièges à litières ont été disposés le long d'un transect entre ces 3 arbres (le long des cotés du triangle) et autour de chacun des arbres. Nous avons 4 pièges autour de chaque arbre, et 17 pièges le long des cotés. Ce qui nous fait un total de 29 pièges à litières (4\*3+17), soit environ 30 m<sup>2</sup>.

<sup>9</sup> <https://sites.google.com/site/laiworkshoppcp/>

Les pièges ont été récoltés tous les 15 jours et durant une année complète (juillet 2010 à juin 2011). La litière a été récupérée et séparée dans 1 sac par piège et par type d'organe: feuilles, rameaux et fleurs de caféiers et d'érythrines. Les sacs ont été séchés à l'étuve (four à 65 °C) au minimum 48h jusqu'à stabilisation de la masse. Ils ont ensuite été pesés (balance de précision: 0.01 g), pour obtenir finalement la biomasse des litières des caféiers et des érythrines par organe.

Pour convertir la MS des feuilles récoltées dans les pièges à litière en équivalent de masse foliaire perdue et permettre de calculer NPP des feuilles, nous avons mis en place une expérience de suivi des variations de SLA des feuilles, avant et après leur mortalité. Nous avons donc pris une population de feuilles fraîchement tombées (la veille de la première mesure), et les avons réparties dans 4 filets contenant 7 feuilles chacun. Nous avons mesuré les masses et les surfaces de ces feuilles tous les 3 jours et durant 15 jours (soit 6 dates). Dans cette expérimentation, nous ne mesurons pas toujours les mêmes feuilles ; nous avons mis en place 4 filets au départ et nous en avons prélevé un tous les 3 jours. Ainsi nous avons estimé une décomposition de 1,95 % de la masse sèche initiale par jour, ceci durant 15 jours (Fig. 7).

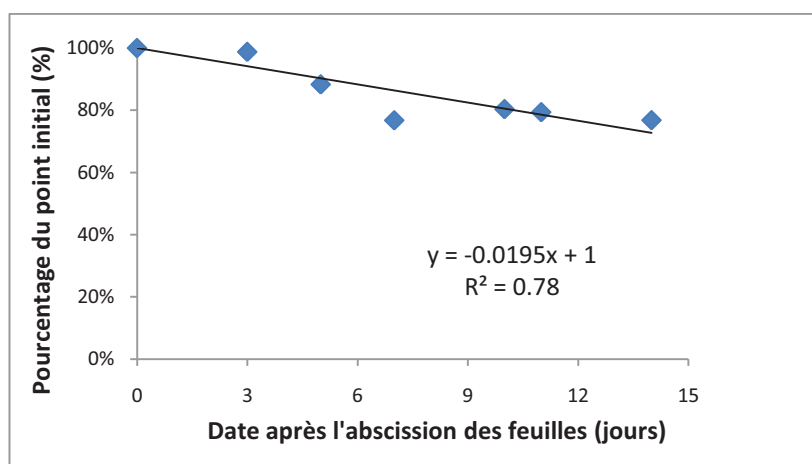


Figure 7 : Evolution de la nécromasse des feuilles avec leur décomposition sur 15 jours.

## VI. Calcul de NPP

Selon l'équation 1, NPP sera calculé comme la somme de la croissance visible, de la chute de litières et éventuellement des exportations (cas des fruits seulement) (Tab. 1).

Tableau 1 : méthodes de calculs ou d'estimation de NPP à l'échelle annuelle par compartiment aérien des caféiers.

Compartiment	Croissance (G)	Mortalité (L)	Exportations (Ex)	NPP = G+L+Ex
Orthotropes	entre 2 sessions extrapolées à l'année	0	0	G
Plagiotropes	entre 2 sessions extrapolées à l'année	Pièges à litières sur un an	0	G+L
Feuilles	0	Pièges à litières sur un an	0	L
Fleurs	0	Pièges à litières sur un an	0	L
Fruits	0	Pièges à litières sur un an	Données ferme	L+Ex

Dans le cadre de ce Master, tous les termes pour le calcul de NPP n'ont été réellement mesurés durant une année complète que pour les compartiments feuilles et fleurs (production de litières). Pour les orthotropes et plagiotropes la croissance (G) ne pourra être calculée

qu'entre les deux sessions de croissance réalisées dans le cadre strict de ce Master : on extrapolera grossièrement à l'année pour avoir une estimation annuelle, et on sommera avec la production de litières annuelles effectivement mesurée. Pour les fruits, les productions de litières ont été mesurées, et les exportations de fruits proviennent des données de ferme (rendement de 2010-2011).

La taille annuelle n'intervient pas en principe dans le calcul de NPP : le C alloué a déjà été comptabilisé dans la croissance ou dans la litière, la taille ne fait que le déplacer.

## Résultats

### I. Construction des relations allométriques par compartiment et composition en C et N (rejets sacrifiés)

#### 1. Allométrie des plagiotropes

Les rameaux plagiotropes (branches horizontales) des 12 rejets de caféiers de notre set de calibration (set utilisé pour les mesures destructives) ont été mesurés et pesés. Nous avons testé différentes relations entre nos variables mesurées et prédites. Nous avons retenu un modèle en logarithmique naturel (Eq. 4) comme couramment utilisé en allométrie, modèle qui utilise seulement la longueur du plagiotrope (mesure plus fiable) et son ordre de ramification (Plagiotrope d'ordre 1 et 2) (Fig. 8).

$$B_{\text{plagio}} = \exp [\ln(k) + \alpha * \ln(\text{Longueur})] \quad \text{Eq. 4}$$

Où :  $B_{\text{plagio}}$  = Biomasse des rameaux plagiotropes  
 $k$  et  $\alpha$  = paramètres d'ajustement de l'équation

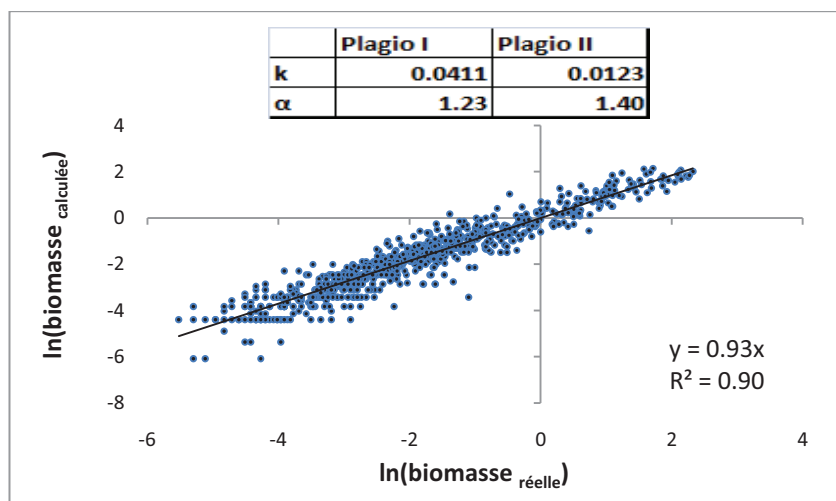


Figure 8 : relation logarithmique entre la biomasse calculée et la biomasse réelle des rameaux plagiotropes des rejets du set de calibration (N=780 plagiotropes).

Nous avons donc utilisé le modèle logarithmique (avec la variable longueur) pour prédire la biomasse totale des plagiotropes des rejets de caféier du set de calibration (N=12 rejets), et vérifié avec notre set de validation (N=11 rejets) la bonne correspondance (Fig. 9).



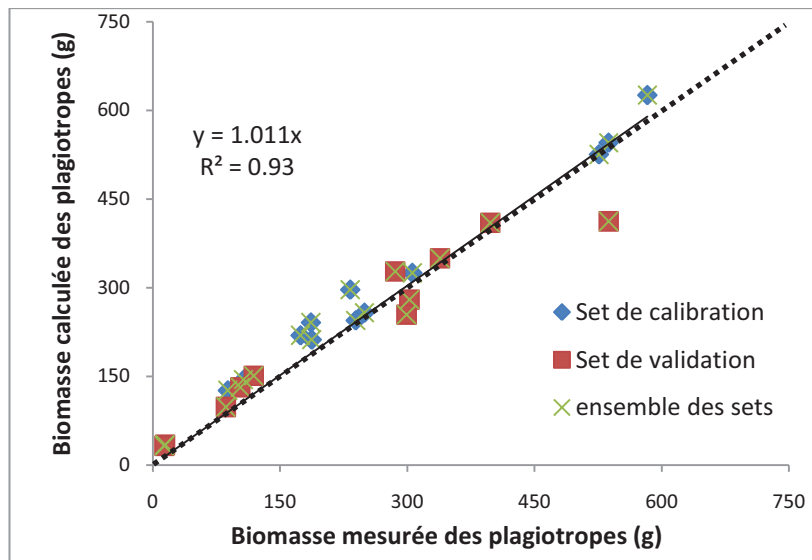


Figure 9 : relation entre la biomasse calculée des plagiotropes et la biomasse mesurée des plagiotropes.

La longueur semble donc être un bon indicateur de la biomasse des plagiotropes, peu sujette aux erreurs majeures (contrairement au diamètre dont la mesure répétée dans le temps nous est apparue trop imprécise).

## 2. Allométrie des orthotropes

La même démarche a été utilisée pour modéliser la biomasse du rameau orthotrope (axe vertical) en fonction des données biométriques des 12 rejets de caféiers de notre set de calibration. Lors de l'inventaire biométrique, le diamètre a été régulièrement mesuré à des hauteurs précises. Ainsi, le modèle décrivant la masse du rameau orthotrope est :

$$B_{ortho} = \alpha \cdot \sum_{i=1}^n L_i \cdot D_i^2 \quad \text{Eq. 5}$$

Où :  $B_{ortho}$  = biomasse du rameau orthotrope du rejet étudié  
 $i$  = nombre de tronçons du rameau orthotrope du rejet étudié  
 $L_i$  = longueur du tronçon  $i$  (cm)  
 $D_i$  = diamètre intermédiaire du tronçon  $i$  (cm)  
 $\alpha$  = coefficient de régression empirique ( $\alpha = 0.00503375$ ,  $N=150$ ,  $R^2=0,99$ )

Pour définir le coefficient de régression empirique, nous avons tracé la régression: biomasse en fonction du  $D^2 \cdot L$  du tronçon. Nous avons choisi une régression linéaire, passant par zéro. La pente de cette droite est ensuite utilisée pour définir la biomasse.

Nous avons ensuite utilisé le modèle et ce coefficient pour regarder la biomasse totale des orthotropes des rejets de caféier, et vérifié la bonne correspondance avec notre set de validation (Fig. 10).

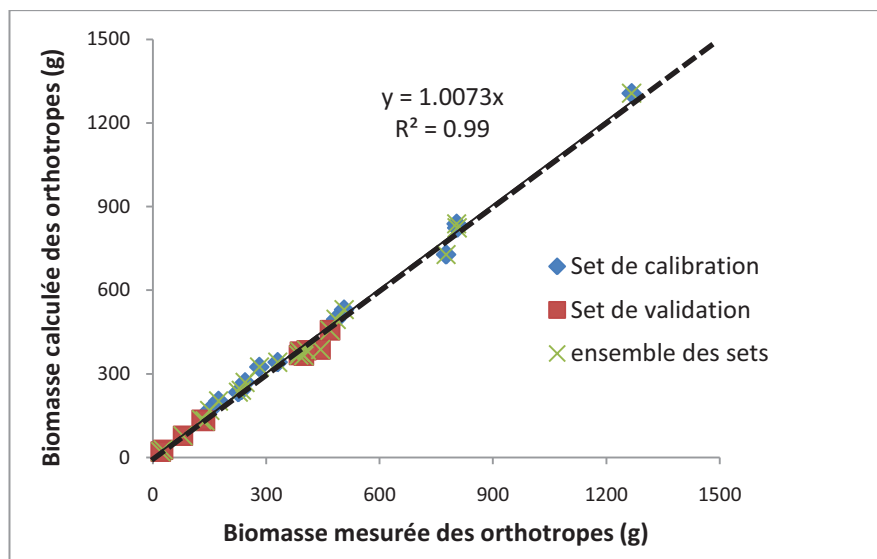


Figure 10 : relation entre la biomasse calculée et mesurée des orthotropes.

### 3. Allométrie des feuilles (SLA OU LMA)

Pour le compartiment des feuilles, après avoir testé différentes relations avec nos différents traitements (âge, effet arbre et position sur le rejet) nous avons constaté que SLA (et donc LMA) variait selon la hauteur des feuilles sur le rejet, avec classiquement des SLA plus bas pour les feuilles de pleine lumière. Nous avons donc ajusté des teneurs spécifiques pour chaque hauteur dans la couronne.

Tableau 2 : Valeurs de SLA et LMA en fonction de l'effet arbre (sous arbre, hors arbre), la position (haut, moyen, bas) et l'âge (3 et 6 ans) du rejet. Test statistique LSD Fisher  $\alpha=0.05$ .

	Effet arbre		Effet hauteur dans la couronne			Effet Age	
	Sous arbre	Hors arbre	Haut	Moyen	Bas	3 ans	6 ans
Surface Moyenne (cm <sup>2</sup> )	23.96±6.84	24.39±5.69	25.05±7.81	24.17±4.86	27.06±6.34	23.71±5.12	24.61±7.05
	n.s		*	*	**	n.s	
SLA (m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )	11.3±1.35	11.81±1.92	9.93±2.07	11.35±1.18	13.4±1.69	11.82±1.8	11.36±1.59
	n.s		*	**	***	n.s	
LMA (g m <sup>-2</sup> )	89.74±11.2	87.12±15.3	100.7±17.72	88.08±9.43	74.65±12.23	86.79±14.8	89.65±12.4
	n.s		*	**	***	n.s	

Nous n'avons pas observé de variation de SLA en fonction de l'âge ou de l'effet arbre. Notre SLA moyen des toutes les feuilles vivantes était de  $11.37 \pm 1.8 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$  (N=14200 feuilles)

### 4. Teneurs en C et N des organes aériens

Les analyses de C et N ont été effectuées sur les échantillons de notre set de calibration, pour les orthotropes, les plagiotropes et pour les feuilles. Le facteur âge n'avait aucun effet sur ces teneurs et les moyennes étaient très similaires (nous ne présentons donc pas cet effet dans les tableaux statistiques suivants). Cette absence d'effet âge observée entre 3 et 6 ans nous permettra de faire l'hypothèse que les âges intermédiaires présentent des teneurs similaires, propriété que nous utiliserons pour calculer les stocks de C et N plus loin. En revanche, les facteurs effets arbres et positions sur le rejet ont présenté des effets significatifs, et ceci pour les compartiments : rameaux orthotropes, plagiotropes et feuilles.

**Tableau 3 : moyenne des teneurs en C des différents organes (rameaux orthotropes, plagiotropes et feuilles) selon l'effet arbre (sous arbre, hors arbre), la position (haut, moyen, bas) et l'âge (3 et 6 ans) sur le rejet. Test statistique LSD Fisher  $\alpha=0.05$ .**

	Effet arbre		Effet hauteur dans la couronne			Effet Age	
	Sous arbre	Hors arbre	Haut	Moyen	Bas	3 ans	6 ans
Rameaux orthotropes en gC g <sup>-1</sup>	47.97±0.33	48.25±0.25	47.79±0.26	48.21±0.15	48.34±0.16	48.09 ± 0.49	48.19 ± 0.41
	*	**	*	**	**	n.s	
Rameaux plagiotropes en gC g <sup>-1</sup>	47.27±0.3	46.79±0.23	46.87±0.3	47.33±0.39	46.9±0.32	47.12 ± 0.59	46.85 ± 0.89
	*	**	*	**	*	n.s	
Feuilles en gC g <sup>-1</sup>	47.78±0.13	48.97±0.66	48.84±1.08	48.43±0.83	47.85±0.15	48.67 ± 0.89	48.21 ± 0.89
	*	**	n.s			n.s	

Le tableau 3 nous montre des différences de la teneur en C dans les rameaux orthotropes selon leur position sur le rejet, ainsi qu'un effet de l'environnement lumineux. Cependant, ces 2 facteurs n'ont pas montré d'interaction. Considérant que le pourcentage de C varié très peu, nous avons donc pris les teneurs en C moyennes ( $48,14 \pm 0,5 \text{ gC g}^{-1}$ ) pour estimer le contenu en C des orthotropes de nos 60 rejets de caféiers,

Ce tableau nous montre aussi des différences de la teneur en C dans les rameaux plagiotropes selon leur position sur le rejet, ainsi qu'un effet de l'environnement lumineux. Cependant, ces 2 facteurs n'ont pas montré d'interaction. Considérant que le pourcentage de C variait très peu, nous avons donc pris les teneurs en C moyennes ( $46,99 \pm 0,8 \text{ gC g}^{-1}$ ) pour estimer le contenu en C des plagiotropes de nos 60 rejets de café.

Enfin ce tableau nous montre des différences de la teneur en C dans les feuilles selon l'effet arbre (sous arbre, hors arbre). Nous avons donc 2 teneurs en C selon effet arbre (teneur<sub>hors arbre</sub> =  $48.97 \text{ gC g}^{-1}$  et teneur<sub>sous arbre</sub> =  $47.78 \text{ gC g}^{-1}$ ). Ces teneurs nous montrent qu'il y a plus de C dans les feuilles des rejets hors arbre que dans celles des rejets sous arbre.

**Tableau 4 : moyenne des teneurs en N des différents organes (rameaux orthotropes, plagiotropes et feuilles) selon l'effet arbre (sous arbre, hors arbre), la position (haut, moyen, bas) et l'âge (3 et 6 ans) sur le rejet. Test statistique LSD Fisher  $\alpha=0.05$ .**

	Effet arbre		Effet hauteur dans la couronne			Effet Age	
	Sous arbre	Hors arbre	Haut	Moyen	Bas	3	6
Rameaux orthotropes en gN g <sup>-1</sup>	1.29±0.23	1.27±0.13	1.47±0.11	1.25±0.07	1.12±0.01	1.28 ± 0.23	1.28 ± 0.2
	n.s		*	**	***	n.s	
Rameaux plagiotropes en gN g <sup>-1</sup>	1.82±0.21	1.80±0.21	2.05±0.01	1.69±0.01	1.7±0.01	1.88 ± 0.3	1.74 ± 0.3
	n.s		*	**	**	n.s	
Feuilles en gN g <sup>-1</sup>	3.16±0.06	3.01±0.03	3.11±0.15	3.08±0.13	3.07±0.04	3.08 ± 0.21	3.08 ± 0.17
	**	*	n.s			n.s	
Feuille en gN m <sup>-2</sup>	2.8±0.44	2.55±0.16	1.48±0.72	1.1±1.1	0.84±0.24	1.08±1.17	1.13±1.07
	**	*	*	**	***	n.s	

Nous avons constaté dans le tableau 4 une différence significative de la teneur en N des orthotropes selon leur position sur le rejet, mais pas selon l'effet arbre. Nous avons donc 3 teneurs en N selon la position sur le rejet (teneur<sub>haute</sub> =  $1.47 \text{ gN g}^{-1}$  ; teneur<sub>moyenne</sub> =  $1.25 \text{ gN g}^{-1}$  et teneur<sub>basse</sub> =  $1.12 \text{ gN g}^{-1}$ ). Ces teneurs nous montrent qu'il y a plus d'N dans la partie haute des orthotropes des rejets. On a une croissance de la teneur en N dans l'orthotrope du bas vers le haut du rejet.

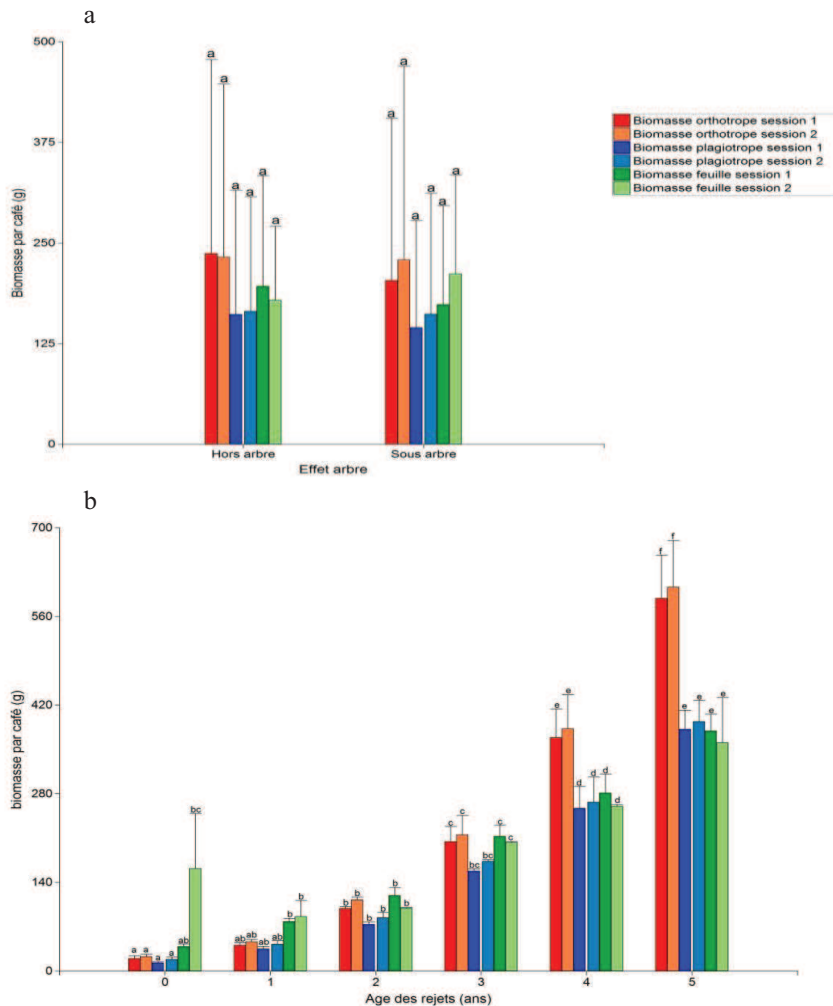
Nous avons également constaté dans ce tableau une différence significative de la teneur en N dans les plagiotropes selon la position sur le rejet, mais pas selon l'effet arbre. Nous avons donc 3 teneurs en N selon la position sur le rejet (teneur<sub>haute</sub> = 2.05 gN g<sup>-1</sup> ; teneur<sub>moyenne</sub> = 1.69 gN g<sup>-1</sup> et teneur<sub>basse</sub> = 1.7 gN g<sup>-1</sup>). Ces teneurs nous montrent qu'il y a plus de N dans les plagiotropes de la partie haute des rejets. Nous avons donc une croissance de la teneur en N dans les plagiotropes du bas vers le haut du rejet.

Enfin ce tableau nous montre des différences de la teneur en N dans les feuilles selon l'effet arbre (sous arbre, hors arbre). Nous avons donc pour 2 teneurs selon l'effet arbre pour N (teneur<sub>hors arbre</sub> = 3.01 gN g<sup>-1</sup> et teneur<sub>sous arbre</sub> = 3.16 gN g<sup>-1</sup>). Ces teneurs nous montrent il y a plus de N dans les feuilles des rejets sous arbre que dans celles des rejets en hors arbre.

## II. Application des relations allométriques à l'estimation de la biomasse et des stocks de C et N (rejets suivies en croissance)

### 1. Biomasse des rejets

A partir des différentes relations allométriques, nous avons pu estimer la biomasse des différents organes de nos 60 rejets de caféiers suivis au cours du temps. Et donc la croissance visible de la partie aérienne entre nos deux sessions de mesures (mars et avril 2011).



**Figure 11 : graphiques en barre représentant la biomasse des parties aériennes (orthotrope + plagiotrope + feuille) observée aux sessions 1 (mars 2011) et 2 (avril 2011) des 60 rejets de caféiers suivis en croissance, selon 2 facteurs (âge des rejets et effet arbre). Test statistique LSD Fisher  $\alpha=0.05$ .**

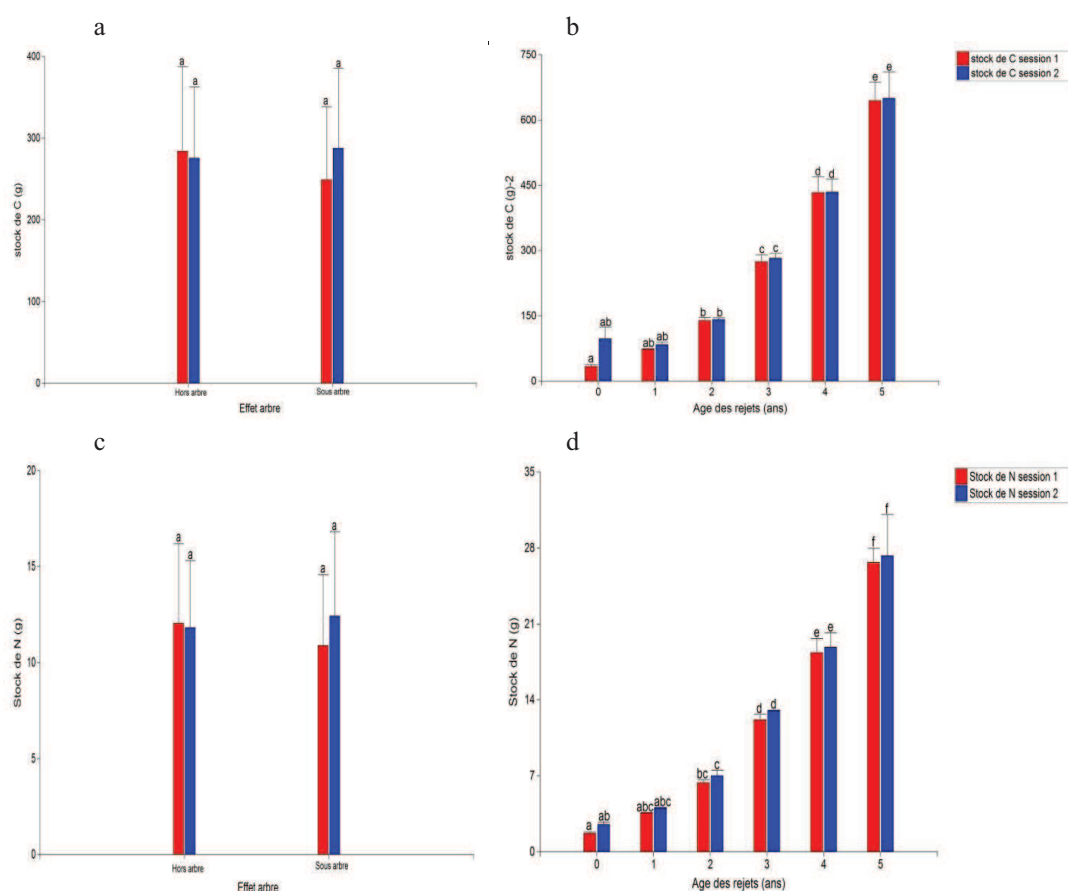
**a : biomasse en g des parties aériennes en fonction de l'effet arbre.**

**b : biomasse en g des parties aériennes en fonction des âges des rejets.**

La biomasse moyenne des parties ligneuses (ortho+plagios) était de  $397 \pm 38.23$  gMS par rejet et celui des feuilles de  $198 \pm 16.36$  gMS durant la première session soit un total de  $594 \pm 54.18$  gMS par rejet, ce qui équivalait à  $10.3 \pm 0.94$  Mg ha<sup>-1</sup> pour une population de 17338 rejets. Lors de la deuxième session, la biomasse moyenne des parties ligneuses (ortho+plagios) était de  $410 \pm 36.82$  gMS par rejet et celui des feuilles de  $196 \pm 12.7$  gMS, soit un total de  $606 \pm 48.94$  gMS par rejet, ce qui équivalait à  $10.51 \pm 0.85$  Mg ha<sup>-1</sup>. On n'a pas observé de différence significative entre les 2 effets arbres (sous arbre, hors arbre) concernant la biomasse des 60 rejets (Fig. 11a), au contraire de l'effet de l'âge (Fig. 11b).

## 2. Stocks de C et de N

A partir des biomasses calculées sur les 60 rejets en suivi et des teneurs en C et N provenant des analyses élémentaires effectuées sur les rejets sacrifiés, nous avons calculé les quantités ou stocks de C et N des différents organes.



**Figure 12 : graphiques en barre représentant les stocks de C et de N des parties aériennes observées aux sessions 1 et 2 (mars et avril) des 60 rejets de caféiers, selon 2 facteurs. Test statistique LSD Fisher  $\alpha=0.05$ .**

**a : stock de C (g) de la partie aérienne en fonction de l'effet arbre.**

**b : stock de C (g) de la partie aérienne en fonction de l'âge des rejets.**

**c : stock de N (g) de la partie aérienne en fonction de l'effet arbre.**

**d : stock de N (g) de la partie aérienne en fonction de l'âge des rejets.**

Le stock moyen de C des parties ligneuses (ortho+plagios) était de  $189 \pm 18.23$  gC par rejet et celui des feuilles de  $95 \pm 7.85$  gC durant la première session soit un total de  $284 \pm 25.88$  gMS par rejet, ce qui équivalait à  $4.9 \pm 0.44$  Mg ha<sup>-1</sup> pour une population de 17338 rejets. Le stock moyen de N des parties ligneuses (ortho+plagios) était de  $6.13 \pm 0.59$  gN par rejet et celui des feuilles de  $6.01 \pm 0.49$  gN durant la première session soit un total de  $12.14 \pm 1.07$  gMS par rejet, ce qui équivalait à  $0,21 \pm 0.02$  Mg ha<sup>-1</sup> pour une

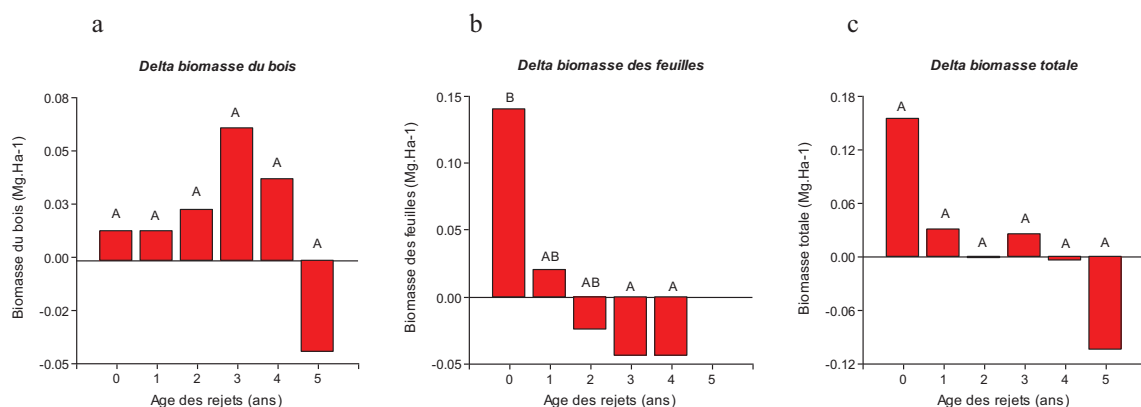
population de 17338 rejets. Compte-tenu du fait que les teneurs en C et en N avaient été démontrées peu variables en moyenne entre les traitements, les différences de stocks (Fig.12) s'expliquent presque exclusivement par les différences de biomasses. On retrouve ainsi les mêmes conclusions sur les stocks de C et N que sur les biomasses, à savoir pas d'effet arbre et fort effet âge.

### 3. Croissance visible et extrapolation à la parcelle

Afin de calculer la croissance visible, G (en biomasse et en stocks de C et N) à l'échelle de la parcelle, nous avons utilisé G mesurée sur les 60 rejets de caféiers (distingués par classe d'âge et effet arbre) et nous l'avons pondérée par la fréquence des rejets dans chaque classe (données issues de l'inventaire effectué sur la parcelle). Nous insistons sur le fait que la croissance n'a pu être évaluée dans ce stage qu'entre deux sessions et donc que les conclusions restent ponctuelles et appelleront confirmation à l'échelle annuelle.

Entre les deux sessions il y a eu la taille, donc le nombre de rejets de caféier a diminué. Néanmoins, on calculera G dans la suite en utilisant seulement la population initiale de rejets (soit 17338 rejets par hectare).

Les conclusions sur les variations de stocks de C et de N entre les deux sessions et à l'échelle de la parcelle sont les mêmes que pour la biomasse (les teneurs n'ont été mesurées qu'une seule fois), les données ne seront donc pas montrées.



**Figure 13 : Effets de l'âge des rejets sur la production de biomasse en Mg. Ha<sup>-1</sup> entre les deux sessions de mesures. Test statistique LSD Fisher  $\alpha=0.05$ .**

**a : effet de l'âge des rejets sur la biomasse du bois.**

**b : effet de l'âge des rejets sur la biomasse des feuilles.**

**c : effet de l'âge des rejets sur la biomasse totale.**

Nous n'avons observé aucune différence significative de G des parties ligneuses avec l'âge (Fig. 13a). Toutes les valeurs sont positives, sauf pour les rejets de 5 ans qui sont négatives. Mais, nous observons une différence importante de la croissance du compartiment des feuilles sur le rejet de l'année (0 an, croissance positive) par rapport aux autres rejets qui ont tous perdu des feuilles entre les deux dates, sauf à 1 an où les rejets sont restés proches de l'équilibre (Fig. 13b). Le delta total de la biomasse produite entre les 2 sessions (bois et feuilles) ne présente aucune différence significative avec l'âge (Fig. 13c), même si la tendance globale est au ralentissement de la croissance avec l'âge, avec une croissance plus élevée pour les rejets de 1 an et une croissance négative pour les rejets de 5 ans. Cette décroissance du bois pour les rejets de 5 ans peut être dû au fait de la présence d'un plus grand nombre de rameaux plagiotropes morts et donc à des pertes de biomasse du rejet.

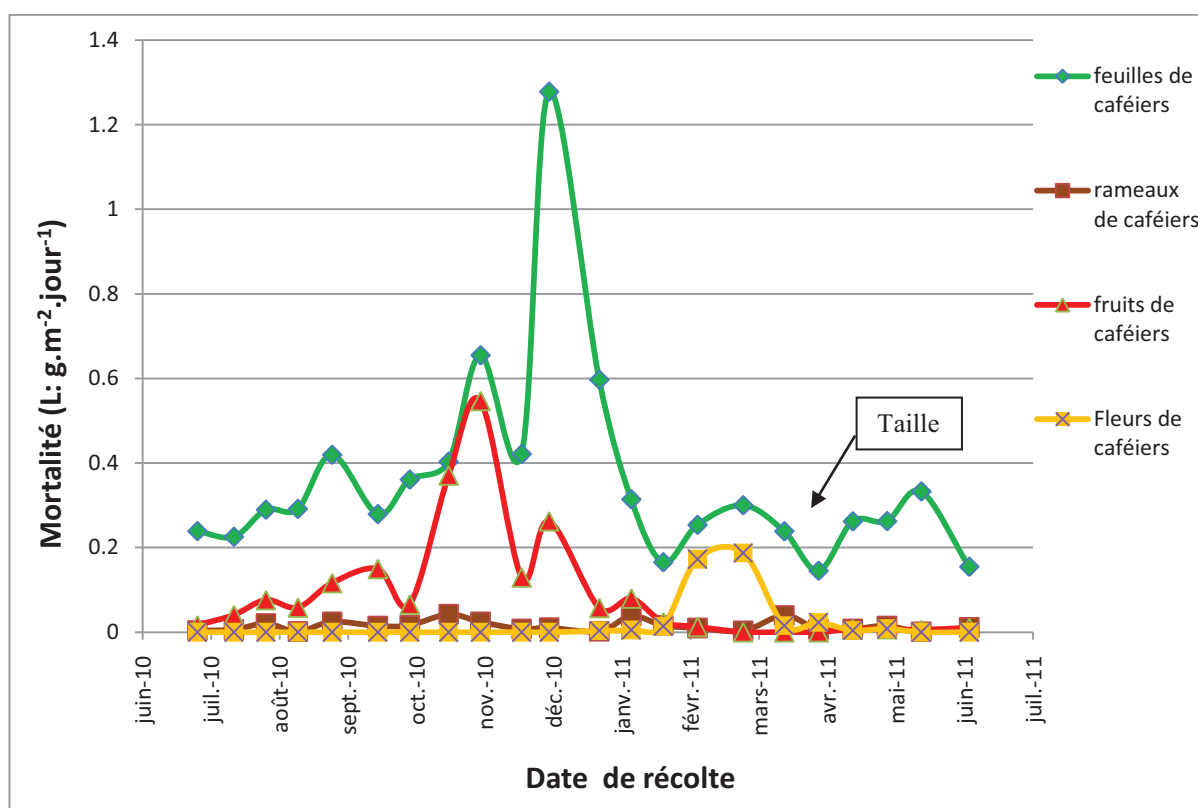
Le tableau 5 résume les résultats de biomasse et de croissance moyenne G mesurée entre les deux sessions.

**Tableau 5 : Biomasses observées durant les deux sessions de mesure (60 rejets de caféiers, mars et avril 2011) et calcul du delta instantané de biomasse.**

Session 1		Session 2		G = delta		G = delta	
Mg ha <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-2</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-2</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup> j <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup> j <sup>-1</sup>
Biomasse du bois	Biomasse des feuilles	Biomasse du bois	Biomasse des feuilles	Biomasse du bois	Biomasse des feuilles	Biomasse du bois	Biomasse des feuilles
6.88	3.42	7.11	3.40	0.23	-0.03	0.00542	- 0.00058

#### 4. Variabilité saisonnière de la mortalité par compartiments

La mortalité des compartiments feuilles, fruits, rameaux et fleurs a été mesurée durant une année entière par pièges à litières répartis le long de transects.

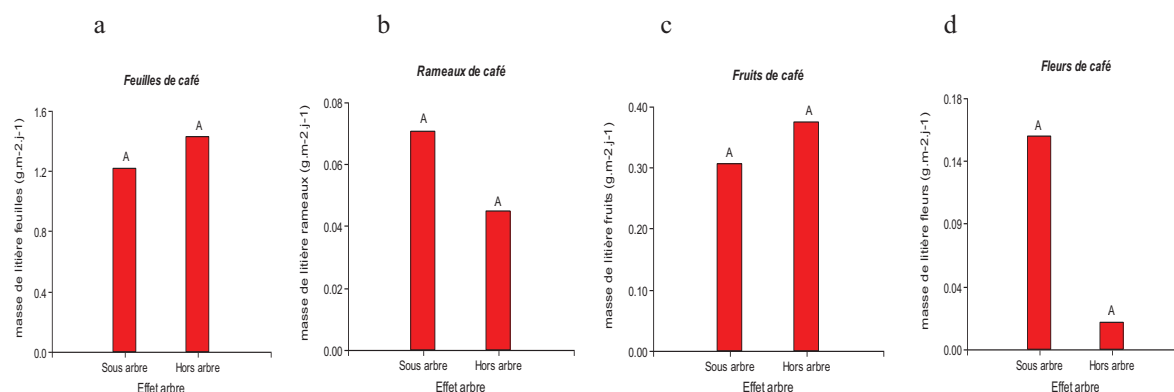


**Figure 14 : Variabilité intra-annuelle des récoltes de litière pour les différents compartiments (feuilles, branches, fruits et fleurs) du caféier. La flèche rouge verticale indique la période de la taille annuelle des rejets âgés (entre 28 mars et 8 avril 2011). NB : les litières de feuilles mesurées ont été corrigées pour un facteur de 1,95% de perte en masse dans le filet, entre chute et récolte.**

On a observé (Fig. 14) que le compartiment des feuilles contribuait majoritairement aux litières annuelles (production relativement constante autour de 0,3 g m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup> et pic de mortalité entre novembre et mi-janvier), suivi du compartiment des fruits (pic simultané à celui des feuilles, valeur moyenne autour de 0,1 g m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>). Les pics de mortalité des feuilles et de fruits pourraient provenir en grande partie des effets de la récolte manuelle qui s'étale entre août et janvier, avec un pic de récolte de fruits fin octobre. La contribution des rameaux et des fleurs était minimale, on notera toutefois que les fleurs contribuent significativement à la masse de la litière, à hauteur de 0.2 g m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup> en février. La taille annuelle des rejets âgés opérée entre

le 28 mars et le 8 avril 2011 n'a pas eu d'effet visible sur les récoltes de litières dans les pièges.

On n'a observé aucune différence significative de la masse des litières des compartiments feuilles, rameaux et fruits de caféier entre les 2 effets arbre d'ombrage (sous arbre, hors arbre). Par contre, le compartiment fleurs présente une différence significative ; hors arbre on a observé une masse de litière de  $0,02 \text{ g m}^{-2} \text{ j}^{-1}$  alors que sous arbre, elle était multipliée par 7, avec une masse de  $0,15 \text{ g m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ .



**Figure 15 : Masse de litière de café par compartiment (feuilles, rameaux fruits, fleurs) en fonction de l'effet arbre. Test statistique LSD Fisher  $\alpha=0.05$ .**

- a: masse de litière de feuilles de café en fonction de l'effet arbre.**
- b: masse de litière de rameaux de café en fonction de l'effet arbre.**
- c: masse de litière de fruits de café en fonction de l'effet arbre.**
- d: masse de litière de fleurs de café en fonction de l'effet arbre.**

On n'a pas pu tester ici l'effet âge des rejets sur la production de litières, car les pièges à litière avaient été disposés de manière à fournir une évaluation par hectare, et non pas par rejet. La mortalité annuelle relevée dans les pièges fut de  $1.7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , dont 74% représentés par les feuilles, 19% par les fruits et 7% seulement pour parties ligneuses et fleurs (Tab. 6).

**Tableau 6 : Mortalité annuelle (L) par compartiments aériens de caféier. NB. Cette mortalité n'inclut pas les pertes liées à la taille annuelle ni aux exportations de fruits de café qui seront comptabilisés plus bas (partie NPP).**

	Mortalité de feuilles	Mortalité naturelle de parties ligneuses	Mortalité naturelle de fruits	Mortalité de fleurs	Total (L)
<b>Mg ha<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup></b>	1.28	0.049	0.324	0.076	1.73
<b>%</b>	74.0%	2.8%	18.8%	4.4%	100.0%

## 5. NPP annuel

Selon l'Eq. 1, NPP a été calculée à l'année comme la somme de la croissance visible, de la chute de litières et éventuellement des exportations (cas des fruits seulement). NPP totalisait  $7.6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , dont 52 % correspondant à des exportations de fruits, 26 % à de la croissance visible (parties ligneuses) et 23 % de la mortalité naturelle (Tab. 7). En faisant la somme de L et Ex, on conclut que les caféiers investissaient 75 % de leur C des rejets vers des compartiments labiles (fruits, feuilles, fleurs), ce qui les classe clairement parmi les plantes pérennes à investissement prioritaire dans les compartiments à fort turnover.



**Tableau 7 : Croissance, mortalité, exportations et NPP à l'échelle annuelle par compartiment aérien des caféiers. Les valeurs en italiques ont été estimées par extrapolation de deux sessions de mesure à l'année entière. Les autres valeurs ont été mesurées.**

Compartiment	Croissance (G) Mg ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>	Mortalité (L) Mg ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>	Exports (Ex) Mg ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>	NPP (G+L+Ex) Mg ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>
Orthotropes	<i>0.78</i>	0	0	<i>0.78</i>
Plagiotropes	<i>1.20</i>	0.049	0	<i>1.25</i>
Feuilles	0	1.277	0	1.28
Fleurs	0	0.076	0	0.08
Fruits	0	0.324	3.9	4.27
<b>Totaux</b> Mg ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>	1.98	1.73	3.9	7.6
<b>Totaux %</b>	26%	23%	52%	100%

## Discussion

L'objectif de ce stage était d'évaluer NPP (Productivité Primaire Nette) aérienne des rejets de souche (à l'exclusion des souches et des parties racinaires) et apparente (à l'exclusion des réserves) dans une plantation de caféier (*Coffea arabica* var. *Catura*). Cette étude venait en appui au projet « Coffee-Flux » de mesure des bilans de C à l'échelle de la parcelle agroforestière.

Des relations allométriques ont été définies, calibrées et validées *in situ*, puis appliquées à une population de rejets dans un dispositif expérimental construit pour tester les effets « âge des rejets après la taille » et « arbre d'ombrage », effets supposés induire une grande partie de la variabilité observée intra-parcelle. On a mesuré la croissance entre deux sessions de mesure et la production de litières sur un an afin de calculer NPP par compartiment.

Le travail présentait un certain nombre d'originalités.

Le choix s'est porté sur le caféier, une plante pérenne tropicale, sélectionnée de longue date pour ses rendements en fruits. L'hypothèse sous-jacente était qu'une telle plante pérenne fruitière allouerait beaucoup de C vers les fruits. Ajouté au C alloué aux feuilles, une forte proportion du C serait ainsi détournée de la croissance des parties pérennes. Cette partition du C entre biomasse et litière est susceptible de varier grandement entre les plantations forestières (C alloué principalement vers le bois) et les plantations d'arbres fruitiers, ce qui changerait le destin à long terme du C ainsi que la durabilité de son stockage (biomasse ou sol) (Roupsard et al., 2008)

La plupart des études sur le stockage de C dans la biomasse et le sol sont réalisées à l'aide de chronoséquences et donnent des informations sur le bilan net de C de l'écosystème mais à un pas de temps de l'ordre de plusieurs années. En général, les flux ne sont pas distingués, et la production de litières est souvent négligée, alors qu'elle a une influence directe pour expliquer les variations de MOS et les recyclages. La présente étude avait justement pour objectif d'explicitier les flux du C dans la plante, et la partition entre la croissance, la production de litières et les exportations. Une bonne connaissance des apports de litière est une clé des études de décomposition et de stockage de MOS.

Beaucoup d'études portent sur des peuplements relativement homogènes, ou sur des individus particuliers, et peu sur des taillis. Notre parcelle d'étude du café agroforestier était au contraire très hétérogène, en raison de la taille sélective qui y est pratiquée et de la distribution des arbres d'ombrage : nous avons donc développé une approche originale

(inventaire et dispositif statistique) afin de nous permettre d'extrapoler des échantillons étudiés à l'hectare. Une évaluation correcte avait une grande importance pour relier plus tard les résultats à d'autres flux mesurés à l'échelle parcelle, tels que la productivité primaire brute (GPP) ou la respiration de l'écosystème et du sol.

Nous proposons donc d'articuler notre discussion autour de deux axes principaux présentés comme une originalité de notre travail, la variabilité intra-parcelle d'une part (en détaillant les effets de la taille et des arbres d'ombrage), et la partition de NPP d'autre part.

## I. Variabilité intra-parcelle

### 1. Effets de l'âge des rejets (induit par la taille)

L'âge des rejets est l'effet majeur que nous avons observé à l'intérieur de notre parcelle. La taille annuelle entretient des cohortes de rejets, âgés de 1 à 6 ans, répartis dans des fréquences relativement homogènes.

Comme attendu, l'âge des rejets affectait fortement leur biomasse. Nous avons évalué la biomasse des rejets de caféiers à  $594 \pm 54.18 \text{ g}_{\text{MS}}$  par rejet, ce qui équivalait à  $10.3 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Ce résultat est proche des ceux rapportés par Alpizar et Fassbender (Alpizar et al., 1985; Fassbender et al., 1985) (valeurs de biomasse aérienne de jeunes caféiers de 4.5 ans entre 8.8 et  $16.4 \text{ t}_{\text{MS}} \text{ ha}^{-1}$ , pour du café sous *Cordia alliodora* à 278 tiges  $\text{ha}^{-1}$  et *Erythrina peopiggiana* à 555 tiges  $\text{ha}^{-1}$ , respectivement) dans une plantation de café au Costa Rica proche de la nôtre. Cependant, nos valeurs étaient environ inférieures de moitié à celles rapportées par Siles (Siles et al., 2010a) dans une plantation de café en conditions optimales sous *Inga densiflora* ( $18\text{-}19.6 \text{ t}_{\text{MS}} \text{ ha}^{-1}$  pour des caféiers de 7 ans). Une telle variabilité dans les résultats doit pouvoir être expliquée par des différences en cultivars, température moyenne, fertilité et âge des plantes. Il est probable que passé 30 ans, les cafés de notre parcelle aient été affectés par une baisse de la vigueur, végétative et reproductive. En outre, notre étude est l'une des rares à avoir estimé la biomasse non pas en utilisant des caféiers moyens mais en décrivant finement la structure de la population.

Les teneurs en C étaient conformes aux valeurs de 48-50  $\text{gC g}^{-1}$  généralement rapportée pour de nombreuses plantes et organes de plantes (Mäser et al., 2003). Les teneurs en N, et notamment les teneurs foliaires en N sont réputées normales pour du caféier bien fertilisé, elles varient entre 1 (Carelli et al., 1999) et 3.6 (Bradshaw and Rice, 1998) dans la littérature.

SLA variait dans notre étude autour de  $11.37 \pm 1.8 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ . (Vaast et al., 2005a) rapportent des variations entre 6.4 et  $9.3 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ , tandis que (Carelli et al., 1999) trouvent des valeurs entre 4.8 et  $5.9 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ . SLA apparaît donc éminemment variable, et particulièrement élevé dans notre parcelle. Nous n'avons pas observé d'effet sur le SLA, ni sur les teneurs en C, ni sur celles en N. Ces propriétés observées ici nous permettront donc de simplifier les modèles d'allocation du C et de l'N.

### 2. Effets de la distance aux arbres d'ombrage

Une hypothèse défendue classiquement en agroforesterie est que les arbres d'ombrage ont un effet local sur le microclimat (radiatif, température, humidité) du sous-étage mais également au niveau de la compétition racinaire. Cet effet dépend logiquement directement de la densité des arbres.

Dans notre parcelle, nous avons une densité d'arbres peu élevée, de l'ordre de 15 arbres  $\text{ha}^{-1}$ . Il s'agissait néanmoins d'arbres de grande taille, d'environ 20 m de haut, couvrant environ 15% de la surface des caféiers par la projection verticale de leurs couronnes, et dont les branches basses commençaient à environ 2 m du sommet des caféiers. Une simulation par le modèle MAESTRA (Medlyn et al., 2007) nous indiquait que le PAR annuel absorbé par les

caféiers sous arbres ne serait que de moins de 5 % inférieur à la situation de plein soleil (F. Charbonnier, Comm. Pers.). Notre étude devait donc nous permettre de trancher clairement sur la question de l'effet réel de ces arbres, dans cette parcelle particulière, sur les caféiers.

Nous n'avons pas observé d'effet significatif « distance à l'arbre » sur le SLA, ce qui est inattendu du fait que nous avons bien observé un effet de la hauteur des feuilles dans la couronne sur le SLA. Cette absence d'effet est d'autant plus surprenante que même les moyennes de SLA ne semblaient pas inférieures dans le traitement au soleil ( $11.8 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ ) comparées aux  $11.3 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$  dans le traitement sous arbre.

Nous avons observé un effet léger sur les teneurs en C et en N. Néanmoins, les différences de moyennes étaient seulement de l'ordre de 1 % pour les teneurs en C entre les traitements, et confirme l'hypothèse que la teneur en C est en général peu variable autour des 50%. Pour l'N, nous avons observé un effet significatif avec des valeurs légèrement plus faibles ( $3.01 \text{ gN g}^{-1}$ ) dans le traitement hors arbre que dans le traitement sous arbre ( $3.16 \text{ gN g}^{-1}$ ). Une fois divisé par le SLA, nous observons que les concentrations de N, exprimées par  $\text{m}^2$  de feuilles, sont supérieures sous les arbres ( $2.80 \text{ gN m}^{-2}$ ) que hors-arbres ( $2.55 \text{ gN m}^{-2}$ ), ce qui allait à l'encontre des hypothèses générales. Ainsi, il semblerait qu'à l'intérieur des couronnes, la concentration de N par  $\text{m}^2$  de feuilles soit effectivement supérieure pour les feuilles de pleine lumière (voir paragraphe ci-dessous), mais qu'un autre facteur que la lumière affecte N par  $\text{m}^2$  quand on compare les traitements sous arbre et hors-arbre. Comme on n'a pas observé d'effet significatif du traitement arbre d'ombrage ni sur la biomasse, ni sur la croissance des rejets, on ne peut non plus invoquer un quelconque effet de dilution de N par la croissance.

Nous concluons donc que les arbres d'ombrage, compte-tenu leur faible densité d'environ 15 arbres  $\text{ha}^{-1}$  ont eu très peu voire pas d'effet sur les rejets de caféiers du sous-couvert. Ce résultat, une fois conforté sur au moins une année, permettra de simplifier les hypothèses et les modèles qui sont projetés dans le projet Coffee-Flux pour estimer les flux à l'hectare.

### 3. Effets intra-couronne

Le SLA des feuilles était variable à l'intérieur des couronnes : le SLA montrait des valeurs plus basses dans les hauts de couronne, dû probablement à des épaisseurs de feuilles plus élevées chez les feuilles de pleine lumière (nous n'avons pas vérifié dans notre étude si le parenchyme palissadique des feuilles de pleine lumière était plus épais), résultat assez classique qui supporte l'hypothèse d'optimalité de l'allocation de N pour maximiser la photosynthèse des couronnes. Hypothèse confirmée par le calcul de la concentration en N par unité de surface foliaire. Les feuilles de la partie haute de la couronne avaient une concentration nettement plus importante en N ( $1.48 \text{ gN m}^{-2}$ ) que celles du bas de la couronne ( $0.84 \text{ gN m}^{-2}$ ).

## II. NPP et sa partition

La croissance végétative des parties ligneuses (bois des tiges et rameaux) a été évaluée à  $1.98 \text{ t}_{\text{DM}} \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , soit dans la fourchette présentée par Alpizar (Alpizar et al., 1985) et Fassbender (Fassbender et al., 1985) (soit entre  $1.54$  et  $3.28 \text{ t}_{\text{DM}} \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ) mais presque le double des  $1.06 \text{ t}_{\text{DM}} \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  rapportés par Harmand (Harmand et al., 2007) dans des conditions d'altitude, de densité et de LAI comparables mais sous *Eucalyptus deglupta* à 110 tiges  $\text{ha}^{-1}$ . Il faut rappeler le fait que la croissance des parties ligneuses n'a été observée qu'entre deux sessions puis extrapolée grossièrement à l'année, il se peut que le taux de croissance instantané soit différent de la moyenne annuelle. Néanmoins, la croissance apparaissait forte la première année puis en décroissance avec l'âge, et enfin stabilisée vers

l'âge de 5 ans. La taille est surtout motivée chez les producteurs par la chute de la production en fruits à cet âge, mais notre observation indique un épuisement concomitant des parties végétatives et reproductives. Ce premier résultat devra être confirmé quand les données de croissance seront disponibles sur une année complète.

La mortalité était de  $1.73 \text{ t}_{\text{DM}} \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , dont  $1.3 \text{ t}_{\text{DM}} \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  provenant des litières de feuilles. Harmand (Harmand et al., 2007) rapportent des litières de feuilles de  $0.17 \text{ t}_{\text{DM}} \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , ce qui est inférieur d'un facteur 10, mais notons qu'en général le risque des pièges à litière est plutôt de sous-estimer les quantités de litières, à cause de pertes liées aux sautes de vent. Les mortalités de fruits sont très rarement rapportées dans la littérature, nous avons obtenu une valeur de  $0.364 \text{ t}_{\text{DM}} \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . En revanche, la production annuelle fruitière est la variable la plus communément publiée, bien qu'en général ne soit présentée que le rendement en grain vert (c'est-à-dire en grains dé-parchés) : nous avons un rendement de  $3.9 \text{ t}_{\text{DM}} \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  de fruits secs (pulpe + mucilage + parche + graines) et avons utilisé un coefficient de 2 pour convertir les données de la littérature de grain vert en fruit sec (Zambrano-Franco and Zuluaga-Vasco, 1993) et (Avelino J., Comm. Pers.). Dans la littérature, le rendement est très variable, en particulier entre années, nous avons trouvé par exemple des rendements variant entre 2.5 (Harmand et al., 2007) (une année faible) et 7.4 (Siles et al., 2010a) (une année forte), alors que la moyenne nationale du Costa Rica serait de  $3.4 \text{ t}_{\text{DM}} \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  de fruits secs (Siles et al., 2010a).

D'après notre étude, NPP des rejets de souche du caféier totalise  $7.6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . Il faudra bien sûr rajouter plus tard la productivité des souches, la productivité souterraine et la contribution des arbres d'ombrage, ce qui selon une estimation rapide pourrait porter la productivité totale de la parcelle à environ  $10\text{-}15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . Cette valeur indique une productivité faible comparé au cocotier qui a une NPP de  $32 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  (Navarro et al., 2008), de l'Eucalyptus du Congo ( $22\text{-}32 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , source Y. Nouvellon Comm. Pers.) ou l'Eucalyptus du Brésil irrigué et fertilisé, qui présente une productivité record de  $50$  à  $60 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  (Stape et al., 2008). Il faut rappeler que le caféier est une plante d'ombre, avec une photosynthèse assez faible. En outre, la température moyenne du site n'était que de  $19.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , ce qui est relativement peu à cette latitude (effet de l'altitude) deux remarques qui peuvent aider à expliquer cette valeur faible de productivité.

Cinquante-deux % de NPP des rejets correspondait à des exportations de fruits (Ex), 26 % à de la croissance visible (parties ligneuses) (G) et 23 % à de la mortalité naturelle (L). En faisant la somme de L et Ex, on conclut que les caféiers investissaient 75 % de leur C des rejets vers des compartiments labiles (fruits, feuilles, fleurs), ce qui les classe clairement parmi les plantes pérennes à investissement prioritaire dans les compartiments à fort turnover. Cette propriété est assez typique des plantations fruitières pérennes tropicales à variétés sélectionnées pour leur productivité, comme par exemple les palmiers (palmier à huile, cocotier). Chez le cocotier par exemple, 88 % du C est investi dans des organes à turnover rapide et 12 % seulement dans la croissance des parties pérennes (Navarro et al., 2008). En revanche, dans des plantations forestières comme l'eucalyptus, la partition serait de 51 % pour les litières dans le cas de plantations peu productives du Congo (PF1, Y. Nouvellon, Comm. Pers) et 16 % dans le cas de plantations extrêmement productives du Brésil, fertilisées et irriguées à l'optimum (Stape et al., 2008), le reste étant alloué à la croissance des troncs et des racines, essentiellement.

Il apparaît que les plantes pérennes fruitières ont tendance à allouer peu de C dans des structures pérennes, une conséquence de leurs propriétés naturelles mais aussi de la sélection artificielle qui a eu pour objectif le plus souvent de maximiser le rendement fruitier, et par voie de conséquence le Harvest Index (HI). S'agissant de considérer également les capacités de stockage de C par des plantations à fort turnover et exportations, il apparaît clairement que

le destin du C des plantations de café dépend beaucoup plus du destin des litières (minéralisation ou incorporation), de celui des résidus de traitement (dans le cas du café, destin des pulpes, mucilages et parches extraits durant le processus), de celui des produits de la taille (exportation des orthotropes comme bois domestique ou bien minéralisation dans la parcelle), de celui des parties commerciales du fruit (grain de café, consommé et donc finalement respiré), que du stockage de C dans les parties pérennes (généralement comptabilisé par les méthodes IPCC). Nous arguons que les méthodes IPCC élaborées au départ pour des plantations forestières sont largement inadaptées pour évaluer la séquestration de C dans les plantations pérennes fruitières en général, surtout si on ignore ou évalue incorrectement les variations de stockage de C dans le sol.

En considérant les méthodes de gestion du café, et notamment la gestion des résidus de taille annuelle, qui représente 1/6 des rejets, tous parmi les rejets les plus grands âgés de 6 ans, soit environ  $2.9 t_{DM} ha^{-1} an^{-1}$ , il est important de noter, et notre étude le permet, que cela représenterait environ 28 % de la biomasse à l'hectare ou encore 38 % de la NPP. Le destin des orthotropes, qui peuvent être soit exportés de la parcelle (et utilisés en bois de chauffe) soit laissés à décomposer lentement au sol est susceptible d'affecter de manière importante le destin de la MOS. En effet, ces orthotropes représentent 60 % de la masse des rejets taillés, soit  $1.7 t_{DM} ha^{-1} an^{-1}$  environ.

## Conclusions et Perspectives

Nous avons mis au point des relations allométriques à l'échelle du rejet de caféier. Elles ont permis d'estimer la biomasse des rejets et les stocks de C et N, au cours des âges, après la taille de recépage, et en fonction de la distance des caféiers aux arbres d'ombrage. La croissance des rejets apparaissait forte la première année puis décroissait avec l'âge, et enfin se stabilisait vers l'âge de 5 ans. Nous avons donc un épuisement concomitant des parties végétatives et reproductives au cours du temps. Par contre, les arbres d'ombrage, du fait de leur faible densité sur la parcelle ( $15 \text{ arbres} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), n'ont pas eu d'effet sur la croissance des rejets de caféier. Les stocks de C et de N n'étaient pas affectés par l'effet âge des rejets, par contre, nous observions un léger effet de l'ombrage sur le stock de N. Avec le SLA et la mesure de la teneur en N par unité de surface foliaire, nous avons constaté un effet intra-couronne, du fait sûrement de l'épaisseur plus élevée des feuilles de pleine lumière, interprété comme une optimisation de l'allocation de N, pour maximiser la photosynthèse des couronnes.

NPP mesuré dans cette étude totalisait  $7.6 \text{ Mg}_{MS} ha^{-1} an^{-1}$ , 52 % correspondant à des exportations de fruits, 26 % à de la croissance visible (parties ligneuses) et 23 % à de la mortalité naturelle. Les caféiers investissaient donc 75 % de leur C des rejets vers des compartiments labiles (fruits, feuilles, fleurs), et peu dans les organes pérennes. Le destin du C à long terme est donc plus à rechercher dans les litières, dans la MOS et en fonction de la gestion des résidus que dans la biomasse, ce qui distingue le caféier des plantations forestières. Cette valeur est bien plus faible comparée au cocotier, qui a une NPP de  $12 \text{ Mg} ha^{-1} an^{-1}$ , ou l'eucalyptus du Brésil qui présente une productivité de  $25.5 \text{ Mg} ha^{-1} an^{-1}$ . Ce master a permis de mettre en place un dispositif expérimental statistique *de novo* au champ, de calibrer et de valider des modèles de relation allométrique qui vont servir de base à la suite du projet général. En effet, les variations de biomasse et la production de litière, une fois analysées sur plusieurs années (hors cadre de ce Master) permettront de calculer les variations saisonnières et inter-annuelles de NPP de la parcelle de caféiers.

## Bibliographie

- Albrecht, A., Kandji, S. T., 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 99, 15-27.
- Alpizar, L., Fassbender, H. W., Heuvelink, J., Enriquez, G., Folster, H., 1985. Agroforestry Systems of Coffee (*Coffea Arabica*) with Laurel (*Cordia Alliodora*) and Poro (*Erythrina, Poeppigiana*) in Turrialba, Costa-Rica .1. Biomass and Nutrients. *Turrialba*. 35, 233-242.
- Bradshaw, L., Rice, K. J., 1998. Competencia por agua entre el café y tres coberturas vivas (*Arachis, Desmodium* y malezas) en Nicaragua. *Agronomía Costarricense*. 21, 51-60.
- 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, M. G. R., 1975. Crop physiological aspects of coffee bean yield. *J. Coffee Res.* 5, 7-20.
- Carelli, M. L. C., Fahl, J. I., Trivelin, P. C. O., Queiroz-Voltan, R. B., 1999. Carbon isotope discrimination and gas exchange in *Coffea* species grown under different irradiance regimes. *Revista Brasileira De Fisiologia Vegetal*. 11, 63-68.
- Chapin, F. S. I., Schulze, E.-D., Mooney, H. A., 1990. The Ecology and Economics of Storage in Plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 21, 423-447.
- Clark, D. A., Brown, S., Kicklighter, D. W., Chambers, J. Q., Thomlinson, J. R., Ni, J., 2001. MEASURING NET PRIMARY PRODUCTION IN FORESTS: CONCEPTS AND FIELD METHODS. *Ecological Applications*. 11, 356-370.
- Da Matta, F., 2004. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Research*. 86, 99-114.
- DaMatta, F. M., Ronchi, C. P., Maestri, M., Barros, R. S., 2007. Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 19, 485-510.
- Dickson, R. E., Isebrands, J. G., 1993. Carbon allocation terminology: should it be more rational? *Bulletin of Ecological Society of American Journal of Botany*. 74, 175-177.
- Dupraz, C., Liagre, F., 2008. Agroforesterie : des arbres et des cultures. *France Agricole*.
- Fassbender, H. W., Alpizar, L., Heuvelink, J., Enriquez, G., Folster, H., 1985. Agroforestry systems of coffee (*Coffea arabica*) with laurel (*Cordia alliodora*) and coffee with poro (*Erythrina poeppigiana*) in Turrialba, Costa Rica. 3. Models for organic matter and nutrients. *Turrialba*. 35, 403-413.
- FLUXNET, <http://daac.ornl.gov/FLUXNET/>. 2008.
- Franck, N., Effet de la charge en fruits et de l'ombrage sur l'assimilation carbonée, la croissance et la production du caféier (*Coffea arabica* L.). *Ecophysiologie végétale - Développement et adaptation des plantes - Biologie des systèmes intégrés, Agronomie et Environnement*, PhD. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, Montpellier, 2005 pp. 165.
- Franck, N., Vaast, P., 2009. Limitation of coffee leaf photosynthesis by stomatal conductance and light availability under different shade levels. *Trees - Structure and Function*. 23, 761-769.
- Gómez-Delgado, F., Roupsard, O., le Maire, G., Taugourdeau, S., Pérez, A., van Oijen, M., Vaast, P., Rapidel, B., Harmand, J. M., Voltz, M., Bonnefond, J. M., Imbach, P., Moussa, R., 2011a. Modelling the hydrological behaviour of a coffee agroforestry basin in Costa Rica. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 369-392.

- Gómez-Delgado, F., Roupsard, O., Moussa, R., 2011b. Water and sediment yield in a coffee agroforestry system at various spatio-temporal scales: from plot to basin and from event to annual scales. *Agriculture Ecosystems & Environment*.
- Gomez Delgado, F., Hydrological, ecophysiological and sediment processes in a coffee agroforestry basin: combining experimental and modelling methods to assess hydrological environmental services. *École Doctorale Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosiences, Environnement (SIBAGHE)*, PhD. Supagro, Montpellier, 2010, pp. 311.
- Griffon, M., 2006. *Nourrir la planète*. Odile Jacob Sciences. 455 pp.
- Harmand, J. M., Avila, H., Dambrine, E., Skiba, U., de Miguel, S., Renderos, R. V., Oliver, R., Jimenez, F., Beer, J., 2007. Nitrogen dynamics and soil nitrate retention in a *Coffea arabica*-*Eucalyptus deglupta* agroforestry system in Southern Costa Rica. *Biogeochemistry*. 85, 125-139.
- Kumar, D., Tieszen, L., 1980. Photosynthesis in *Coffea arabica*. I. Effects of light and temperature. *Experimental Agriculture*. 16, 13-19.
- Litton, C. M., Raich, J. W., Ryan, M. G., 2007. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology*. 13, 2089-2109.
- Masera, O. R., Garza-Caligaris, J. F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski, J., Nabuurs, G. J., Pussinen, A., de Jong, B. H. J., Mohren, G. M. J., 2003. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling*. 164, 177-199.
- Medlyn, B. E., Pepper, D. A., O'Grady, A. P., Keith, H., 2007. Linking leaf and tree water use with an individual-tree model. *Tree Physiology*. 27, 1687-1699.
- Montagnini, F., Nair, P. K. R., 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*. 61-62, 281-295.
- Navarro, M. N. V., Jourdan, C., Sileye, T., Braconnier, S., Mialet-Serra, I., Saint-Andre, L., Dauzat, J., Nouvellon, Y., Epron, D., Bonnefond, J. M., Berbigier, P., Rouziere, A., Bouillet, J. P., Roupsard, O., 2008. Fruit development, not GPP, drives seasonal variation in NPP in a tropical palm plantation. *Tree Physiology*. 28, 1661-1674.
- ORNL-DAAC, Oak Ridge National Laboratory-Distributed Active Archive Center for biogeochemical dynamics: <http://daac.ornl.gov/>. 2009.
- Pendergrast, M., *Uncommon Grounds: The History of Coffee and How It Transformed Our World*. In: B. Books, (Ed.), *Uncommon Grounds: The History of Coffee and How It Transformed Our World*, New York, 1999.
- Roupsard, O., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Epron, D., Harmand, J.-M., Vaast, P., Hergoualc'h, K., Jourdan, C., Saint-André, L., Thaler, P., Lamade, E., Gay, F., Chantuma, A., le Maire, G., Hamel, O., Bouillet, J.-P., Partitioning NPP into growth, litter and exports: impacts on ecosystem carbon fluxes. A review for tropical perennial plantations. . IUFRO: Productivity of tropical plantations, Porto Seguro, Bahia, Brasil. 10-15 of November 2008. Oral presentation, 2008.
- Siles, P., Harmand, J. M., Vaast, P., 2010a. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforestry Systems*. 78, 269-286.
- Siles, P., Vaast, P., Dreyer, E., Harmand, J.-M., 2010b. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss in a coffee (*Coffea arabica* L.) monoculture compared to an agroforestry system with *Inga densiflora*. *Journal of Hydrology*. 395, 39-48.
- Stape, J. L., Binkley, D., Ryan, M. G., 2008. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. *Forest Ecology and Management*. 255, 920-930.

- Vaast, P., Angrand, J., Franck, N., Dauzat, J., Genard, M., 2005a. Fruit load and branch ring-barking affect carbon allocation and photosynthesis of leaf and fruit of *Coffea arabica* in the field. *Tree Physiology*. 25, 753-760.
- Vaast, P., Beer, J., Harvey, C., Harmand, J., Environmental services of coffee agroforestry systems in Central America: a promising potential to improve the livelihoods of coffee farmers' communities. In: CATIE, (Ed.), *Integrated Management of Environmental Services in Human-Dominated Tropical Landscapes*, Turrialba, Costa Rica, 2005b, pp. 35-39.
- Vaast, P., Bertrand, B., Perriot, J., Guyot, B., Génard, M., 2006. Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea Arabica* L.) under optimal conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 197-204.
- Vaast, P., Kanten, R., Siles, P., Angrand, J., Aguilar, A., Biophysical Interactions Between Timber Trees and Arabica Coffee in Suboptimal Conditions of Central America. In: S. Jose, A. M. Gordon, Eds.), *Toward Agroforestry Design*, Vol. 4. Springer Netherlands, 2008, pp. 133-146.
- Zambrano-Franco, D., Zuluaga-Vasco, J., 1993. Balance de materia en un proceso de beneficio húmedo del café. . *Cenicafé* (Colombia). 44, 45-55.



## Liste des figures et des tableaux

**Figure 1:** Localisation des bassins fluviaux du Rio Turrialba, du bassin expérimental (plate forme Coffee Flux) et des plantations de caféier (surfaces en vert). Source (Gomez Delgado 2010).

**Figure 2 :** Structure du peuplement des rejets de caféiers obtenue à partir d'un inventaire de 1000 emplacements à 2 dates (juillet 2010 et février 2011) dans la parcelle expérimentale. a : fréquence en % des hauteurs des rejets en cm, de la population de la parcelle. b : fréquence en % des différents diamètres à la base des rejets en mm, de la population de la parcelle. c : fréquence en % du nombre de rejets par emplacement, dans la parcelle. d : fréquence en % des âges des rejets en année, de la population de la parcelle.

**Figure 3 :** Relation entre le diamètre à la base et l'âge des rejets.

**Figure 4 :** Dispositif expérimental statistique au champ pour le suivi de la NPP aérienne des caféiers.

**Figure 5 :** Description morphologique du caféier. Source (Pendergrast 1999).

**Figure 6 :** Vue satellite de la zone des 3 arbres autour de la tour à flux avec indication des transects de LAI 2000 et de la position des pièges à litières.

**Figure 7 :** Evolution de la biomasse des feuilles avec leur décomposition sur 15 jours.

**Figure 8:** Relation logarithmique entre la biomasse calculée et la biomasse réelle des rameaux plagiotropes des rejets du set de calibration (N=780 plagiotropes).

**Figure 9 :** Relation entre la biomasse calculée des plagiotropes et la biomasse mesurée des plagiotropes.

**Figure 10:** Relation entre la biomasse calculée et mesurée des orthotropes.

**Figure 11:** Graphiques en barre représentant la biomasse des parties aériennes (orthotrope+plagiotrope+feuille) observée aux sessions 1 (mars 2011) et 2 (avril 2011) des 60 rejets de caféiers suivis en croissance, selon 2 facteurs (âge des rejets et effet arbre). Test statistique LSD Fisher  $\alpha=0.05$ . a : biomasse en g des parties aériennes en fonction de l'effet arbre. b : biomasse en g des parties aériennes en fonction des âges des rejets.

**Figure 12:** Graphiques en barre représentant les stocks de C et de N des parties aériennes observées aux sessions 1 et 2 (mars et avril) des 60 rejets de caféiers, selon 2 facteurs. Test statistique LSD Fisher  $\alpha=0.05$ . a : stock de C (g) de la partie aérienne en fonction de l'effet arbre. b : stock de C (g) de la partie aérienne en fonction de l'âge des rejets. c : stock de N (g) de la partie aérienne en fonction de l'effet arbre. d : stock de N (g) de la partie aérienne en fonction de l'âge des rejets.

**Figure 13:** Effets de l'âge des rejets sur la production de biomasse en  $\text{Mg. Ha}^{-1}$  entre les deux sessions de mesures. Test statistique LSD Fisher  $\alpha=0.05$ . a : effet de l'âge des rejets sur la biomasse du bois. b : effet de l'âge des rejets sur la biomasse des feuilles. c : effet de l'âge des rejets sur la biomasse totale.

**Figure 14:** Variabilité intra-annuelle des récoltes de litière pour les différents compartiments (feuilles, branches, fruits et fleurs) du caféier. La flèche rouge verticale indique la période de la taille annuelle des rejets âgés (entre 28 mars et 8 avril 2011). NB : les litières de feuilles mesurées ont été corrigées pour un facteur de 1,95% de perte en masse dans le filet, entre chute et récolte.

**Figure 15:** Masse de litière de café par compartiment (feuilles, rameaux fruits, fleurs) en fonction de l'effet arbre. Test statistique LSD Fisher  $\alpha=0.05$ . a: masse de litière de feuilles de café en fonction de l'effet arbre. b: masse de litière de rameaux de café en fonction de l'effet arbre. c: masse de litière de fruits de café en fonction de l'effet arbre. d: masse de litière de fleurs de café en fonction de l'effet arbre.

**Tableau 1 :** Méthodes de calculs ou d'estimation de NPP à l'échelle annuelle par compartiment aérien des caféiers.

**Tableau 2 :** Valeurs de SLA et LMA en fonction de l'effet arbre (sous arbre, hors arbre), la position (haut, moyen, bas) et l'âge (3 et 6 ans) du rejet. Test statistique LSD Fisher  $\alpha=0.05$ .

**Tableau 3 :** Moyenne des teneurs en C des différents organes (rameaux orthotropes, plagiotropes et feuilles) selon l'effet arbre (sous arbre, hors arbre), la position (haut, moyen, bas) et l'âge (3 et 6 ans) sur le rejet. Test statistique LSD Fisher  $\alpha=0.05$ .

**Tableau 4 :** Moyenne des teneurs en N des différents organes (rameaux orthotropes, plagiotropes et feuilles) selon l'effet arbre (sous arbre, hors arbre), la position (haut, moyen, bas) et l'âge (3 et 6 ans) sur le rejet. Test statistique LSD Fisher  $\alpha=0.05$ .

**Tableau 5 :** Biomasses observées durant les deux sessions de mesure (60 rejets de caféiers, mars et avril 2011) et calcul du delta instantané de biomasse.

**Tableau 6 :** Mortalité annuelle (L) par compartiments aériens de caféier. NB. Cette mortalité n'inclut pas les pertes liées à la taille annuelle ni aux exportations de fruits de café qui seront comptabilisés plus bas (partie NPP).

**Tableau 7 :** Croissance, mortalité, exportations et NPP à l'échelle annuelle par compartiment aérien des caféiers. Les valeurs en italiques ont été estimées par extrapolation de deux sessions de mesure à l'année entière. Les autres valeurs ont été mesurées.

## Annexe 1 : Le café, botanique et phénologie

Le caféier Arabica, *Coffea arabica* L., fait partie de la famille des Rubiaceae (Coste 1989). C'est un petit arbre de moins de 9m de haut originaire des sous bois des forêts tropicales d'altitude éthiopiennes (Kumar 1979). Son habitat naturel se trouve en situation ombragée ou semi ombragée. C'est donc une plante adaptée à l'ombre qui pousse sous de grands arbres. Néanmoins, elle se développe très bien sans ombrage (Fournier 1988). Son aire de culture s'étend de part et d'autre de l'équateur du 28° degré de latitude nord au 28° degré de latitude sud, mais il donne les meilleurs résultats dans les zones intertropicales les moins chaudes. Les conditions optimales de croissance du caféier: tropicales en moyenne altitude (700 à 2 000m d'altitude), une température (18 à 21°C) pas trop élevée et l'eau (1200-1800mm par an) (Alègre 1959).

Il a des feuilles persistantes, d'un vert brillant, de formes elliptiques avec un pétiole court. Ses fleurs sont blanches, suaves, et groupées en glomérules de 3 à 7 à l'aisselle des feuilles. Ses fruits sont des drupes, appelées « cerise », de couleur rouge vif ou violette à maturité, dont la pulpe est sucrée. Elles contiennent deux graines, placées face à face, à la forme caractéristique des grains de café (Coste 1989; DaMatta, Ronchi et al. 2007) (Fig. 1).



Figure 1 : Schéma d'un rameau de caféier, présentant les feuilles, les fleurs et les fruits.

## Annexe 2 : Le site expérimental Coffee-Flux

L'hacienda d'Aquiara accueille le site expérimental « Coffee-flux » (Gómez-Delgado, Roupsard et al. 2011), labellisé SOERE/F-ORE-T en 2011, situé entre les coordonnées 83°44'39'' et 83°43'35'' (longitude ouest) et 9°56'8'' et 9°56'35'' (latitude nord). Le site est un bassin versant d'une superficie de 1 km<sup>2</sup> environ, aux altitudes comprises entre 1020m et 1280m dans une zone sub-optimale pour le caféier. Le climat est défini, selon la classification de Köppen-Geiger, comme tropical humide sans saison sèche (Peel, Finlayson et al. 2007), la température moyenne oscille entre 17 et 20.8°C, la pluviométrie moyenne est de 3014mm (moyenne de 1973-2009) (Gómez-Delgado, Roupsard et al. 2011).

La canopée des caféiers atteint environ 2,5m de haut (Gómez-Delgado, Roupsard et al. 2011). L'ombrage est produit de manière aléatoire par l'érythrine (*Erythrina poeppigiana*, Fabaceae) (Fig. 2), un arbre fixateur d'azote planté à faible densité (12.8 arbres ha<sup>-1</sup>) et conduit en croissance libre (Taugourdeau 2010). La hauteur moyenne des arbres est de 20m et la surface couverte par la projection au sol de leur canopée représente 12.3% du bassin versant (Gomez Delgado 2010).



Figure 2 : Vue satellite de la parcelle expérimentale (cadre noir) et d'une portion du bassin versant. Les couronnes des érythrines apparaissent en boules. Chemins d'accès en blanc. Source Google Earth.

Ce site est l'un des premiers dispositifs expérimentaux en agroforesterie de caféier combinant une tour à flux, un équipement hydrologique complet et des mesures de terrains intensives (Fig. 3), permettant d'appréhender les flux de carbone d'eau et de sédiments à l'échelle de l'écosystème entier.

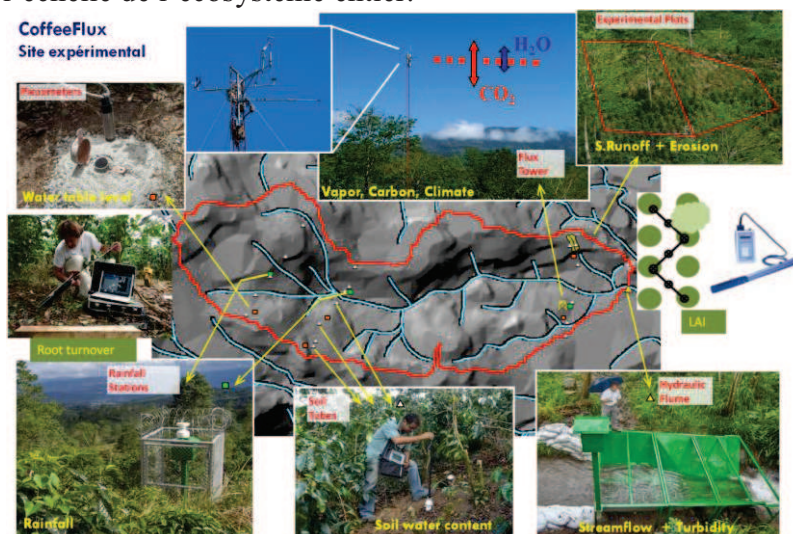


Figure 3 : Dispositif expérimental dans le bassin versant Coffee Flux de la Finca Aquiara. Source (Gomez Delgado 2010).

## **Annexe 3 : Méthodologie pour l'analyse du Carbone et de l'Azote sur des échantillons de végétaux et de sol.**

L'échantillon est séché dans un four à 65 °C. Il est moulu et mélangé afin d'obtenir une poudre de granulométrie de 1 mm. Il est stocké dans le conteneur.

Pour l'analyse, 20 mg de l'échantillon sont pesés et mis dans une capsule d'étain pour la combustion dans l'auto-analyseur ThermoFinnigan FlashEA 1112. Celui-ci permet de déterminer simultanément le carbone et l'azote dans les échantillons de sol, des sédiments et de la matière végétale. Il permet une analyse rapide et précise, éliminant la contamination ambiante que nous avons avec les méthodes chimiques traditionnelles.

Son fonctionnement est basé sur une oxydation complète de l'échantillon dans un réacteur à haute température (environ 1800 °C), transformant l'échantillon en un mélange de gaz. Les gaz sont séparés par une colonne chromatographique qui est reliée à un détecteur de conductivité thermique.

La plage de sensibilité est de 100 ppm à 100% pour les deux déterminations (Carbone et Azote). Le temps d'analyse d'un échantillon est de 465 secondes. Les échantillons ont été chargés sur un système d'auto-échantillonnage modulaire qui a une capacité de 32 échantillons. L'analyse est effectuée automatiquement par le logiciel Eager 300.

Les combustibles que le laboratoire utilise sont: l'oxygène gazeux à haute pureté, et le gaz d'hélium à haute pureté.

**Résumé :** La productivité primaire nette (NPP) des plantations pérennes peut être répartie entre croissance (G), mortalité (L) et exportations (Ex), suivant une allocation très variable entre écosystèmes, en particulier s'il s'agit de comparer des plantations forestières ou fruitières. L'objectif de notre travail était d'évaluer NPP et sa partition dans une plantation agroforestière de café du Costa Rica, en tenant compte de la forte hétérogénéité intra-parcelle des rejets de souche des caféiers, qui découle de leur recépage annuel (1/5 des rejets éliminé par taille sélective de rejuvenilisation, selon « taillis fureté ») et de la présence éparse d'arbres d'ombrage. Ces deux effets ont été testés dans nos conditions avec un dispositif expérimental adapté, en choisissant le rejet de souche comme individu. La biomasse des rejets, leur croissance et teneur en C et N ont été obtenues par des mesures destructives avant élaboration, calibration et validation des relations allométriques spécifiques. La mortalité a été mesurée durant un an à l'aide de pièges à litière, en séparant tous les compartiments. Nous avons observé un épuisement des parties aériennes et reproductives entre les jeunes rejets et les vieux (âgés de 6 ans), ce qui confirme l'intérêt de la taille de recépage annuelle. Les arbres d'ombrage, présents à faible densité (15 arbres ha<sup>-1</sup>) ont montré peu ou pas d'effet sur nos variables d'intérêt. NPP des rejets de caféier a été mesurée à 7.6 Mg ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>, ce qui est relativement faible en regard d'autres plantations pérennes tropicales (cocotier, eucalyptus etc.), mais le caféier est une plante d'ombre (faibles performances photosynthétiques) cultivé en altitude à des températures moyennes assez fraîches. L'exportation des fruits représentait 52% de NPP, la croissance visible (parties ligneuses) 26% et enfin, la mortalité naturelle 23%. Les caféiers investissaient donc 75% de leur C vers des compartiments labiles (fruits, feuilles, fleurs) à turnover rapide, indiquant que le stockage final du C est à rechercher davantage dans la nécromasse et dans la matière organique du sol que dans la biomasse.

Mots clé : biomasse, caféier, Costa Rica, partition du carbone, relation allométrique

**Abstract:** Net primary productivity (NPP) of perennial plantations can be split between growth (G), mortality (L) and exports (Ex), with varying allocations in different ecosystems, particularly if we compare forest or fruit tree plantations. The objective of our study was to evaluate NPP and its partition in a coffee agroforestry plantation in Costa Rica, taking into account the strong intra-plot heterogeneity of stump shoots, resulting from their annual coppicing (1/5 shoots eliminated by selective pruning for rejuvenilisation, according to "selected coppice") and the presence of sparse shade trees. An experimental design was set up to test these two effects, choosing the stump shoot as experimental unit. Shoot biomass, growth, C and N content were obtained by destructive measures and before development, calibration and validation of specific allometric relationships. Mortality was measured over a year with litter traps, all compartments separated. We observed a depletion of aerial and reproductive compartments between young and old shoots (aged 6), confirming the interest of annual coppicing pruning. Shade trees, present at low density (15 trees ha<sup>-1</sup>) showed little or no effect on our variables of interest. Coffee tree shoot NPP was measured at a relatively low 7.6 Mg ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>, compared with other tropical tree plantations (coconut, eucalyptus, etc...), But coffee tree is a shade plant (low photosynthetic output) grown in altitude with cool mean temperatures. Fruit export accounted for 52% of NPP, visible growth (woody parts) for 26% and finally natural mortality for 23%. The coffee tree invests 75% of C in labile compartments (fruits, leaves, flowers) with rapid turnover, indicating that final storage of C is to be found more in dead mass and soil organic matter than in biomass.

Keywords: biomass, coffee, Costa Rica, partition of carbon, allometric relationship