



HAL
open science

Évaluation de la biomasse et de la productivité souterraines du caféier dans un système agroforestier au Costa Rica

Elsa Defrenet

► **To cite this version:**

Elsa Defrenet. Évaluation de la biomasse et de la productivité souterraines du caféier dans un système agroforestier au Costa Rica. Sciences agricoles. 2012. dumas-00782273

HAL Id: dumas-00782273

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00782273>

Submitted on 30 Jan 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AGROCAMPUS OUEST
65 rue de St Briec
35042 Rennes



Éco&Sols - UMR Écologie fonctionnelle et
biogéochimie des sols et agrosystèmes
Inra - Campus de la Gaillarde - Bât. 12 - 2,
place Viala - 34060 Montpellier cedex 2



CATIE – Centro Agronomica Tropical
de Investigacion y Ensenanza
Cartago, Turrialba 30501, Costa Rica

Mémoire de fin d'études

EVALUATION DE LA BIOMASSE ET DE LA PRODUCTIVITE SOUTERRAINES DU CAFEIER DANS UN SYSTEME AGROFORESTIER AU COSTA RICA

Année universitaire : 2011-2012

Spécialisation/option : Productions végétales option Ingénierie des Agrosystèmes



Par **Elsa DEFRENET**

Volet à renseigner par l'enseignant responsable de l'option/spécialisation

Bon pour dépôt (version définitive)

Date : ____/____/____ Signature

Soutenu le 13 Septembre 2012, à Rennes

Sous la présidence de : **Mr Philippe Leterme**, enseignant chercheur en agronomie et système de cultures, Agrocampus Ouest, Rennes;

Enseignant référent : **Mme Safya Menasseri**, enseignante-chercheuse, sciences du sol et agronomie, Agrocampus Ouest ;

Autres membres du jury : **Mr Olivier Roupsard**, écophysiologiste tropical, CIRAD-Persyst, UMR Ecologie Fonctionnelle et Biogéochimie des sols, Supagro Montpellier, maître de stage ; **Mr Christophe Jourdan**, écophysiologiste, spécialisé dans les systèmes racinaires tropicaux, CIRAD-Persyst, UMR Ecologie Fonctionnelle et Biogéochimie des sols, Supagro Montpellier, maître de stage ; **Mme Christine Bissuel**, enseignante chercheuse en physiologie et production végétale à Agrocampus Ouest.

« Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST »

Remerciements

Ce stage clôt mon cursus à Agrocampus Ouest et complète ma formation bien au-delà de mes attentes. Il a été financé grâce au projet ANR Ecosfix¹. Pendant ce stage, j'ai été entourée et accompagnée de personnes qui m'ont beaucoup apporté, aussi bien sur le plan professionnel que personnel.

Je remercie donc, avec la plus grande gratitude, Olivier Rounsard et Fabien Charbonnier présents à mes côtés lors de ces six mois, ainsi que Christophe Jourdan qui était en France pendant mon séjour, pour m'avoir accordé toute leur confiance et transmis leurs connaissances. Passionnés et passionnants, leurs précieux conseils, leur dynamisme, leur bonne humeur quotidienne et leurs encouragements inlassables m'ont permis de m'intégrer rapidement au sein de l'équipe, de m'y sentir à l'aise et de travailler dans les meilleures conditions qu'il soit.

Je remercie également avec beaucoup de reconnaissance la famille Barquero : Alejandra, Alvarro, Jenny, Carlos, Wilson, ainsi que Maria et Doris pour leur efficacité sur le terrain et leur dévotion.

Je tiens aussi à remercier toute l'équipe du CATIE pour sa gentillesse et son aide, particulièrement Patricia Leandro et son assistant Douglas pour toutes les pesées que j'ai effectuées dans leur laboratoire de sciences du sol, sans aucun doute le plus propre qui ait jamais existé.

Enfin, un grand merci à tout ceux qui m'ont accordés quelques heures de leur temps :

à Emmanuelle Khac, pour m'avoir prêté deux mains quand il ne m'en restait plus qu'une,

à Péroline Falcon et Inès Taurou qui ont mesuré des volumes de cailloux en un temps record,

à Laura Jarri qui s'est dévouée pour m'aider à descendre dans les fosses et mesurer les dimensions,

à Karel van den Meersche pour son aide en statistiques,

à Louise Meylan pour sa joie de vivre perpétuelle et contagieuse,

à Carlos Cerdan pour avoir assuré l'alimentation de toute l'équipe de stagiaires en café.

¹ ANR-Ecosfix : Ecosystem Services of Roots – Hydraulic Redistribution, Carbon Sequestration and Soil Fixation <https://sites.google.com/site/ecosfix/>

I.	INTRODUCTION	1
II.	MATERIELS ET METHODES	4
1.	LIEU, CLIMAT ET SOL	4
2.	EXPERIMENTATION « ALLOMETRIE »	5
a.	<i>Excavations sur 0-150 cm, expérimentation allométrie</i>	<i>6</i>
b.	<i>Réalisation de cartes d'impacts</i>	<i>7</i>
c.	<i>Extrapolation au profil 0-450 cm à partir de données pré-existantes sur des (tranchées creusées précédemment)</i>	<i>8</i>
d.	<i>Accroissements des diamètres au collet</i>	<i>9</i>
3.	EXPERIMENTATION SEQUENTIAL CORING : PRODUCTIVITE DES RACINES FINES A L'HA	10
a.	<i>Théorie</i>	<i>10</i>
b.	<i>Dispositif expérimental</i>	<i>10</i>
c.	<i>Tri, séchage, pesée</i>	<i>11</i>
4.	CALCULS	11
a.	<i>Expérimentation allométrie</i>	<i>11</i>
b.	<i>Expérimentation sequential coring</i>	<i>12</i>
5.	STATISTIQUES	13
a.	<i>Expérimentation allométrie</i>	<i>13</i>
b.	<i>Expérimentation sequential coring</i>	<i>13</i>
III.	RESULTATS	14
1.	EXPERIMENTATION « ALLOMETRIE »	14
a.	<i>Construction des relations allométriques avec l'aire au collet</i>	<i>14</i>
b.	<i>Comparaison entre la biomasse souterraine obtenue par Voronoï ou par extraction au treuil</i>	<i>15</i>
c.	<i>Distribution de la biomasse souterraine sur le profil, comparaison de trois types de fosses</i>	<i>16</i>
d.	<i>Extrapolation des biomasses totales racinaires au profil 0-450cm</i>	<i>17</i>
e.	<i>Relations entre biomasse racinaire dans les fosses et surfaces cumulées d'impacts sur les parois</i>	<i>18</i>
f.	<i>Partition de la biomasse entre parties souterraines et partie aériennes</i>	<i>19</i>
g.	<i>Estimation de la NPP des racines pérennes et des ceps</i>	<i>19</i>
2.	PRODUCTIVITE ET MORTALITE DES RACINES FINES A L'HA, EVALUEE PAR « SEQUENTIAL CORING » (CALCUL SUR 5 MOIS) ...	20
a.	<i>Variabilité spatiale et temporelle des biomasse et nécromasse des racines fines</i>	<i>20</i>
b.	<i>Calcul de la NPP de racines fines</i>	<i>20</i>
c.	<i>Estimation de la NPP des racines fines</i>	<i>21</i>
3.	ESTIMATION DE LA NPP RACINAIRE ET DE LA NPP TOTALE DE LA PLANTATION DE CAFEIER	22
IV.	DISCUSSION	24
a.	<i>Comparaisons méthodologiques des méthodes utilisées, efficacité, précision</i>	<i>24</i>
b.	<i>Comparaison de la biomasse et de la productivité du caféier avec d'autres études menées sur le caféier</i>	<i>26</i>
c.	<i>Comparaison de la biomasse et de la productivité du caféier avec d'autres plantes pérennes tropicales</i>	<i>26</i>
V.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	27
VI.	BIBLIOGRAPHIE	28
VII.	ANNEXES	30

Acronymes

BM = Biomasse

CATIE : Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

C : Carbone

DM : méthode « Decision Matrix »

CIRAD : Centre International pour la Recherche Agronomique et le Développement

GPP : Productivité Primaire Brute

LAI : Leaf Area Index

MM : méthode « max-min »

MS : Matière sèche

NPP : Productivité Primaire Nette

Ra : Respiration de l'écosystème

SLA : Specific Leaf Area

I. Introduction

Le café est l'une des principales valeurs marchandes échangées dans le monde, après le pétrole. En Amérique Centrale, le café est le premier produit d'exportation de ces 100 dernières années. Suite à la crise de surproduction des années 90, la diversification des revenus est devenue un enjeu majeur pour les producteurs. Depuis la même époque, les changements globaux sont au cœur des débats, une des préoccupations centrales étant les flux de gaz à effet de serre (GES). Des programmes de recherche visent à mesurer les flux globaux, identifier et quantifier les sources et les puits dans le but de réduire les sources et d'augmenter les puits de GES (mitigation). Cette période coïncide également avec le développement des mécanismes de Paiement pour Services Ecosystémiques (eau, carbone, biodiversité, lutte contre l'érosion etc.) ou de certifications (biologique, Rainforest Alliance, Birdfriendly...), répondant à une demande des sociétés civiles du Nord pour favoriser des systèmes de production plus durables et normaliser les systèmes de production.

L'agroforesterie semble réunir plusieurs atouts pour parvenir à pallier à ces problèmes. Elle permet de parvenir à une diversification de revenus pour les producteurs de café ((Vaast et al., 2005). Associée à des cultures pérennes, elle pourrait être un puits important de C (Albrecht and Kandji, 2003; Montagnini and Nair, 2004) ou améliorer l'infiltration (Gómez-Delgado et al., 2011). Elle favoriserait la biodiversité et des systèmes aux pratiques moins dépendantes des engrais et autres produits pétrochimiques et contribuerait donc à une production plus durable.

Le projet « CoffeeFlux² » a été mis en place en Décembre 2009 au Costa Rica par le CIRAD, le CATIE et la ferme agroforestière Aquiarès³. Il est un sous projet du projet européen CAFNET « Connecter, améliorer et maintenir les services environnementaux et les valeurs marchandes du café agroforestier en Amérique centrale, Afrique de l'Est et en Inde » et contribue au réseau mondial d'études des bilans de C, H₂O et énergie du réseau FLUXNET⁴. Il s'inscrit également dans le programme de recherche ECOSFIX⁵ dont l'objectif est d'évaluer les services éco-systémiques liés au fonctionnement racinaire sur des problématiques d'érosion, de séquestration du carbone et de redistribution hydrique. Il est le premier dispositif expérimental sur café combinant une tour-à-flux (Eddy-corrélation, photo 1) et des mesures de terrains intensives, permettant d'appréhender les flux de carbone à l'échelle de l'écosystème entier et de comprendre l'allocation du carbone dans les plantes.

Les flux d'intérêts ici sont la Productivité Primaire Nette, (NPP), la Productivité Primaire Brute (GPP) et la respiration de l'écosystème (R_a), généralement exprimés en flux de carbone $t_c \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) (Eq.1) :

$$GPP = NPP + R_a \cong 2 \times NPP \quad (\text{Eq.1})$$

Nous nous intéressons particulièrement ici à NPP qui occupe une place centrale dans la compréhension du fonctionnement, de la productivité et de la séquestration de carbone (C) des écosystèmes. Elle se définit comme la somme de la croissance (G), de la mortalité des organes aériens et souterrains (L) et des exportations de matière ou élagages (Ex) sur une période donnée, généralement annuelle (Eq. 2), pour laquelle on négligera les variations de stocks de réserves. L'herbivorie sera également négligée :

$$NPP = G + L + Ex \quad (\text{Eq. 2})$$

² <http://www5.montpellier.inra.fr/ecosols/Recherche/Les-projets/CoffeeFlux>

³ <http://www.cafeaquiares.com/farm-span.htm>

⁴ <http://fluxnet.ornl.gov/>

⁵ [http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx_lwmsuivibilan_pi2\[CODE\]=ANR-10-STRA-0003](http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-funded-project/?tx_lwmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-10-STRA-0003)

Au Costa Rica, le café arabica est souvent cultivé en systèmes agroforestiers à l'ombre d'arbres comme l'érythrine (Photo 1) et il est conduit en taillis avec plusieurs (1-3) souches par emplacement et plusieurs (1-3) rejets par souche. Cette pratique de régénération, l'élagage des vieux rejets devenus improductifs, se planifie selon les conditions une fois tous les 3 à 6 ans et est un événement majeur dans la pratique culturale du caféier; elle affecte sans aucun doute l'équilibre nutritionnel et carboné du caféier. Une étude en cours sur la NPP du caféier (Audebert, 2011; Charbonnier, 2010-2013) a permis de développer des relations allométriques spécifiques reliant les dimensions des rejets de souche avec leur biomasse (feuilles, fruits, branches, tronc). Grâce à des suivis biométriques depuis février 2011, l'allocation de NPP vers les différents compartiments des rejets de souche du caféier est enregistrée : elle dépend peu de la distance aux arbres d'ombrage et beaucoup de l'âge des rejets après la taille. En revanche, rien n'était connu sur la biomasse et la productivité des ceps ni celles des parties souterraines.



Photo 1: Caféiers à Aquiares avec arbres d'ombrage (Erythrina), disposés autour de la tour à flux de la parcelle d'étude.

La productivité du cep peut être approchée comme celle du tronc des arbres en futaie, soit une fonction de la croissance radiale et/ou de la croissance en hauteur. Pour le calcul de NPP racinaire nous proposons l'approche suivante (3), exprimée en unités de flux de biomasse sèche ($t_{BM} \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) :

$$NPP_{\text{racines}} = \Delta BM_{rp} + (BM_{rf} \times \tau_{rf}) \quad (\text{Eq.3})$$

Avec :

NPP_{racines} : Productivité primaire nette racinaire.

ΔBM_{rp} : Accroissement annuel des racines considérées comme pérennes (racine pivot+ racines grosses et moyennes dont le diamètre est supérieur à 2 mm). On fera l'hypothèse que la durée de vie des racines >2 mm est plus grande que l'âge des souches (Gill and Jackson, 2000), leur mortalité sera donc supposée nulle.

BM_{rf} : Biomasse des racines fines ($\Phi < 2 \text{ mm}$). Elle se définit comme la quantité de racines fines présente dans le sol à un instant donné.

τ_{rf} : taux de renouvellement des racines fines (an^{-1}).

La composante **ΔBM_{rp}** peut être mesurée à partir de différents types d'excavations (tranchées, carottage), ou bien estimée par des relations allométriques (sur le diamètre des axes notamment) ou des cartes d'impacts, comme cela a été pratiqué chez les arbres en futaie (Clark et al., 2001; Levillain, 2011). Néanmoins, le cas des taillis avec double ou triple

semis par emplacement et fusion des racines apparaît plus complexe a priori. Notre travail se base sur une hypothèse forte qui reste à démontrer : dans le cas d'un taillis recépi régulièrement, même dans le cas de semis multiples sur le même emplacement, il serait possible de prédire de manière fidèle la biomasse et la croissance des racines pérennes à partir de données biométriques de la souche ou de cartes d'impacts profondes et de la biomasse racinaire sur la hauteur de profil étudié, 0-150 cm dans la présente étude. La composante ΔBM_{rp} de l'équation sera étudiée et désigné par la suite à l'aide d'une expérimentation appelée « Allométrie ». Chaque méthode a ses propres biais et incertitudes. Parfois les techniques peuvent donner des résultats contradictoires ou au contraire ne pas être significativement différentes (Levillain et al. 2011). Il est important de connaître ces limites pour pouvoir analyser les incertitudes liées. De même, un autre enjeu de taille est la relation coût/bénéfice de chacune des méthodes : une grande précision nécessite des coûts très importants en main d'œuvre. Levillain et al, 2011 ont récemment comparé différentes méthodes d'estimation de la biomasse des racines sur des forêts d'Eucalyptus (échantillonnage à la tarière ou au monolithe ; plusieurs types de tranchées réalisées) la tranchée était la mieux adaptée pour estimer la biomasse des racines >2mm de diamètre. Cette technique étant très lourde, elle ne peut être mise en place qu'à des intervalles de temps long. Pour mesurer la biomasse et la croissance des racines pérennes, nous chercherons dans un premier temps à établir des relations allométriques entre la biomasse racinaire et l'aire au collet du cep, afin d'estimer par la suite la biomasse racinaire à l'hectare sur la base d'un inventaire. Cette approche n'a à notre connaissance pas été développée sur caféier. Ces relations seront établies à partir d'excavations et le prélèvement du système racinaire d'arbres individuels (Clark et al., 2001), et ceci dans une large gamme de diamètres. Cette méthode a bien fonctionné dans plusieurs études (Clark et al., 2001; Kenzo, 2009; Saint André et al., 2005). Nous étudierons également la relation entre cette biomasse excavée et les impacts racinaires sur les parois des fosses creusées, afin de voir si la réalisation d'une carte d'impacts permettrait de prédire précisément la biomasse souterraine à moindre effort.

L'estimation de NPP des racines fines (diamètre < 2 mm) est d'autant plus importante qu'elles se recyclent très rapidement et jouent donc un rôle de premier plan dans la productivité souterraine à cause de leur recyclage rapide. Navarro et al. (2008) ont montré que chez le cocotier, elles représentent près de 90% de la productivité racinaire, ceci est expliqué par leur faible durée de vie (0.3 an en moyenne). Pour estimer la NPP des racines fines, nous avons besoin d'évaluer ΔBM_{fr} et τ_{fr} . La méthode de « carottages séquentiels », ou « Sequential coring » (Persson, 1978) est très communément utilisée pour estimer la biomasse de racines fines (Fairley et Alexander, 1985) dans les horizons superficiels (<30cm), souvent combinée à l'étude de minirhizotrons et rhizotrons (Vogt et al., 1998). L'utilisation de carottes de recolonisation est aussi utilisée mais leur installation semble affecter grandement la dynamique racinaire (Vogt, 1998; Vogt and al., 1998). Nous utiliserons la méthode du prélèvement séquentiel à la tarière, elle permet de prendre en compte le taux de décomposition des racines mortes (Clark et al., 2001; Jourdan et al., 2008). Plusieurs effets seront étudiés : i) l'effet « distance à l'arbre » sur la NPP, qui correspond à la position à l'ombre ou en plein soleil d'un caféier, ii) l'effet « position », correspondant à la position des échantillons sur la ligne de semis des caféiers ou dans l'interligne, iii) l'effet date.

Les objectifs du de notre travail sont : (i) décrire la partition de la biomasse entre cep, racines pérennes et racines fines du caféier; (ii) tester l'approche par relations allométriques sur ce taillis à semis multiples par emplacement pour prédire la biomasse et la productivité des parties pérennes (cep, pivot, racines grosses et moyennes) et à partir du diamètre/surface au collet ; (iii) évaluer la biomasse et la productivité des racines fines au moyen de sequential coring ; (iv) extrapoler la biomasse et la productivité des parties pérennes à l'échelle de la parcelle entière.

II. Matériels et Méthodes

1. Lieu, Climat et Sol

Le site d'étude est localisé dans le bassin versant du Rio Reventazón, dans la Vallée Centrale au Costa Rica, sur les pentes du Volcan Turrialba. Il se trouve au cœur d'une des plus grandes fermes caféières du pays (660 Ha), la *Finca Aquiares* certifiée *Rainforest Alliance*, à 15 km du CATIE. Le micro-bassin de la Mejias Creek a été sélectionné pour l'ensemble des expérimentations du projet Coffee-Flux. Il est situé entre 1020 m et 1280 m d'altitude et s'étend sur 0,9 km², avec une pente moyenne de 20 %. Notre site expérimental se situe précisément dans la zone de mesure de la tour à Eddy-correlation installée en 2009 dans une parcelle dans le bas-fond du bassin-versant (cf. *Annexe 1*). La pente moyenne de cette parcelle y est comprise entre 0 et 5%.

La densité initiale de plantation était de 6300 emplacements de caféiers (*Coffea arabica* L., variété Caturra) à l'hectare (1-3 caféiers par emplacement), avec un âge moyen de vingt ans et une canopée de 2,5 m de hauteur en moyenne. La conduite de culture est intensive avec un élagage de 20 % des rejets (vieux rejets devenus improductifs) chaque année, durant le mois de Mars. Le caféier dans notre zone d'étude est donc élagué tous les 5-6 ans, selon une méthode dite « sélective », qui repose sur une inspection visuelle du degré d'épuisement du rejet avant le choix de l'élagage ou non. La plantation caféière s'apparente donc à un taillis fureté⁶ : les souches de caféier peuvent porter plusieurs (1-3) rejets de caféiers d'âges différents. Les caféiers poussent sous l'ombrage d'*Erythrina poeppigiana*, légumineuse plantée à faible densité (12.8 arbres ha⁻¹) et en croissance libre (Taugourdeau, 2010), atteignant 20 m de hauteur. La surface couverte par la projection au sol de leur canopée représente 12.3% du bassin versant (Gomez Delgado, 2010).

Le climat est défini, selon la classification de Köppen-Geiger, comme tropical humide sans saison sèche (Peel et al 2007), la température mensuelle moyenne oscille entre 17 et 20.8°C, la pluviométrie annuelle moyenne est de 3014 mm (1973-2009).

Selon la classification établie par Mora-Chinchilla (2000), le bassin expérimental est situé le long d'une large bande (1,3 km) de dépôts d'avalanches volcaniques, caractérisée par des dépôts chaotiques de blocs immergés dans une matrice de sable grossier, issue de l'effondrement de la pente sud-est de l'ancien cratère du volcan Turrialba. La classification générale donnée par la carte géologique du Costa Rica (MINAE-RECOPE, 1991) caractérise la stratigraphie par la présence de roches intrusives volcaniques peu profondes, avec la présence de coulées de lave, d'agglomérats, de lahars et de cendres. Les sols appartiennent à l'ordre des andosols, d'après la taxonomie des sols USDA (USDA, 1999). Ce sont des sols formés à partir des éjectas volcaniques, sous l'action des intempéries et des processus de transformation des minéraux, très stables, avec une teneur élevée en matière organique et une activité biologique et des capacités d'infiltration importantes (Gomez-Delgado, 2011).

Cette caractéristique est une contrainte importante pour les travaux de terrain, les roches engendrant une gêne pour le prélèvement à la tarière et le creusage des fosses. Les éjectas de taille très variables sont répartis de manière hétérogène à la surface du sol mais aussi en profondeur, ce qui peut affecter la croissance des racines et l'architecture racinaire. Nous prendrons donc en compte la fraction volumique des roches dans le sol lors des excavations.

⁶ Type de taillis dans lequel les brins d'une cépée donnée n'ont pas tous le même âge : à chaque coupe on n'en prélève qu'un ou deux (les plus âgés) sur chaque souche. Pratique ancienne et raréfiée, le furetage exige un dosage assez délicat de l'éclaircissement (les rejets sont moins vigoureux quand on laisse des brins non exploités). Il préserve le sol et perturbe moins brutalement le couvert à chaque récolte, ce qui favorise les essences d'ombre ainsi que la flore et la faune sylvaquiques. Source : educagri.fr

2. Expérimentation « Allométrie »

L'expérimentation « Allométrie » a pour objectif d'évaluer le potentiel de prédiction des relations allométriques entre l'aire au collet et les biomasses de cinq compartiments du caféier : la racine pivot, les racines grossières latérales, les racines moyennes, les racines fines et le cep (Photo 2).

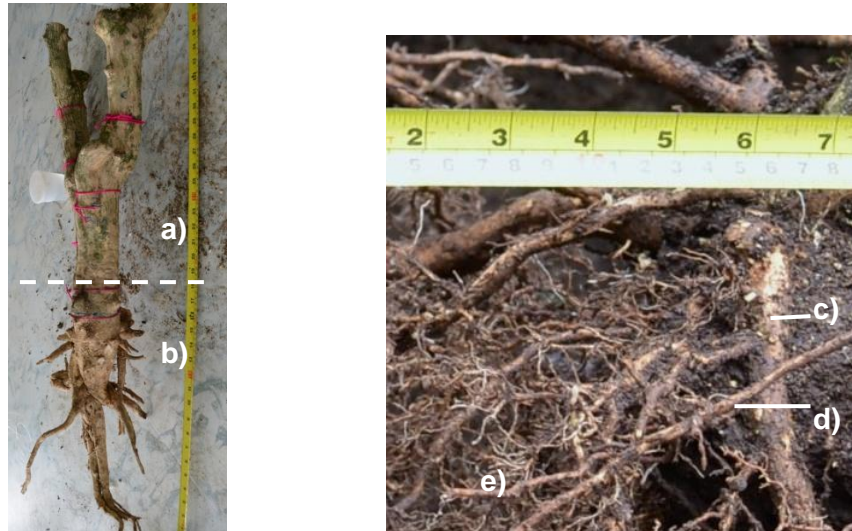


Photo 2: Compartiments aériens étudiés a) cep ; b) racine pivot ; c) racines grosses ; d) racines moyenne ; e) racines fines.

Les caféiers expérimentaux ont été sélectionnés à partir d'un inventaire préalable lors duquel nous avons mesuré la circonférence au collet pour la construction d'une gamme étalon (Fig. 1). Afin de ne pas enlever des caféiers directement sous la tour-à-flux, nous avons sélectionné les caféiers « allométrie » dans des parcelles voisines.

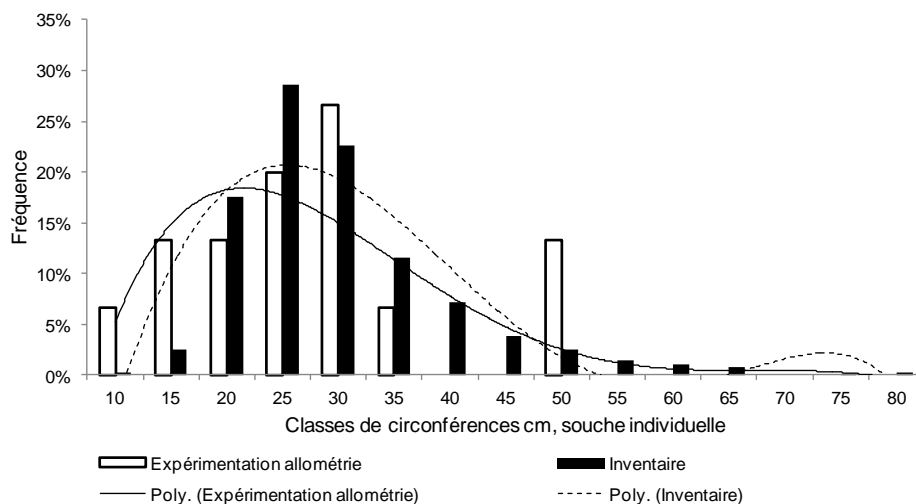


Figure 1: Histogramme de fréquences des circonférences au collet de l'inventaire (parcelle de la tour-à-flux) et des cafés choisis pour l'expérimentation allométrique (parcelles voisines). L'échantillonnage couvre 100% de l'inventaire selon la courbe d'ajustement polynomial (pointillés), mais il manque des extrêmes dans les niveaux les plus hauts de circonférences, car certaines classes de circonférences étaient absentes des parcelles voisines de celle de la tour-à-flux. Les classes non représentées seront complétées ultérieurement. Coffee-flux, Aquiares, Costa Rica.

Nous avons fait l'hypothèse a priori qu'il n'y aurait pas d'effet « distance à l'arbre » sur la relation entre l'aire au collet et la biomasse souterraine et celle du cep, car les expérimentations menées sur les parties aériennes (Audebert, 2011; Charbonnier, 2010-2013) montraient que NPP des parties aériennes en dépendait peu. Cette hypothèse sera vérifiée plus loin. La plupart des caféiers ont été sélectionnés en plein soleil (Carte en *Annexe 2*) ; parmi les 10 emplacements choisis, 5 d'entre eux comprenait deux souches (exemple d'emplacement à deux caféiers en annexe 3) de caféiers (ce qui fait au total 15 caféiers).

a. Excavations sur 0-150 cm, expérimentation allométrie

Nous avons utilisé deux méthodes directes pour évaluer la biomasse souterraine dans le but de pouvoir les comparer (précision, efficacité, etc.).

- **Méthode d'excavation de référence : le « polygone de Voronoï »**

Autour de chaque caféier, nous avons délimité un « polygone de Voronoï ». Il s'agit de l'espace élémentaire défini par les mi-distances entre l'individu étudié et ses voisins (Snowdon et al., 2002). L'hypothèse est que toutes les racines du caféier échantillonné qui poussent en dehors du polygone sont compensées par celles des caféiers voisins qui pénètrent à l'intérieur du polygone. Nous n'avons excavé qu'un quart de cet espace (Figure 2) choisi en fonction de la facilité de travail et après sondage à la barre de fer pour évaluer s'il y a un taux important de roches en profondeur.

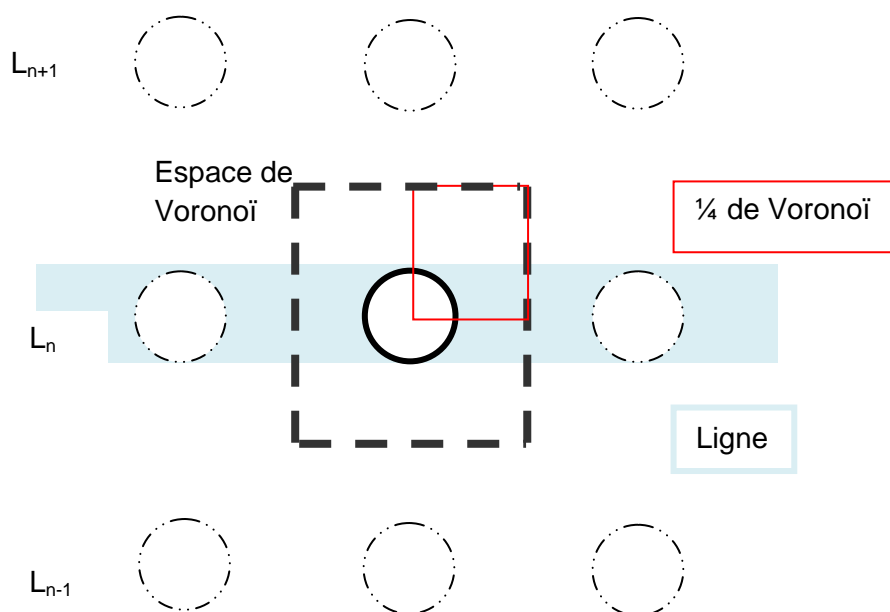


Figure 2: Espace de Voronoï autour du caféier. Distance réelle sur la ligne = 1,11m ; distance réelle entre lignes=1,43m.

L'excavation a été réalisée sur 150 cm et divisée en couches. La première fait 10 cm de profondeur, toutes les autres font 20 cm, jusqu'à 150 cm, soit 8 couches. La terre a été triée sur place avec table et tamis (Cf. *Annexe 3*, planche de photos), les racines grosses, moyennes et fines ont été récupérées et mises en sachet par couche. La circonférence au collet se mesure sur le bois frais juste après la coupe à l'aide d'un fil de nylon. Les mesures incluent donc l'écorce. Nous avons également mesuré le volume de pierres, ou estimé leur volume par leur masse et la densité moyenne des pierres lorsqu'elles étaient trop grosses, pour chaque couche. Nous supposons en effet que le développement des racines peut être affectée par une fraction de pierres importante. Les racines ont été lavées et triées dans les 48h au laboratoire. Elles sont nettoyées à l'eau courante, mises en sachet, séchées 48h à 60°C dans un four, puis pesées avec une balance de précision à deux décimales.

- **Méthode d'excavation rapide : extraction au treuil**

Cette méthode permet d'arracher le caféier entier, elle est beaucoup plus rapide et nécessite peu de main d'œuvre. Elle a été utilisée après le travail sur le ¼ du polygone de Voronoï, au moment de récupérer la souche et les racines dans les ¾ du Voronoï non excavés. Au départ, il s'agissait uniquement de récupérer la souche complète et d'avoir accès au compartiment « racine pivot ». Puis nous avons également étudié l'appareil racinaire ancré sur la racine pivot, dans l'idée de comparer ces deux méthodes très utilisées pour des études de biomasse. Le treuil est accroché à un trépied posé au sol au dessus du caféier d'étude et relié à la base du cep par une chaîne (Cf. *Annexe 3*, planche de photos). Certaines racines ayant été coupées lors de l'arrachage, nous en avons récupéré un maximum dans le sol (notamment les racines grosses et moyennes). La souche entière est ramenée au laboratoire et les racines sont traitées comme dans la méthode précédente. La racine pivot et le cep sont séchés à 60°C au four mais pendant 4 jours.

- b. Réalisation de cartes d'impacts**

Avant d'arracher la souche, nous avons établi une carte d'impacts dans le ¼ du polygone de Voronoï, soit un inventaire des nombres et surfaces d'impacts racinaires par profondeur et sur chaque paroi de la fosse creusée. Les diamètres ont été mesurés au pied à coulisse électronique de précision 10^{-2} mm et nous avons calculé la surface d'impacts totale pour chaque couche. Nous avons choisi d'utiliser systématiquement la face dans la ligne et la face perpendiculaire (Photo 3), les deux passant par le pied de caféier, puis cumulé les surfaces d'impacts racinaires de ces deux faces pour des pas de profondeur de 10 à 30 cm. Ces résultats seront comparés à la biomasse obtenue dans le Voronoï pour les couches correspondantes. Ainsi le volume exploré pour la biomasse est bien proportionnel à la longueur des deux faces, quelle que soit la taille du Voronoï.

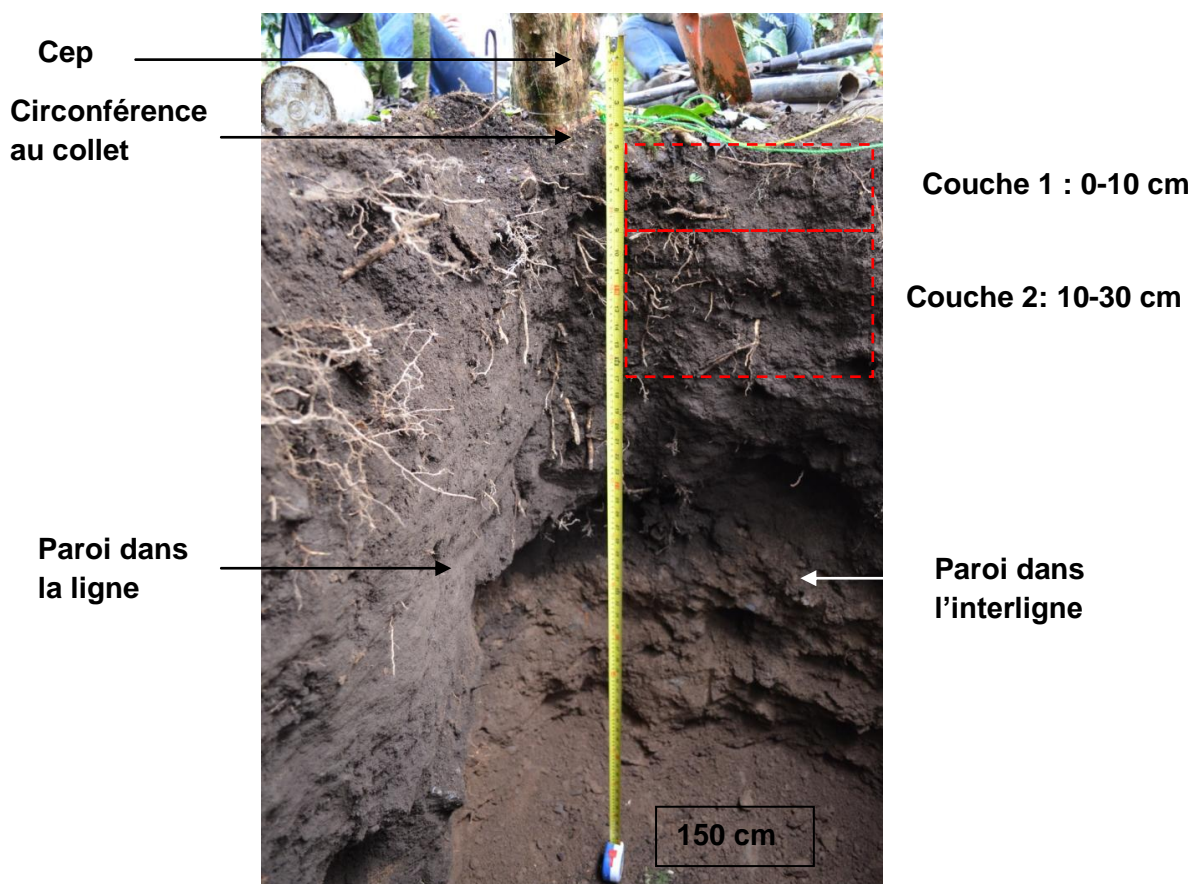


Photo 3: Fosse et des deux parois dont les cartes d'impacts seront utilisées pour établir des relations entre la surface cumulée d'impacts par couche et la biomasse correspondante.

c. Extrapolation au profil 0-450 cm à partir de données pré-existantes sur des (tranchées creusées précédemment)

Deux autres études avaient déjà été menées sur des tranchées creusées dans l'interligne à Aquiares : (i) la première (« fosses 0-450 cm dans l'interligne ») a eu lieu en 2010, deux excavations profondes (0-450) cm centrées sur l'interligne ont été creusées, l'une à l'ombre et l'autre au soleil, chaque fosse, longue de 3m et large de 80 cm avait été divisée en trois parties, celle du centre étant la seule creusée jusqu'à 450 cm, les deux périphériques à 150 cm, ce qui donne une forme en T ; (ii) la seconde excavation (« fosses 0-150 cm dans l'interligne ») a été menée en Janvier 2012 pour le projet Ecosfix et concernait deux excavations, l'une à l'ombre et l'autre au soleil, chaque fosse était divisée en deux parties de volume égal dont une seule a servi pour l'échantillonnage de la biomasse racinaire. Un schéma des fosses est présenté en Figure 3. Des cartes d'impacts ont été réalisées dans toutes ces tranchées et la biomasse racinaire a été mesurée par couche de 10 cm. Le tableau 1 résume les données descriptives des trois fosses d'étude (Voronoi, 0-150 cm dans l'interligne et 0-450 cm dans l'interligne).

Pour le profil 0-150 cm, nous chercherons à comparer les résultats des fosses 0-150 cm dans l'interligne et de nos 9 fosses Voronoi (ligne + interligne). Nous faisons donc l'hypothèse que la répartition en % de la biomasse totale par couche et par classe de racines est une variable comparable dans les deux situations, sachant que la biomasse absolue serait bien sûr dépendante de la position ligne-interligne. Nous n'étudions ici que deux classes de racines : les racines fines (diamètre > 2 mm) et les racines grosses + moyennes (diamètre > 2 mm).

Pour l'extrapolation à 0-450 cm, les racines n'ayant pas été triées selon les mêmes critères de diamètre, nous avons comparé seulement la biomasse racinaire totale (racines grosses+moyennes+fines), toujours en valeur relative, soit le % de biomasse racinaire par couche, relativement à l'ensemble du profil.

Tableau 1 : Récapitulatif des données des fosses étudiées.

	Fosses Voronoï (ligne+interligne)	Fosses 0-150 cm dans l'interligne	Fosses 0-450 cm dans l'interligne
Lieu, année	Aquiaries, mars-août 2012	Aquiaries, Janvier 2012	Aquiaries, 2010
N =	9	2 (une au soleil, une à l'ombre).	2 (une au soleil, une à l'ombre)
Sous-division des fosses	Aucune	2 sous divisions de surface identique	3 sous divisions de surfaces égales et de profondeurs différentes (2 à 150 cm, 1 à 450 cm). Forme en T
Partie étudiée	Tout	1 sous division	Fosse de 450 cm
Profondeur des fosses	150 cm	150 cm	450 cm
Dimensions des sous-divisions	¼ de Voronoï pour chaque fosse ; 0,32 m ² de surface en moyenne	1,1 m ²	1 m ²
Carte d'impacts	Oui	Oui	Oui
Classe de racines étudiées	Fines (<2 mm) Moyennes (2 < Φ<10 mm) Grosses (>10mm)	Fines (<2 mm) Grosses (>2mm)	Totales
Variables comparables	Le pourcentage de biomasse pour deux classes de racines (fines < 2mm et grosses > 2 mm), par couche, sur 0-150 cm		
	Le pourcentage de biomasse racinaire (sans distinction de classes) par couche, relativement à l'ensemble du profil		

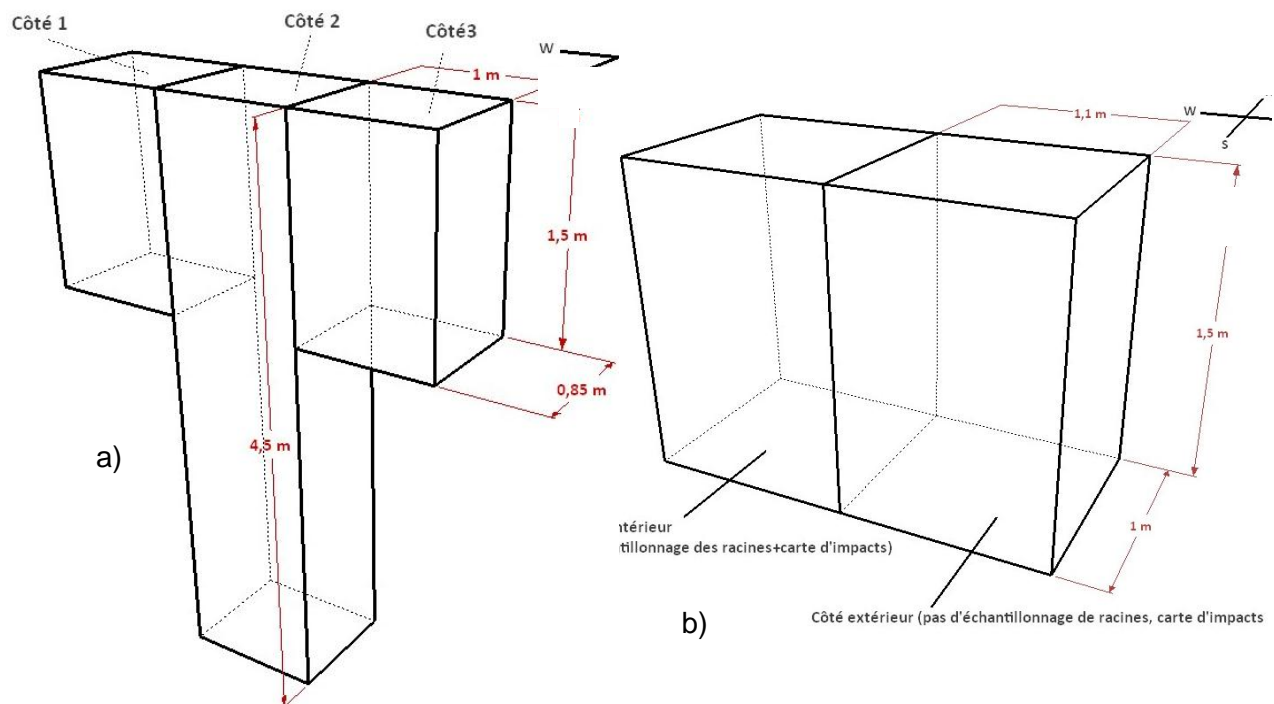


Figure 3: Fosses excavées préalablement à notre étude, a) 0-450 cm dans l'interligne et b) fosse 0-150 cm dans l'interligne

d. Accroissements des diamètres au collet

Afin d'estimer l'augmentation de biomasse annuel des ceps et des parties souterraines pérennes, nous avons :

- enregistré l'accroissement de la circonférence au collet des caféiers à l'aide de 60 colliers dendrométriques (modèle D1-K, UMS GmbH, Germany, précision 0,03 cm sur le diamètre) positionnés au collet de 60 ceps représentatifs distribués dans la parcelle de la tour. Les colliers ont été installés en janvier 2012 et relevés mensuellement.
- divisé le rayon des ceps de l'inventaire par l'âge moyen des caféiers (20 ans).

Les deux méthodes ont été comparées.

3. Expérimentation sequential coring : productivité des racines fines à l'ha

a. Théorie

La croissance racinaire, la mortalité et la décomposition ont lieu simultanément pour le compartiment des racines fines, il est important de connaître tous les transferts entre ces compartiments (Clark et al., 2001). Par exemple, même si on a une biomasse similaire à deux intervalles de temps, il n'y a aucun moyen de savoir s'il s'agit du même stock qui a été mesuré ou s'il y a eu un cycle de mort et remplacement induisant la même biomasse. Des racines fines sont perdues à partir du stock de racines mortes en raison de la décomposition mais de nouvelles racines mortes sont aussi ajoutées à ce stock de racines mortes durant le même intervalle. L'intérêt du sequential coring est d'avoir accès à la biomasse mais aussi à la nécromasse. Plusieurs séries de carottes sont échantillonnées à différents intervalles sur une période d'au moins un an. Les racines fines sont extraites et la différence entre la biomasse et la nécromasse est faite.

b. Dispositif expérimental

Nous nous intéressons à deux variables : la biomasse et la nécromasse de racines fines. Nous calculerons également les variations (différences entre deux dates). Les facteurs étudiés sont : (i) la distance à l'arbre (deux modalités : ombre/soleil, correspondant à la position d'un caféier sous canopée d'Erythrine) ; (ii) la position (deux modalités, ligne/interligne correspondant à la position d'un caféier sur la ligne de semis) ; (iii) la date (les prélèvements ayant débuté en Avril, nous ne disposons des données que de quatre mois, de Avril 2012 à Juillet 2012).

Nous avons sélectionné 10 caféiers de la variété Catura sur la parcelle d'étude, 5 sont exposés en plein soleil, les 5 autres à l'ombre (annexe 2). Nous avons fait l'hypothèse qu'il n'y avait pas de relations entre l'aire de la souche et la biomasse des racines fines sur 0-30cm, les racines fines étant en principe davantage inféodées à la surface foliaire, et donc à l'âge des rejets de souche, eux-mêmes indépendants des parties pérennes (cep). Cette hypothèse sera vérifiée plus loin sur les caféiers utilisés pour établir les relations allométriques. Nous avons donc pris des arbres de circonférence moyenne au collet (moyenne des circonférences au collet : 29,31 cm +/- 10,59 SD). L'échantillonnage s'est fait en délimitant un polygone de Voronoï autour de chaque caféier, comme défini pour l'expérimentation allométrie. L'espace de Voronoï a été divisé en 4 parts égales dans chacune desquelles 5 emplacements ont été définis pour réaliser les carottages. Tous les mois, 5 emplacements par caféier ont été échantillonnés sur 30 cm de profondeur, avec un prélèvement par tranche de 10 cm, à l'aide d'une tarière hollandaise construite sur place (8 cm de diamètre, 10 cm de hauteur, volume de 502,7 cm³). Ces 5 emplacements sont choisis pour être représentatifs de la variabilité de la biomasse racinaire au sein de l'espace de

Voronoï. Le schéma du dispositif est présenté en annexe 6. Pour les calculs, les variables ont été sommées sur les 30 cm de profondeur.

Le modèle complet s'écrit :

$$Y_{ijk} = \mu + \varphi_i * \beta_j * \gamma_k + \varepsilon_{ijk}$$

Avec :

Y_{ijk} : la biomasse ou la nécromasse en g

φ_i : le facteur « Position » (i=1;2)

β_j : le facteur « distance à l'arbre (j=1 ; 2)

γ_k : le facteur date (k = 1 ; 2 ; 3 ; 4)

ε_{ijk} : erreur résiduelle

Dans un premier temps, nous n'avons pas pris en compte l'effet date, qui a été étudié séparément. Nous avons donc 4 traitements (2 positions * 2 distance à l'arbre), avec 10 caféiers* 5 emplacements par date = 50 répétitions par mois.

c. Tri, séchage, pesée

Les échantillons ont été amenés au laboratoire et conservés à 4°C au réfrigérateur en attendant leur traitement. Les échantillons sont passés initialement au gros tamis pour éliminer les cailloux et ameublir la terre. Ils sont ensuite lavés à l'eau et filtrés dans une colonne de tamis (2 mm, 1 mm et 0,5 mm). Les racines de café sont ensuite soigneusement séparées. Il est assez aisé de reconnaître les racines d'autres espèces présentes, surtout les adventices et les érythrines : celles des adventices sont généralement très fines et ont un aspect complètement différent de celles du caféier ; celles des érythrines sont molles, spongieuses et ont une odeur bien caractéristique. Mais pour les calculs de NPP, il est nécessaire de bien différencier les racines vivantes et mortes, ce qui est beaucoup plus incertain (Vogt et al., 1998). Une série de coupes transversales sur les racines a permis d'établir des critères de reconnaissance dont certains étaient déjà communément admis dans la littérature. Un rapprochement entre la cytologie et l'histologie a pu être fait, mais une étude plus approfondie de comparaison serait nécessaire pour s'assurer de la méthode. Ainsi, les racines vivantes sont blanches ou subérisées, dures et résistantes à la cassure (Persson et al., 2007). Elles possèdent encore une stèle de couleur blanche. Les racines mortes ont une gamme de couleur allant du marron au grisâtre, elles sont molles et peu résistantes à la cassure. La stèle est soit absente, soit de couleur très foncée. Elles sont facilement reconnaissables lorsqu'elles sont situées aux extrémités des arborescences racinaires et représentent un très faible pourcentage de la totalité des racines prélevées (photos en annexe 5).

Les racines ont été séchées 48h au four à 60°C, puis pesées avec une balance de précision 10-4 g.

4. Calculs

a. Expérimentation allométrie

Pour avoir la biomasse souterraine de la plante entière par espace de Voronoï, les biomasses des racines fines, moyennes et grosses récoltées dans le ¼ de Voronoï sont multipliés par 4. Nous avons également appliqué un coefficient correcteur pour chaque fosse individuelle pour la standardiser à la surface moyenne d'un emplacement dans la parcelle d'étude (1,59 m²).

L'estimation de la biomasse à l'hectare se fait par le calcul suivant (Eq. 4):

$$BM_X = \sum BM_X Cl(i) \times freqCl(i) \quad (\text{Eq. 4})$$

Avec : BM_X la biomasse du compartiment X, $Cl(i)$ la classe de circonférence établie à partir de l'inventaire initial au collet et $freqCl(i)$ la fréquence de la classe (i) dans l'inventaire réalisé. Les résultats sont multipliés par la densité des emplacements caféiers à l'hectare (6300 théoriques, 5580 résiduels, nous appliquerons la moyenne).

Les mesures d'accroissement annuel de diamètre au collet sont toujours en cours et nous disposons des données pour une période de 8 mois seulement à ce jour, que nous extrapolerons à l'année pour estimer la NPP des parties pérennes :

$$\Delta BM_{rp} = \sum_{t+1} BM_{rp} Cl(i) \times freqCl(i) - \sum_t BM_{pr} Cl(i) \times freqCl(i) \quad (\text{Eq. 5})$$

Ce résultat sera comparé à un accroissement moyen obtenu sur l'ensemble de la durée de vie des caféiers pour vérification de l'ordre de grandeur.

b. Expérimentation sequential coring

- Calcul de la production de racines fines

La production de racines fines sera estimée à partir de deux méthodes de calcul conventionnelles, la « decision matrix » (DM) (Fairley et Alexander, 1985) et la méthode « max-min » (MM) (McClaugherty et al. 1982).

La « decision matrix » a été introduite parce que la croissance des racines, leur mortalité et leur remplacement ne sont pas des phénomènes indépendants, de telle sorte que la production de racines serait sous-estimée. Elle semble être une bonne approche pour estimer la NPP (Vogt et al., 1998) ; Brunner, 2012). Elle calcule la production de racines fines annuelle (P_a) en additionnant toutes les productions calculées (P) entre chaque paire de dates d'échantillonnage consécutifs pendant toute une année pleine en tenant compte des variations de la nécromasse (4).

$$P_a(BM) = \sum P \quad (\text{Eq. 6})$$

P est calculé entre deux dates d'échantillonnage soit en additionnant les différences de biomasse (ΔB) et nécromasse (ΔN), soit en additionnant seulement les différences de biomasses (Tableau 2) :

$$P = \Delta B + \Delta N \quad (7) \quad \begin{array}{l} \text{a) si la biomasse et la nécromasse ont augmenté} \\ \text{b) si la biomasse a diminué et que la nécromasse a augmenté,} \\ \text{mais } |\Delta B| < |\Delta N| \end{array}$$

$$P = \Delta B \quad (8) \quad \text{si la biomasse a augmenté et la nécromasse diminué}$$

$$P = 0 \quad (9) \quad \begin{array}{l} \text{a) si la biomasse et la nécromasse ont toutes deux diminué,} \\ \text{b) si la biomasse a diminué et que la nécromasse a augmenté,} \\ \text{mais } |\Delta B| > |\Delta N| \end{array}$$

Toutes les valeurs de production des périodes intermédiaires sont additionnées du début du sequential coring jusqu'au même point l'année suivante.

Tableau 2 : estimation de la production de racines fines, adaptée de Fairley et Alexander (1985)

	Biomasse augmente	Biomasse diminue
Nécromasse augmente	$P = \Delta B + \Delta N$	$P = \Delta B + \Delta N a$ ou $P = 0 b$
Nécromasse diminue	$P = \Delta B$	$P = 0$

a si $|\Delta B| < |\Delta N|$

b si $|\Delta B| > |\Delta N|$

La méthode « max-min » a été très utilisée dans le passé. Elle consiste à calculer la production annuelle (P_a) de racines fines en soustrayant la plus petite biomasse (B_{min}) de la plus grande valeur de biomasse (B_{max}) quelques soient les autres valeurs enregistrées sur un an (10).

$$P_a(MM) = B_{max} - B_{min} \quad (\text{Eq. 10})$$

- Calcul des taux de renouvellement racinaires

Le taux de renouvellement ou « turnover » τ_{Bmax} sera calculé en divisant la production annuelle de racines fines (P_a) par la plus grande valeur de biomasse (B_{max}), selon (Gill and Jackson, 2000).

$$\tau_{Bmax} = \frac{P_a}{B_{max}} \quad (\text{Eq. 9})$$

Une alternative est de calculer le taux moyen τ_{Bmean} en divisant P_a par la biomasse moyenne (McClaugherty et al. 1982).

$$B_{mean} = \sum \frac{B}{n} \quad (n = \text{nombre d'échantillons par an}) \quad (\text{Eq. 10})$$

$$\tau_{Bmean} = \frac{P_a}{B_{mean}} \quad (\text{Eq. 11})$$

- Calcul de NPP des racines fines

Le calcul de NPP des racines fines se fera selon l'équation :

$$NPP_{rf} = (BM_{rf} \times \tau_{rf}) \quad (\text{Eq. 12})$$

Pour la biomasse, nous comparerons deux méthodes de calcul: l'une utilise les biomasses des racines fines issues de la méthode des Voronoï, l'autre via le sequential coring sur 0-30 cm. Les deux méthodes seront extrapolées au profil 0- 450 cm.

5. Statistiques

a. Expérimentation allométrie

Les relations allométriques entre la biomasse par compartiments et la circonférence au collet d'une part, et la surface cumulée d'impacts d'autre part, ont été analysées par régressions linéaires simples.

b. Expérimentation sequential coring

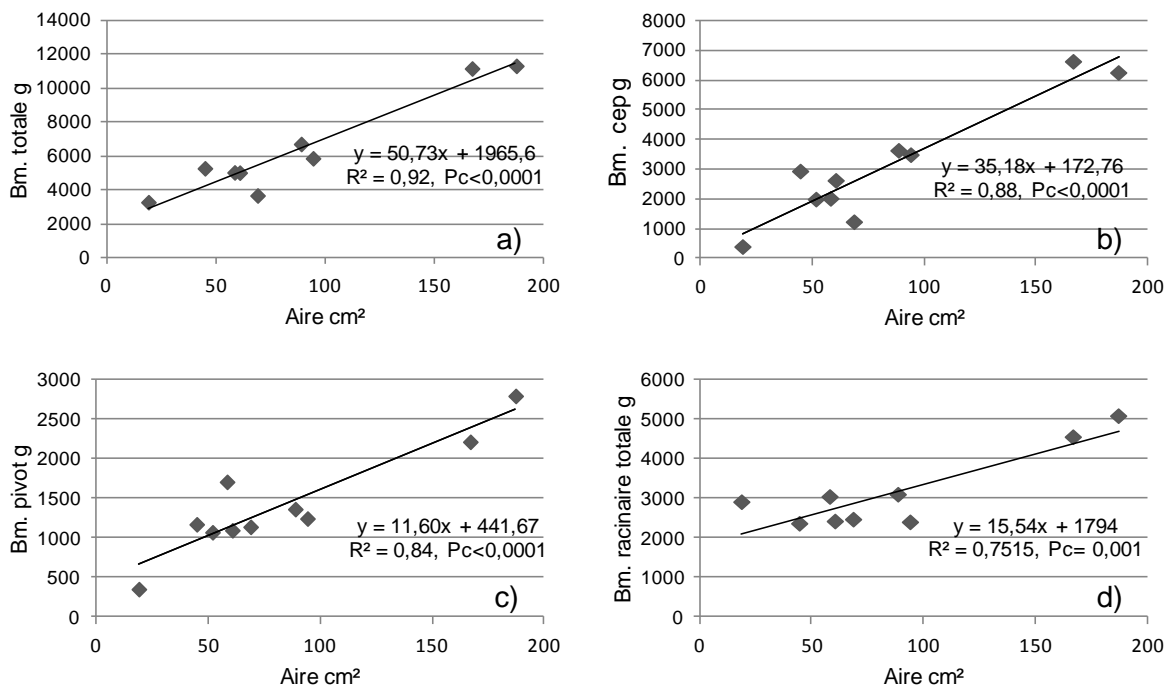
Les effets étudiés seront analysés par ANOVA, avec application préalable d'un test AIC BIC à l'aide du logiciel R. L'homogénéité des variances et la normalité des résidus seront évaluées respectivement par un test de Bartlett et un test de Shapiro.

III. Résultats

1. Expérimentation « Allométrie »

a. Construction des relations allométriques avec l'aire au collet

L'objectif premier de notre étude était d'établir un modèle pouvant prédire fidèlement la biomasse des différents compartiments pérennes étudiés (cep et compartiments souterrains) à partir d'un caractère facilement mesurable sur la partie pérenne, ici la surface au collet des caféiers et dans des conditions très éloignées du cas idéal des arbres en futaie : caféiers échantillonnés présentant plusieurs (1-3) plantes par emplacement et élagage tous les 5 ans. Nous avons effectivement obtenu de très bonnes régressions pour les compartiments pérennes ($R^2 \geq 0,75$, probabilités très hautement significatives, fig. 4). Sans surprise, nous n'avons pas obtenu, de relation significative pour les racines fines et moyennes, qui ne sont donc pas estimables par ce procédé. Néanmoins, leur proportion restant modeste (9% de racines fines dans l'appareil souterrain et 17% de moyennes), la prédiction sur l'ensemble des compartiments souterrains reste excellente. La régression sur la biomasse totale des compartiments étudiés (souterrain + cep) est la plus robuste et permettra donc d'établir une partition de la biomasse totale des caféiers à l'hectare, en complément des données existantes sur les parties aériennes (rejets + feuilles) (Audebert, 2011). Nous avons également tenté d'inclure la variable « hauteur de cep » dans le modèle mais sans amélioration. Il est notable néanmoins que les ordonnées à l'origine étaient significativement différentes de zéro, ce qui pourrait indiquer que l'hypothèse fondamentale de la compensation entre les racines qui sortent vers l'extérieur de l'espace Voronoï et celles qui y rentrent depuis l'extérieur (caféiers voisins) n'est pas robuste. En général, l'intercept était positif, indiquant une contribution plus forte des racines venant de l'extérieur. Pour le cep, l'ordonnée à l'origine était bien de zéro (pas de contribution extérieure possible), ce qui renforce la confiance dans le jeu de données.



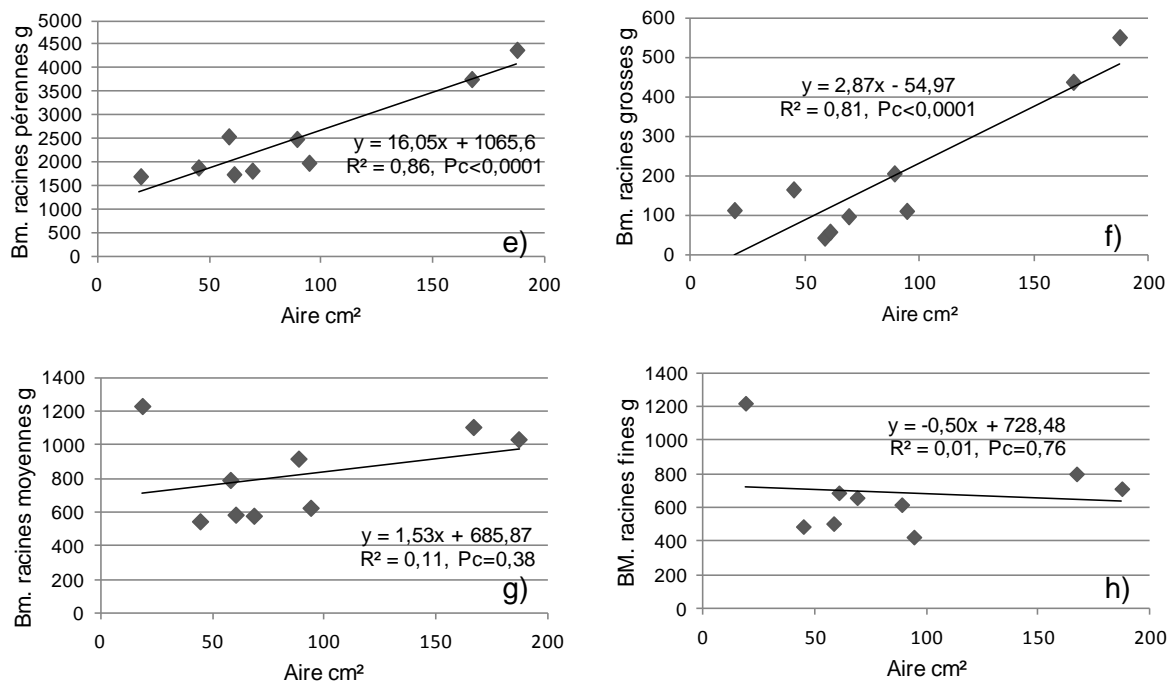


Figure 4 : Relations entre l'aire au collet et la biomasse par compartiment du caféier (exprimée en g_{BM} par espace Voronoï complet et standardisé pour une maille élémentaire de 1.59 m²) : a) biomasse totale des 6 compartiments étudiés ; b) cep ; c) racine pivot ; d) biomasse souterraine ; e) biomasse souterraine pérenne ; f) racines grosses ; g) racines moyennes ; h) racines fines. N=9-10 caféiers (un Voronoï manquant). Coffee-flux, Aqiares, Costa Rica

b. Comparaison entre la biomasse souterraine obtenue par Voronoï ou par extraction au treuil

L'objectif ici était d'une part d'extraire facilement la souche entière à l'aide du treuil, mais également de tester la précision de cette méthode, en comparaison avec la méthode de référence (espace Voronoï). Pour la comparaison, l'espace $\frac{1}{4}$ Voronoï a été préalablement extrait et sa valeur multipliée par 4, tandis que pour la valeur de biomasse extraite au treuil, représentant donc les trois quarts restant, le quart manquant a été ajouté. Les méthodes étaient corrélées positivement, mais avec un coefficient de détermination faible et une probabilité > 0.05 , sauf pour les racines grosses (fig.5). Même pour les racines grosses, la pente était très largement sur-estimée par la méthode du treuil. La pente des droites de régression augmentait logiquement quand la fragilité des racines diminuait, ce qui signifie que le treuil a tendance à casser les racines fragiles, mêmes proches, et à arracher des racines solides au-delà de l'espace Voronoï. La méthode du treuil semble donc idéale pour extraire la souche rapidement mais n'est pas utilisable pour la quantification des autres racines, même si l'espace Voronoï était préalablement circonscrit par une tranchée (perte excessive de racines fragiles).

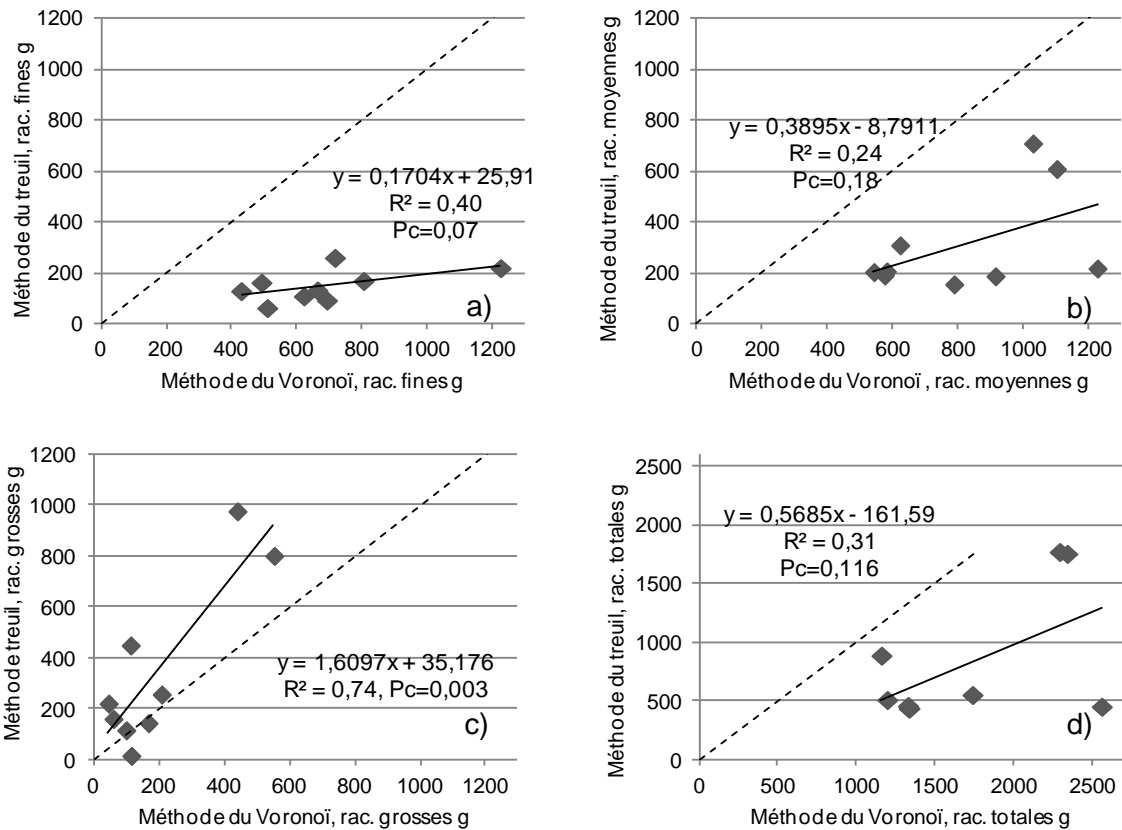


Figure 5 : Comparaison de la biomasse excavée obtenue par la méthode de référence (Voronoi) et par la méthode rapide (treuil), exprimée en g_{BM} par espace Voronoï complet et standardisé pour une maille élémentaire de 1.59 m^2 . a) Racines fines ; b) Racines moyennes ; c) Racines grosses ; d) Appareil racinaire complet. Coffee-flux, AQUIARES, Costa Rica

c. Distribution de la biomasse souterraine sur le profil, comparaison de trois types de fosses

L'objectif ici était d'extrapoler la biomasse des racines grosses, moyennes et fines (en excluant le pivot) depuis nos Voronoï jusqu'à l'ensemble du profil effectivement colonisé par les racines (soit 0-450 cm selon observations préalables). Nous avons en tout 3 jeux de données de biomasse et d'impacts racinaire disponibles, obtenus dans 3 types de fosses différentes (Tab.1) : (i) fosses 0-450 dans l'interligne ; (ii) fosses 0-150 dans l'interligne (avant notre étude) ; nos propres fosses Voronoï 0-150 cm. Nous avons obtenu une bonne correspondance ($p_c > 0.1$ pour tous les tests; Test t de Student) entre les distributions de biomasse par type de racine (grosses, moyennes et fines) et par profondeur (entre 0 et 150 cm) selon les deux types de fosses 0-150 cm disponibles (figure 4). Sur le profil 0-150 cm (Fig.6), les racines moyennes et grosses représentaient entre 50 et 80% de la biomasse des couches entre 0 et 100 cm (le reste correspondant aux racines fines), relayées plus en profondeur par les racines fines qui représentaient environ 70% de la biomasse à 140 cm.

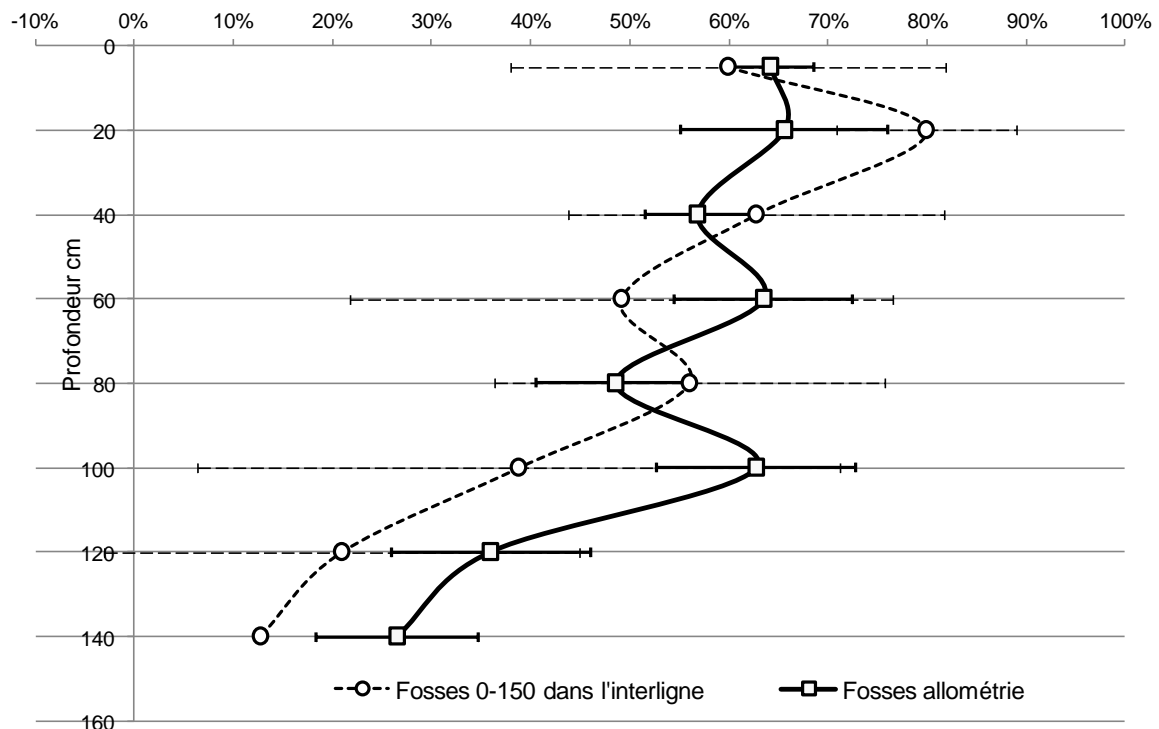


Figure 6 : Comparaison de la distribution du pourcentage de la biomasse des racines grosses+moyennes par couche sur le profil 0-150 cm entre les Voronoï (N=9 ; ligne + interligne) et les fosses 0-150 cm dans l'interligne (N=2). Le profil des racines fines n'est pas représenté mais leur somme avec les racines moyennes et grosses fait 100. Les barres d'erreur sont des SE pour standardiser entre les deux méthodes. Coffee-flux, Aquiares, Costa Rica.

La très bonne concordance entre la distribution des racines obtenues dans les fosses 0-150cm, qu'elles aient été creusées dans l'interligne ou bien dans ligne+interligne nous a permis d'envisager une extrapolation des données Voronoï au profil 0-450 cm (données originales dans l'interligne).

d. Extrapolation des biomasses totales racinaires au profil 0-450cm

L'extrapolation de la biomasse racinaire au profil 0-450 des fosses profondes n'a pu se faire que sur la biomasse racinaire totale car le tri des racines par classe n'a pas été fait selon les mêmes critères. Sur la Fig.7 , on a comparé les distributions par couche en pourcentage de la biomasse racinaire totale du profil (profil entier = 100% de la biomasse). En surface (5cm), la biomasse représentait 25% de la biomasse de tout le profil, avec une valeur plus élevée (environ 30%) à 20 cm. Le profil accusait une diminution exponentielle jusqu'à 150 cm où apparaissait un premier minimum. La biomasse réaugmentait légèrement entre 150 et 250 cm, ce que nous attribuons à une réduction locale du volume de pierres. Puis, au-delà de 250 cm, ne subsistaient plus que quelques racines, ceci jusqu'à 450 cm. Grâce à la très bonne concordance obtenue entre les 3 méthodes dans le profil commun 0-150 cm, nous avons envisagé une extrapolation de l'espace Voronoï à l'ensemble du profil réellement colonisé par les racines (0-450 cm). Le coefficient multiplicateur pour passer de la biomasse racinaire totale (pivot exclu) 0-150 cm à 0-450 cm était de 1.08. Ce résultat permettra de calculer la biomasse souterraine à l'ha pour l'ensemble du profil racinaire réel.

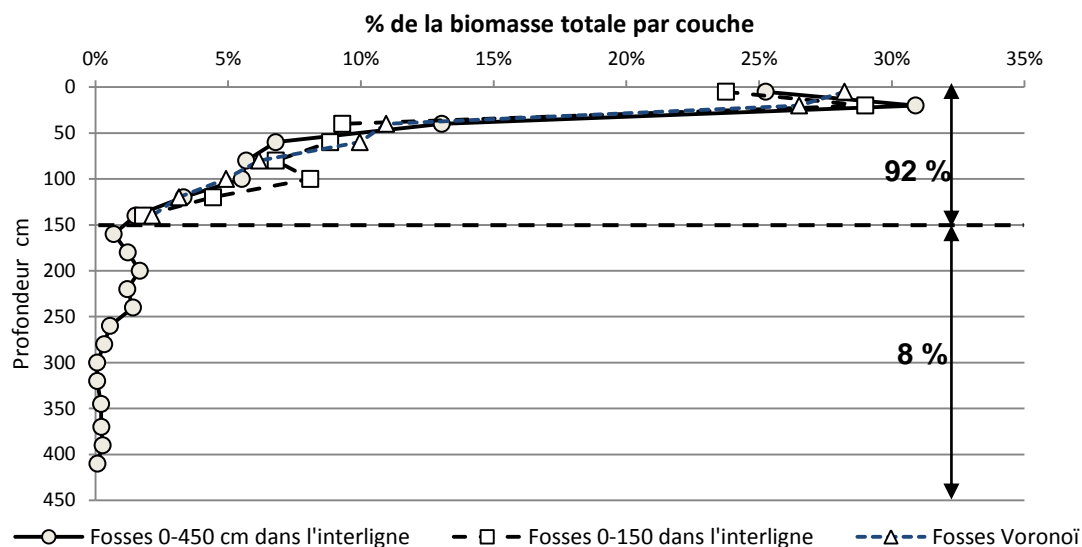


Figure 7 : Distribution de la biomasse totale des racines par couche, en pourcentage de la biomasse totale du profil. Comparaison des fosses 0-450 cm dans l'interligne, des fosses 0-150 cm dans l'interligne et des fosses Voronoï (Ligne+interligne, 0-150 cm). Coffee-flux, Aquiares, Costa Rica.

e. Relations entre biomasse racinaire dans les fosses et surfaces cumulées d'impacts sur les parois

Ici l'objectif était d'évaluer si la méthode rapide des surfaces d'impacts était ou non un bon prédicateur de la méthode de référence du Voronoï. Nous n'avons utilisé que deux parois perpendiculaires dans chaque fosse, choisies arbitrairement mais systématiquement les mêmes. Bien que la probabilité des régressions ait été très hautement significative, nous n'avons pas obtenu de bonne prédiction de la biomasse par type de racine par la méthode des impacts. Pour la biomasse racinaire totale (pivot exclu), le modèle permettait de représenter seulement 47% de la variabilité (Fig. 8).

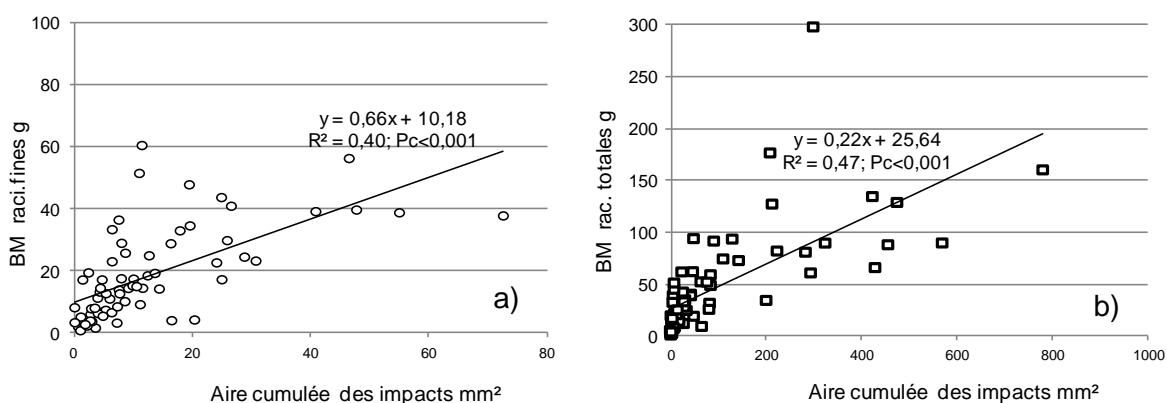


Figure 8: Relations entre la surface cumulée d'impacts racinaires sur deux parois de la fosse Voronoï et la biomasse de racines dans la couche correspondante : a) racines fines; b) racines totales (grosses + moyennes + fines). Coffee-flux, Aquiares, Costa Rica

f. Partition de la biomasse entre parties souterraines et partie aériennes

En couplant nos résultats à ceux obtenus par Audebert et Charbonnier en 2011 sur la biomasse des rejets aériens, nous disposons obtenons la biomasse totale des caféiers à l'hectare et sa répartition entre les parties aériennes (rejets, feuilles, cep) et souterraines (pivot et autres racines) (Fig. 9). La biomasse aérienne représente près de 2/3 de la biomasse totale, le cep représentant à lui seul plus de 50% de la biomasse totale et la racine pivot 19%. La biomasse racinaire constitue environ la moitié de la biomasse totale de la souche, les parties pérennes (cep, pivot, racines grosses et moyennes) représentent quand à elles 85 % de la biomasse totale. La distribution de la biomasse reflète bien celle d'une plante fortement élaguée, dont les parties pérennes conservent l'essentiel de la biomasse, voire la concentrent pour la survie de la plante. Les racines fines ne représentent qu'une faible part dans la biomasse racinaire, de l'ordre de 10%, soit 4% de la biomasse entière. Notons que cette valeur est très proche de la valeur des feuilles, ce qui indique que notre choix d'échantillonner les caféiers selon les rejets aériens, et non pas selon la taille du cep est un bon choix pour l'étude des racines fines par sequential coring. Au final la biomasse des cafeiers atteint 129,15 t_{BM} ha⁻¹.

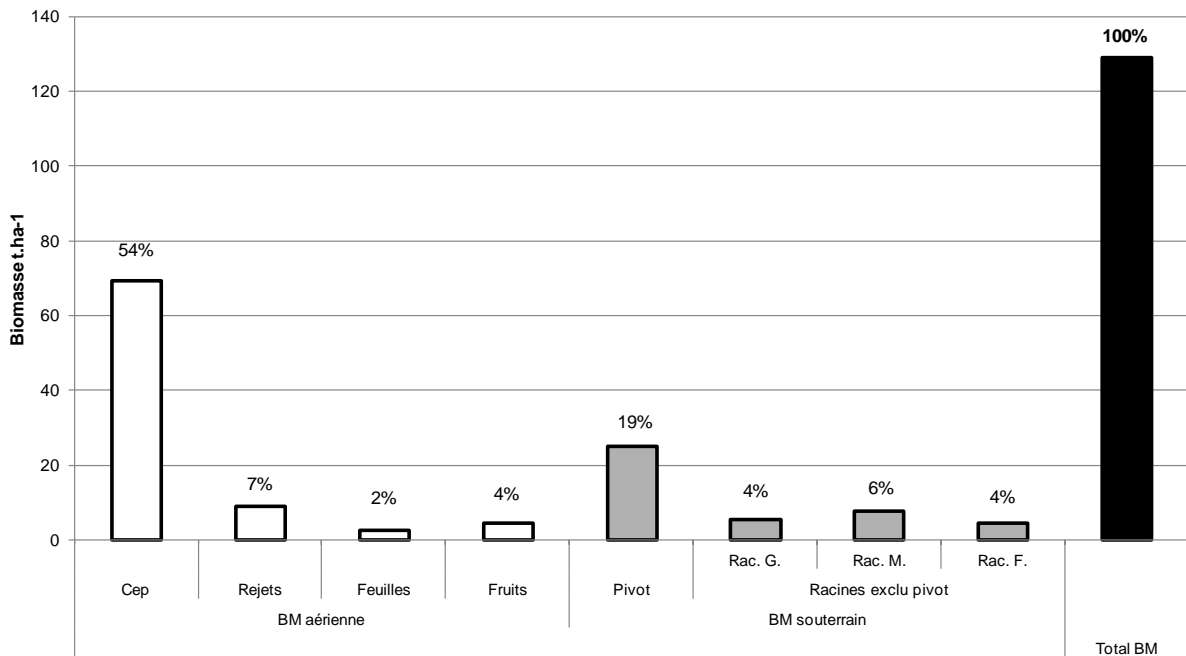


Figure 9: Répartition de la biomasse des différents compartiments du caféier (t_{MS} ha⁻¹). Coffee-flux, Aquiares, Costa Rica.

g. Estimation de la NPP des racines pérennes et des ceps

Les mesures d'accroissement en rayon réalisées cette année avec les colliers dendrométriques n'ont pas fourni de résultats satisfaisants pour l'instant (sous-estimation de la croissance réelle). Nous avons donc résolu temporairement d'estimer l'accroissement annuel grossièrement, en considérant un rayon moyen dans la parcelle de 4.7 cm et un âge moyen de 20 ans. Nous estimons ainsi l'accroissement en rayon des souches à 0,24 cm an⁻¹, soit NPP des racines pérennes (pivot+ racines grosses+ racines moyennes) = 1.46 t_{MS} ha⁻¹ an⁻¹ et NPP des ceps = 3.13 t_{MS} ha⁻¹ an⁻¹.

2. Productivité et Mortalité des racines fines à l'ha, évaluée par « Sequential Coring » (calcul sur 5 mois)

a. Variabilité spatiale et temporelle des biomasse et nécromasse des racines fines

Suite à nos mesures par Sequential coring, la moyenne de la biomasse (BM) à l'ha dans l'horizon 0-30 cm était de $1.89 \text{ t}_{\text{BM}} \text{ ha}^{-1} \pm 1.57 \text{ SD}$ et la nécromasse (NM) de $0.04 \text{ t}_{\text{BM}} \text{ ha}^{-1} \pm 0.06 \text{ SD}$. Nous avons obtenu une bonne correspondance entre la moyenne de biomasse de racines fines sur 0_30 cm entre l'expérimentation allométrie ($2,25 \text{ t}_{\text{BM}} \text{ ha}^{-1} \pm 1,18 \text{ SD}$) et celle par sequential coring ($1,89 \text{ t}_{\text{BM}} \text{ ha}^{-1} \pm 1,57 \text{ SD}$), ce qui conforte la robustesse de nos approches.

Nous avons étudié les effets Date (4 dates de prélèvement espacées d'un mois), Position (ligne ou interligne) et Distance à l'arbre (sous canopée ou en plein soleil) dans un modèle général à effets fixes (ANOVA). Les populations n'étaient pas distribuées de manière normale, aussi nous avons transformé préalablement la variable BM en log. Le seul effet que nous avons observé fut l'effet Position ($p < 0.001$), avec environ deux fois plus de racines fines dans la ligne ($2.74 \text{ t}_{\text{BM}} \text{ ha}^{-1} \pm 1.74 \text{ SD}$) que dans l'interligne ($1.33 \text{ t}_{\text{BM}} \text{ ha}^{-1} \pm 1.14 \text{ SD}$). Cet effet était également significatif sur la variable NM. Nous avons utilisé le test de Shapiro pour tester la normalité des résidus et seul le groupe « ligne : plein soleil » n'était pas normal à cause d'outliers. Nous avons donc complété par un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis qui a confirmé l'effet Position. La figure 10 présente l'évolution de la biomasse et de la nécromasse sur les 4 mois ainsi que l'évolution de la biomasse pour les effets Position et Distance à l'arbre.

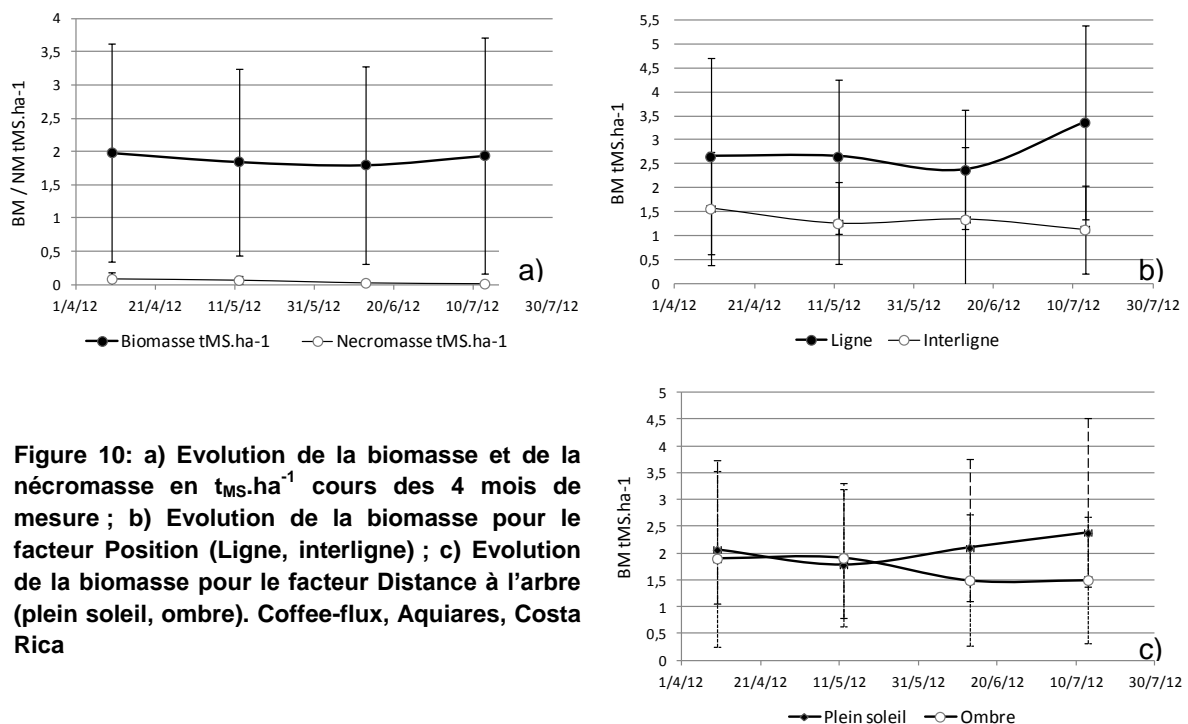


Figure 10: a) Evolution de la biomasse et de la nécromasse en $\text{t}_{\text{MS}}.\text{ha}^{-1}$ cours des 4 mois de mesure ; b) Evolution de la biomasse pour le facteur Position (Ligne, interligne) ; c) Evolution de la biomasse pour le facteur Distance à l'arbre (plein soleil, ombre). Coffee-flux, Aquiares, Costa Rica

b. Calcul de la NPP de racines fines

Nous avons pu établir une première estimation de NPP des racines fines avec les données de 4 mois, que nous avons extrapolée à l'année. Nous avons tout d'abord calculé la production (P) de racines fines et estimé le taux de renouvellement racinaire suivant les différentes méthodes proposées (decision matrix, max-min) (Tableau 3).

Tableau 3 : Calcul de la production (P) de racines fines par Sequential coring sur 0_30 cm. BM : biomasse ; NM : nécromasse ; DM : méthode decision matrix ; MM : méthode max-min. Méthodes de calculs : $P = \Delta B$ (cf. Eq. 8) ; $P = 0$ (cf. Eq. 9). Coffee-flux, Aquiares, Costa Rica

Méthode	Date	Biomasse t_{BM} ha^{-1}	Nécromasse t_{NM} ha^{-1}	P ($t_{BM} ha^{-1}$ pour 4 mois)	P ($t_{BM} ha^{-1} an^{-1}$) extrapolé à l'année)
Decision Matrix	avr-12	1,98 +/- 1,64 SD	0,082 +/- 0.07 SD		
	mai-12	1,85 +/- 1,40 SD	0,062 +/- 0.056 SD	0 (Eq.9)	
	juin-12	1,80 +/- 1.48 SD	0,021 +/- 0.023 SD	0 (Eq.9)	
	juil-12	1,94 +/- 1.77 SD	0,009 +/- 0.012 SD	0,140 (Eq.8)	
	BM_{mean}	1,90 +/- 1.57 SD		P_{DM} = 0,14	0,42
Max-Min		BM_{max}=1,98 +/- 1.64 SD BM_{min}=1,80 +/- 1.48 SD		P_{MM} = 0,18	0,55

Selon les méthodes de calcul (decision matrix ou max-min), nous avons estimé le taux de renouvellement des racines fines entre 0,21 et 0,29 an^{-1} et la durée de vie des racines fines entre 3,5 et 4,7 ans (Tab. 4). Le choix des méthodes semble influencer relativement peu sur le résultat final.

Tableau 4: calcul du taux de renouvellement (τ) et de la durée de vie des racines fines (en utilisant la biomasse moyenne B_{mean} ou la biomasse maximum B_{max} Coffee-flux, Aquiares, Costa Rica.

Méthode	Avec B_{mean}	Avec B_{max}	Taux de renouvellement ($\tau : an^{-1}$)	Durée de vie (an)
Decision matrix	0,42/1,89		0,22	4,51
		0,42/1,98	0,21	4,73
Max-Min	0,55/1,89		0,29	3,46
		0,55/1,98	0,28	3,60

c. Estimation de la NPP des racines fines

Selon les méthodes de calcul utilisées pour l'estimation de la biomasse de racines fines (soit à partir de la biomasse de l'expérimentation allométrie, soit à partir de la biomasse de racines fines estimée par sequential coring) et les méthodes de calcul de taux de renouvellement (max-min, decision matrix), nous estimons la NPP des racines fines entre 0,83 $t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ et 1,27 $\cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$. Nous avons retenu la valeur moyenne de 1,02 +/- 0,17 SD (Tab.5).

Tableau 5 : Calculs de NPP des racines fines selon les méthodes d'évaluation de la biomasse (allométrie ou sequential coring) et celles pour le taux de renouvellement (τ , max_min ou decision matrix). Bien que nous ne sachions pas la proportion exacte de racines fines sur le profil 150-450, nous avons appliqué le coefficient de 1,08 pour extrapoler à 450 cm, en supposant que c'était surtout cette classe de racines qui descendait le plus en profondeur. Coffee-flux, Aquiares, Costa Rica.

	Biomasse de racines fines sur 0-450cm ($t_{MS}.ha^{-1}$)	τ (an^{-1})	NPP racines fines ($t_{MS}.ha^{-1}.an^{-1}$)
Biomasse des racines fines estimée des fosses de Voronoï (allométrie)	4,57	0,22	1,01
	4,57	0,21	0,96
	4,57	0,29	1,33
	4,57	0,28	1,28
Biomasse des racines fines estimées du Sequential coring (résultat sur 0-30 cm extrapolé à 0-450 cm).	3,78	0,22	0,83
	3,78	0,21	0,79
	3,78	0,29	1,10
	3,78	0,28	1,06
Moyenne			1,04 +/-0,19

3. Estimation de la NPP racinaire et de la NPP totale de la plantation de caféier

D'après l'équation 3, nous obtenons une $NPP_{racines}$ de :

$$NPP_{racines} = \Delta DM_{cr} + DM_{fr} \times \tau_{fr} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$= 1,46 + 1,04 = 2,50 t_{MS}.ha - 1.an - 1$$

La NPP racinaire manquait au modèle général de NPP du caféier à Aquiares. Le tableau 6 compile l'ensemble des estimations de biomasse et de NPP des différents compartiments des caféiers, aériens et souterrains. Tous les compartiments du caféier ont été étudiés, nous obtenons une première estimation de NPP de plante entière de **22.77 $t_{MS} ha^{-1}.an^{-1}$** , soit **11.4 $t_C ha^{-1}.an^{-1}$** (en faisant l'hypothèse que la biomasse de la plante est composée en moyenne de 50% de carbone).

La tour à flux a mesuré en 2011 une GPP_{totale} de **22.8 $t_C.ha^{-1}.an^{-1}$** , soit une valeur de NPP inversée (Eq. 1) d'environ **11.4 $t_C.ha^{-1}.an^{-1}$** (en supposant que NPP est proche de la moitié de GPP), la différence correspondant à la respiration autotrophe. Nous avons donc deux estimations de NPP_{totale} par deux méthodes indépendantes (une directe par la tour à flux, l'autre indirecte par des mesures de terrain) très proches. Les estimations sur la NPP restent encore imprécises et des mesures sont en cours pour améliorer les modèles de calcul (notamment le sequential coring qui finira en Mars 2013, et quelques caféiers « allométrie » nécessaires en plus pour compléter l'expérimentation sur l'allométrie, relativement à la distribution observée des classes de circonférence).

Tableau 6 : Estimations des biomasses en $t_{MS}.ha^{-1}$ et NPP en $t_{MS}.ha^{-1}.an^{-1}$ des différents compartiments de la plantation de caféier. Comp. : compartiment ; G : grosses ; M : moyennes ; F : Fines ; Pér. : pérennes. Coffee-flux, Aquiares, Costa Rica.

Comp.		BM $t_{MS}.ha^{-1}$	% relatif au total	% par comp.	NPP $t_{MS}.ha^{-1}.an^{-1}$	% relatif au total	% par compartiment
Souterrain	Pivot	25,16	19%	58%	1,03 ^a	4,5%	41%
	Rac. G.	5,71	4%	13%	0.26 ^a	1,1%	10%
	Rac. M.	7,67	6%	18%	0.17 ^b	0,8%	7%
	Rac. F.	4,57	4%	11%	1,02	4,6%	42%
	Rac. Pér.	38,54	30%	89%	1,46 ^a	6,4%	59%
	Rac. (pas pivot)	17,94	14%	42%	1,47	6,5%	58%
	total	43,11	33%	100%	2,48	11%	100%
Aérien ^c	Cep	69,38	54%	81%	3,14	14%	15%
	Rejet	9.23	7%	11%	8.52	37%	42%
	Feuille	2.82 ^d	2%	3%	4,03	18%	20%
	Fruits	4,61	4%	5%	4,6	20%	23%
	total	86,04	67%	100%	20,29	89%	100%
TOTAL		129,15	100%		22.79	100%	
Total $t_c.ha^{-1}$		64, 57			11.40		

^a : estimée à l'aide de la relation allométrique correspondante

^b : estimée par $NPP_{racines\ pérennes} - NPP_{racines\ grosses}$ car l'équation d'allométrie sur les racines moyennes n'est pas précise

^c : moyennes sur 2011

^d : pour un LAI moyen de 3,2 et un SLA de 11,34

IV. Discussion

a. Comparaisons méthodologiques des méthodes utilisées, efficacité, précision

- Pour l'évaluation de la biomasse et de la productivité des parties pérennes (Types de fosses ou d'extraction, Allométrie, Impacts)

La méthode de référence du Voronoï semble être la plus précise pour estimer la biomasse en profondeur du compartiment souterrain, sans la racine pivot, quelque soit la classe de racines. Levillain et al avaient également montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre les méthodes utilisées (tranchées, tarière, monolithes) (Levillain et al, 2010). C'est à partir des estimations de biomasse des tranchées que nous avons pu établir des relations allométriques satisfaisantes. Cette technique reste laborieuse à mettre en œuvre. Elle nécessite 5 à 6 hommes par jour pour creuser et séparer les racines de la terre et deux hommes par jour en plus de traitement en laboratoire (rinçage, tri, pesée).

La méthode du treuil est très rapide, quelques minutes suffisent pour extraire une plante entière et récupérer les racines restantes sur le sol. Elle est la méthode privilégiée permettant d'accéder à la racine pivot. Elle demande peu de main d'œuvre. Par contre, elle sous estime très largement la biomasse des racines fines et des racines moyennes, tandis qu'elle surestime celle des racines grosses. Le pivot représentant 2/3 de la biomasse souterraine, l'incertitude sur l'estimation du tiers restant (racines sauf pivot) peut, selon les cas, être jugée acceptable ou non, mais pour ce qui nous incombe, l'incertitude est trop grande et surtout, le % de racines récoltées dépend probablement du type du sol et de son état, donc le résultat n'est pas généralisable. Les racines fines et moyennes étant fragiles, elles sont arrachées du système racinaire lors de l'extraction assez brutale. De plus, s'il est facile de suivre dans le sol les racines grosses qui ont été coupées lors de l'extraction, ce n'est pas le cas des racines fines. Une autre étude en cours (Khac, 2012) procède dans l'ordre inverse : les caféiers sont d'abord excavés, puis une fosse est délimitée pour pouvoir mesurer la biomasse perdue dans un volume donné.

La méthode des cartes d'impacts montre des résultats intéressants mais peu précis (moins de 50% de prédiction). Néanmoins, le résultat a une portée plus générale et la méthode est facile et rapide à mettre en œuvre (1 homme par jour par fosse).

Les équations allométriques pour prédire des biomasses sont généralement très satisfaisantes pour les futaies forestières (Kenzo, 2009; Saint André et al., 2005; Segura et Kanninen, 2006) et permettent d'estimer des biomasses à partir de mesures simples et rapides, ceci semble se vérifier pour notre étude malgré la complication inhérente à celle-ci (plusieurs plantes semées par emplacement, élagage fréquent). Il nous reste à compléter le travail sur l'ensemble des classes de circonférence. Nous constatons également que les régressions linéaires ont des ordonnées à l'origine significativement différentes de 0, sauf pour deux d'entre elles (équation cep/aire au collet et équation racines grosses/aire au collet). Il est probable donc que l'hypothèse de la compensation des émissions de racines par deux plantes voisines ne soit pas toujours vérifiée.

L'évaluation de NPP des racines pérennes devait se faire à l'aide des colliers dendrométriques, mais les premiers résultats se sont révélés douteux. Nous avons donc estimé NPP à partir d'une moyenne d'âge des caféiers de la parcelle (20 ans), bien que cet âge soit variable au sein de la parcelle. Une méthode adaptée de dendrochronologie (méthode des cernes) permettrait éventuellement d'estimer l'âge des caféiers que nous avons extrait. Les premières observations ont montré qu'il était bien possible de distinguer le nombre de cernes après un ponçage préalable et qu'il pouvait être en accord avec l'âge connu d'un caféier (12 ans, E. Khac, comm. pers.). Cependant, la difficulté réside dans le fait que, n'étant pas en système avec arrêt de végétation saisonnier, la démarcation des cernes reste difficile.

- Pour l'évaluation de la productivité des racines fines

Nous avons opté pour la méthode du sequential coring car elle permet d'avoir accès à la nécromasse des racines fines. Cependant toute la subjectivité qui réside dans le tri des racines mortes et vivantes amène beaucoup d'incertitudes. Des classes de vitalité de racines ont été établies à partir de techniques visuelles, chimiques et mécaniques (Vogt and al., 1998) pour trouver les racines mortes et vivantes, mais la plupart des études se basent sur des critères morphologiques : résistance, couleur, présence/absence de stèle (Persson, 2009; Persson et al., 2007; Vogt et al., 1998). De plus, si le temps d'excavation sur le terrain reste minimale, l'activité de tri au laboratoire est très chronophage. Cela peut aller de plusieurs dizaines de minutes à plusieurs heures, dépendant de la quantité de racines. Il est aussi souvent conseillé de combiner plusieurs méthodes afin d'en comparer les résultats (Clark et al., 2001): rhizotrons, minirhizotrons, carottes de recolonisation (ingrowth core), vitesse de décomposition des racines mortes (litter bags), isotopie, NIRS (spectroscopie infrarouge), etc.. Des mesures actuellement en cours sur minirhizotrons et rhizotrons à Aquiares seront bientôt disponibles pour l'analyse. La comparaison des méthodes permettra de valider ou non les observations du sequential coring. Quoi qu'il en soit, la distinction des racines fines vivantes ou mortes est un obstacle commun à toutes ces approches. Par exemple, il s'est avéré très difficile de reconnaître les racines mortes derrière la vitre des rhizotrons à Aquiares en particulier, sans pouvoir utiliser les critères tactiles (F. Charbonnier, pers. comm.).

Une autre incertitude liée au sequential coring est le choix de la méthode de calcul. Dans notre étude, nous utilisons deux méthodes, la decision matrix et la méthode max-min, les plus couramment utilisées. Les résultats ne montrent pas de différences importantes de NPP. Brunner et Jourdan ont synthétisé les résultats d'études menées sur la NPP dans des forêts européennes en comparant les deux mêmes méthodes de calcul : les valeurs de NPP sont doublées avec la méthode de decision matrix, en revanche cette dernière nécessite d'avoir accès à plus de variables d'entrée, notamment la nécromasse. Sachant que la nécromasse est entachée d'une grande incertitude parfois, notamment dans notre cas d'étude, on peut douter de l'intérêt de rajouter une variable qu'on ne sait pas bien évaluer dans l'équation.

Nous constatons qu'il n'y a pas d'effet distance à l'arbre sur la biomasse des racines fines sur 0-30 cm. Audebert n'observe pas non plus d'effet lié à l'ombrage des Erythrinées sur la biomasse et la croissance des rejets sur le même site d'étude (Audebert, 2011). Siles et Harmand n'avaient pas non plus observé d'effet de l'ombrage sur la biomasse de racines fines d'une plantation de caféier Arabica cultivé sous canopée de *Inga densiflora* (Siles and Harmand, 2010). Sur le cacao, cet effet ne semble à nouveau pas être significatif (Munoz and Beer, 2001). Cependant, dans notre cas, cet effet n'a été évalué que pendant 4 mois pendant la saison des pluies et nous attendons de confirmer cette affirmation à la fin des prélèvements. De plus, nous avons étudié les facteurs à partir d'un modèle simple, dans lequel nous n'avons inclus que les facteurs étudiés.

- Colonisation des racines fines par les nématodes

Le site d'étude est touché par les nématodes, dont témoigne la présence caractéristique de galles. Elles affectent notamment les racines fines. En Amérique centrale, les genres les plus communs sont *Pratylenchus* et *Meloidogyn* (Villain, 2002). Les dommages causés perturbent la nutrition minérale de la plante ainsi que la fourniture en eau, entraînant une croissance plus lente. Cela peut aller jusqu'à la destruction complète du système racinaire (Villain, 2002). Il semblerait que la productivité des cafés sur le site d'étude soit peu affectée par les nématodes, il n'y a d'ailleurs pas de nématicides appliqués. L'effet de ces nématodes n'a pas été évalué ici, mais on suppose qu'ils affectent très probablement la biomasse des racines fines ainsi que leur durée de vie. En général, nous avons négligé le facteur

d'herbivorie dans l'équation générale de la NPP, mais dans certains cas cela pourrait être préjudiciable

b. Comparaison de la biomasse et de la productivité du caféier avec d'autres études menées sur le caféier

Au Costa Rica sur sol comparable et à 1200m d'altitude (San Pedro de Barva), les impacts d'*Inga Densiflora* ont été évalués sur le développement végétatif de caféiers et ont comparé la biomasse de caféiers de 8 ans conduit en monoculture et en agroforesterie (Siles et Harmand, 2010). Les racines fines ont été évaluées à 100 cm de profondeur avec une tarière de 4 cm de rayon sur deux distances à l'arbre d'ombrage et deux distances au caféier. Ils évaluent la biomasse racinaire de la monoculture de café à près de 40% de la biomasse totale (35% dans notre étude, tableau 5), celle des racines fines est concentrée à 75% sur les 60 premiers cm (75% pour les 70 premiers centimètres dans notre étude). Ils estiment également que les racines grosses+pivot constituent 20% de la biomasse totale du caféier ; nous l'estimons leur contribution à la biomasse totale à 25%. Ces résultats convergent et confortent respectivement les deux études. En valeur absolue, ils obtiennent une biomasse de $4.7 \pm SD 1.3 t_{BM}.ha^{-1}$ dans le système agroforestier, racines d'*Inga* comprises et $4.1 \pm SD 1.7 t_{MS}.ha^{-1}$ dans la monoculture. Nous obtenons respectivement pour chacun des systèmes $1,7 \pm 1,34 SD t_{BM}.ha^{-1}$ et $2,08 \pm 1,75 SD t_{BM}.ha^{-1}$, sur 30 cm de profondeur avec la méthode de sequential coring. Si nous extrapolons nos résultats à la profondeur de 100 cm (environ 60% de racines fines sur 1 m) nous obtenons respectivement $2,23 t_{BM}.ha^{-1}$ et $3,46 t_{BM}.ha^{-1}$, (sans les racines d'érythrine), ce qui reste du même ordre de grandeur. L'information résolument nouvelle que nous apportons est la description du profil total, ceci jusqu'à 450 cm. A notre connaissance, cela n'avait jamais été fait encore.

Au Mexique, la biomasse de racines fines d'une plantation de caféiers de 24 ans sur sol limono argileux a été estimée entre $1.68 t_{MS}.ha^{-1}$ et $4,3 t_{MS}.ha^{-1}$ sur 110 cm (Garriz, 1979), avec une concentration de la biomasse des racines fines variant entre 58% à 78% de la biomasse de racines sur les 30 premiers centimètres. Nos résultats concordent avec ces estimations, avec une biomasse de $3.34 t_{MS}.ha^{-1}$, à partir des excavations des polygones de Voronoï sur 0-150 cm et une concentration variant entre 42% et 74% sur les 30 premiers centimètres.

Au Venezuela, la distribution racinaire d'une monoculture de café arabica de 25 ans à 1200 m d'altitude a été étudiée par des excavations en saison sèche où la biomasse des racines fines est la plus faible ; et par la méthode du sequential coring (Cuenca et al., 1983). Par la méthode des excavations, la biomasse racinaire totale est $14,9 t_{MS}.ha^{-1}$ sur 0-50 cm alors que nous obtenons deux fois moins ($7,4 t_{MS}.ha^{-1}$). Pour le sequential coring, la méthode utilisée pour le calcul est celle de Persson (positive increment, où toutes les différences positives de biomasse racinaire entre deux dates d'échantillon sont sommées). Les valeurs de NPP sont de $20 t_{MS}.ha^{-1}.an^{-1}$ pour une profondeur de 100 cm, ce qui nous semble être très excessif, nous obtenons $2.47 t_{MS}.ha^{-1}.an^{-1}$, soit un ordre de grandeur de moins. Les racines vivantes et mortes n'ont pas été séparées ce qui peut conduire à une surestimation de NPP.

c. Comparaison de la biomasse et de la productivité du caféier avec d'autres plantes pérennes tropicales

La biomasse souterraine peut représenter jusqu'à 30% de la biomasse aérienne (Cañellas Rey de Viñas and San Miguel Ayanz, 2000; van Noordwijk et al., 1996). La productivité des racines fines chez les plantes tropicales est très variable : chez le cocotier elle représente environ 20% de NPP (Navarro et al., 2008), chez l'hévéa, environ 30% (Chairungsee et al., 2008), chez le palmier à l'huile, environ de 33% (Dufrene, 1989) et elle est en moyenne de 30% chez arbres des forêts tempérées et plus généralement dans tous les écosystèmes terrestres (Jackson et al., 1997; Ostonen and Lohmus, 2005; Vogt et al., 1996). Dans notre

étude, les racines fines contribuent à 5% de la NPP totale, ce qui est relativement faible par rapport aux résultats cités ci-dessus qui oscillent plutôt entre 20% et 30%.

Au Costa Rica, une autre étude a été menée sur le cacao (Munoz and Beer, 2001) en agroforesterie sous canopée de *Cordia alliodora* pour une parcelle et *Erythrina poeppigiana* pour une deuxième parcelle. La biomasse des racines fines a été mesurée par prélèvement à la tarière et la productivité a été estimée avec la méthode ingrowth cores sur une profondeur de 15 cm. La NPP du cacao a été estimée à $0,26 \text{ t}_{\text{MS}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ avec *C. alliodora* (20% de la productivité totale du système) et $0,15 \text{ t}_{\text{MS}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ avec *E. poeppigiana* (17 % de la productivité totale du système) avec une biomasse variant entre $0,8 \text{ t}_{\text{MS}} \cdot \text{ha}^{-1}$ et $1,8 \text{ t}_{\text{MS}}$ selon les systèmes (racines des arbres d'ombrage comprises). La valeur de biomasse est du même ordre de grandeur que celles de notre étude ($0,9 \text{ t}_{\text{MS}} \cdot \text{ha}^{-1}$ sur les 10 premiers centimètres en moyenne par la méthode de sequential coring).

V. Conclusions et Perspectives

La méthode la plus optimale pour estimer la biomasse des racines pérennes serait la fosse de Voronoï, les cartes d'impacts et l'arrachage au treuil étant plus faciles à mettre en œuvre (temps, coût) mais beaucoup moins précises. Les relations allométriques établies montrent que la simple mesure du diamètre au collet des caféiers suffit à prédire la biomasse des racines pérennes et du cep, même dans ce cas de taillis élagué périodiquement. Nous avons accès à la biomasse du système racinaire et du cep à l'échelle de la parcelle entière et connaissons ainsi le stock de carbone souterrain. Pour NPP des parties pérennes, le défi est maintenant d'estimer rigoureusement l'accroissement annuel des parties pérennes afin d'affiner notre première estimation.

Les premières estimations de NPP de racines fines par la méthode de sequential coring semblent cohérentes avec les données de la tour à Eddy-corrélation puisque nous obtenons une NPP totale similaire entre les deux méthodes (tour/mesures de terrain). Mais ces résultats sont des estimations sur 5 mois alors que les calculs doivent se faire sur une année. Nous attendons également les résultats des analyses sur rhizotrons et minirhizotrons, méthodes complémentaires du sequential coring pour estimer l'accroissement annuel des racines fines.

Notre étude complète celle menée sur les parties aériennes et les résultats combinés offrent des perspectives intéressantes : il serait possible d'estimer le stock de carbone d'une plantation de caféier et d'évaluer sa NPP (donnant accès à GPP, en ajoutant des mesures sur la respiration), à partir de données biométriques (diamètre au collet, diamètre de la base des rejets, hauteur et âge des rejets).

Des études sont toujours en cours au Costa Rica pour évaluer l'allocation du carbone au sein de la plante entière du caféier et la variation des stocks de réserves, terme de la NPP qui a été jusqu'ici négligé dans l'équation, et viendra peut être précisé les estimations de NPP totale.

VI. Bibliographie

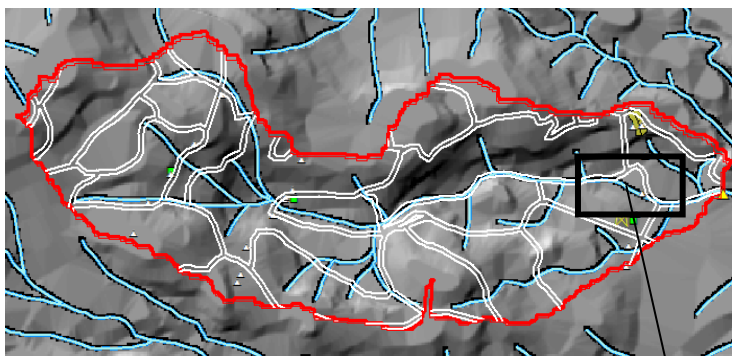
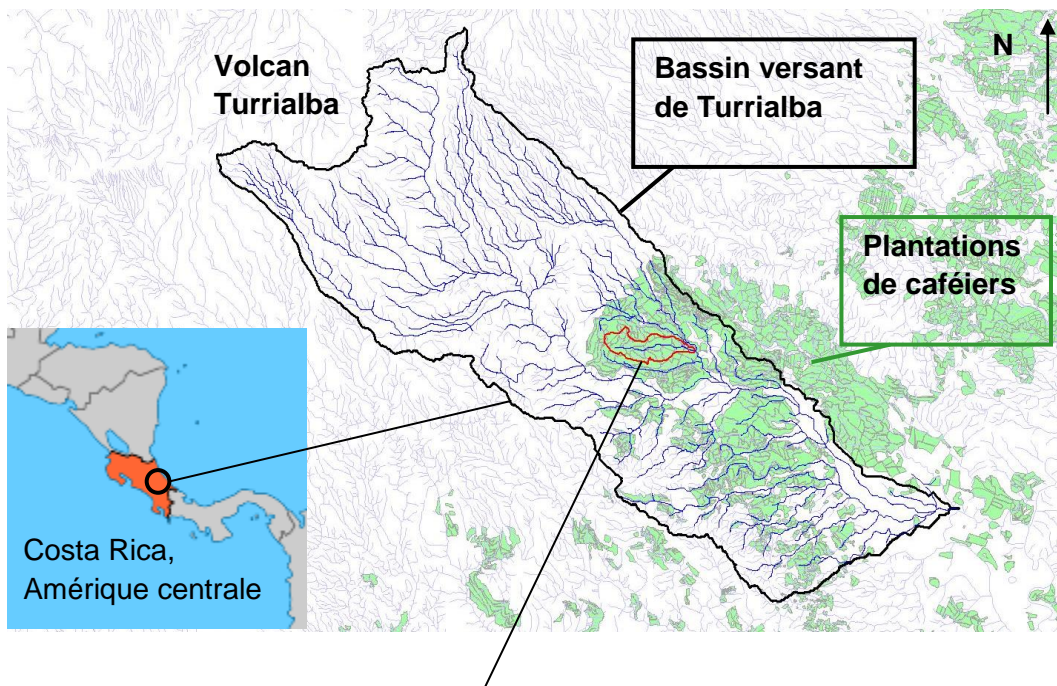
- Albrecht, A., and T. Kandji. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture ecosystem and environment* 99:15-27.
- Audebert, L. 2011. Productivité aérienne du café agroforestier : effets de l'ombrage et de l'âge des rejets, Master II. UHP Nancy I, Nancy, France.
- Cañellas Rey de Viñas, I., and A. San Miguel Ayanz. 2000. Biomass of root and shoot systems of *Quercus coccifera* shrublands in Eastern Spain. *Ann. For. Sci.* 57:803-810.
- Charbonnier, F. 2010-2013. Net Primary Productivity and C sequestration services of coffee-based agroforestry systems in Costa Rica., Université de Nancy I.
- Clark, D.A., S. Brown, D.W. Kicklighter, J.Q. Chambers, J.R. Thomlinson, J. Ni, and E.A. Holland. 2001. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications* 11:371-384.
- Cuenca, G., J. Aranguren, and R. Herrera. 1983. Root-Growth and Litter Decomposition in a Coffee Plantation under Shade Trees. *Plant and soil* 71:477-486.
- Dufrene, E. 1989. Photosynthèse, consommation en eau et modélisation de la production chez le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.), Université de Paris-Sud, Orsay, France.
- Fairley, R.I., and I.J. Alexander. 1985. Methods of calculation of fine roots production in forests. *Ecological interactions in Soil: Plants, Microbes and Animals.*:37-42.
- Garriz, P.I. 1979. Distribucion radicular de tres cultivares de *Coffea arabica* en un suelo limo-arcilloso. *Agronomie tropicale* 29:91-102.
- Gill, R.A., and R.B. Jackson. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist* 147:13-31.
- Gomez-Delgado, F. 2011. Modelling the hydrological behaviour of a coffee agroforestry basin in Costa Rica. *Hydrology and Earth system sciences*:369-392.
- Jackson, R.B., H.A. Mooney, and E.D. Schulze. 1997. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94:7362-7366.
- Jourdan, C., E. Silva, J. Goncalves, J. Ranger, R. Moreira, and J. Laclau. 2008. Fine root production and turnover in Brazilian Eucalyptus plantations under contrasting nitrogen fertilization regimes. *Forest Ecology and Management* 256:396-404.
- Kenzo, T. 2009. Development of allometric relationships for accurate estimation of above- and below-ground biomass in tropical secondary forests in Sarawak, Malaysia. *Journal of tropical ecologt*:371-386.
- Levillain, J. 2011. Is the simple auger coring method reliable for below-ground standing biomass estimation in Eucalyptus forest plantations ? *Annals Botany* 108:221-230.
- Montagnini, F., and P.K.R. Nair. 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61:281-295.
- Munoz, F., and J. Beer. 2001. Fine root dynamics of shaded cacao plantations in Costa Rica. *Agroforestry Systems* 51:119-130.
- Navarro, M.N.V., C. Jourdan, T. Sileye, S. Braconnier, I. Mialet-Serra, L. Saint-Andre, J. Dauzat, Y. Nouvellon, D. Epron, J.M. Bonnefond, P. Berbigier, A. Rouziere, J.P. Bouillet, and O. Roupsard. 2008. Fruit development, not GPP, drives seasonal variation in NPP in a tropical palm plantation. *Tree Physiology* 28:1661-1674.

- Ostonen, I., and K. Lohmus. 2005. Fine root biomass, production and its proportion of NPP in a fertile middle-aged Norway spruce forest: Comparison of soil core and ingrowth core methods. *Forest Ecology and Management* 212:264-277.
- Persson, H. 1978. Root dynamic in a young Scot pine stand in Central Sweden. *Oikos* 30:508-519.
- Persson, H. 2009. Belowground turnover rate and carbon sequestration of fine roots in forest soil "Root Research and Applications", Vienna, Austria.
- Persson, H., and al. 2007. Distribution of fine roots in forest areas close to the Swedish Forsmark and Oskarshamn nuclear power plants. *Svensk Kämbränslehantering AB*.
- Saint André, L., and al. 2005. Age related equations for above- and below- ground biomass of a Eucalyptus hybrid in Congo. *Forest Ecology and Management* 205:199-214.
- Segura, M., and Kanninen. 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforest system* 68:143-15.
- Siles, P., and J.M. Harmand. 2010. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforest system* 78:269-286.
- Snowdon, P., and e. al. 2002. Protocol for sampling tree and stand biomass.
- Vaast, P., J. Beer, C. Harvey, and J. Harmand. 2005. Environmental services of coffee agroforestry systems in Central America: a promising potential to improve the livelihoods of coffee farmers' communities, p. 35-39, *In* CATIE, ed. *Integrated Management of Environmental Services in Human-Dominated Tropical Landscapes*, Turrialba, Costa Rica.
- Van Noordwijk, M., G.J. Lawson, A. Soumare, J.J.R. Groot, and K. Hairiah. 1996. Root distribution of trees and crops: competition and/or complementarity, p. 319-364, *In* C. K. Ong and P. Huxley, eds. *Tree-crop interactions: a physiological approach*. CAB International, Wallingford UK.
- Villain, L. 2002. Integrated protection of coffee plantings in Central America against nematodes. *Research and coffee growing*:118-133.
- Vogt, K.A. 1998. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level. *Plant and soil*:71 - 91.
- Vogt, K.A., D.J. Vogt, P.A. Palmiotto, P. Boon, J. O'Hara, and H. Asbjornsen. 1996. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil* 187:159-219.

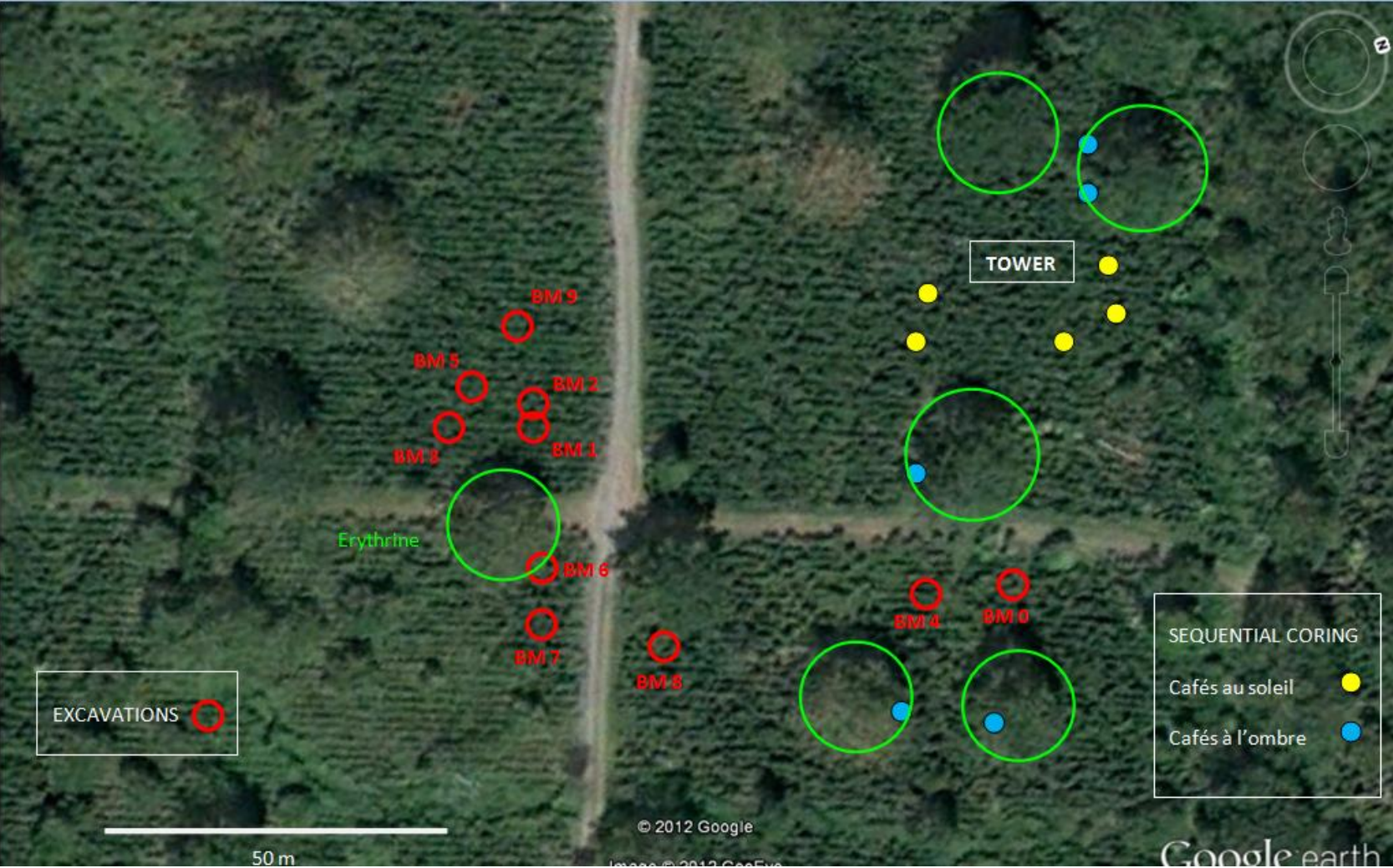
VII. Annexes

ANNEXE 1: Situation géographique du lieu d'étude	31
ANNEXE 2: Position des caféiers choisis dans les deux expérimentations sur la parcelle d'expérimentation	32
ANNEXE 3: Exemples d'emplacements de caféiers à une et deux souches.....	33
ANNEXE 4: Planche de photos, expérimentations allométrie	34
ANNEXE 5: Planche de photos, expérimentation sequential coring	35
ANNEXE 6: Schéma du dispositif expérimental sequential coring	36

ANNEXE 1: Situation géographique du lieu d'étude



ANNEXE 2: Position des caféiers choisis dans les deux expérimentations sur la parcelle d'expérimentation



ANNEXE 3: Exemples d'emplacements de caféiers à une et deux souches



Emplacement à un caféier, le cep se sépare en trois grosses branches



Emplacement comportant deux caféiers, l'un avec deux jeunes rejets (à droite) et l'autre avec trois rejets plus âgés

ANNEXE 4: Planche de photos, expérimentations allométrie



a)



b)



c)



d)



e)



f)

a) Quart de polygone de Voronoï délimité autour d'un caféier ; b) Fosse en cours d'excavation ; c) Tri des racines sur tamis ; d) Mesure du volume de cailloux ; e) Caféier en cours d'arrachement avec un treuil ; f) Compartiment racinaire du caféier excavé avec le treuil.

ANNEXE 5: Planche de photos, expérimentation sequential coring



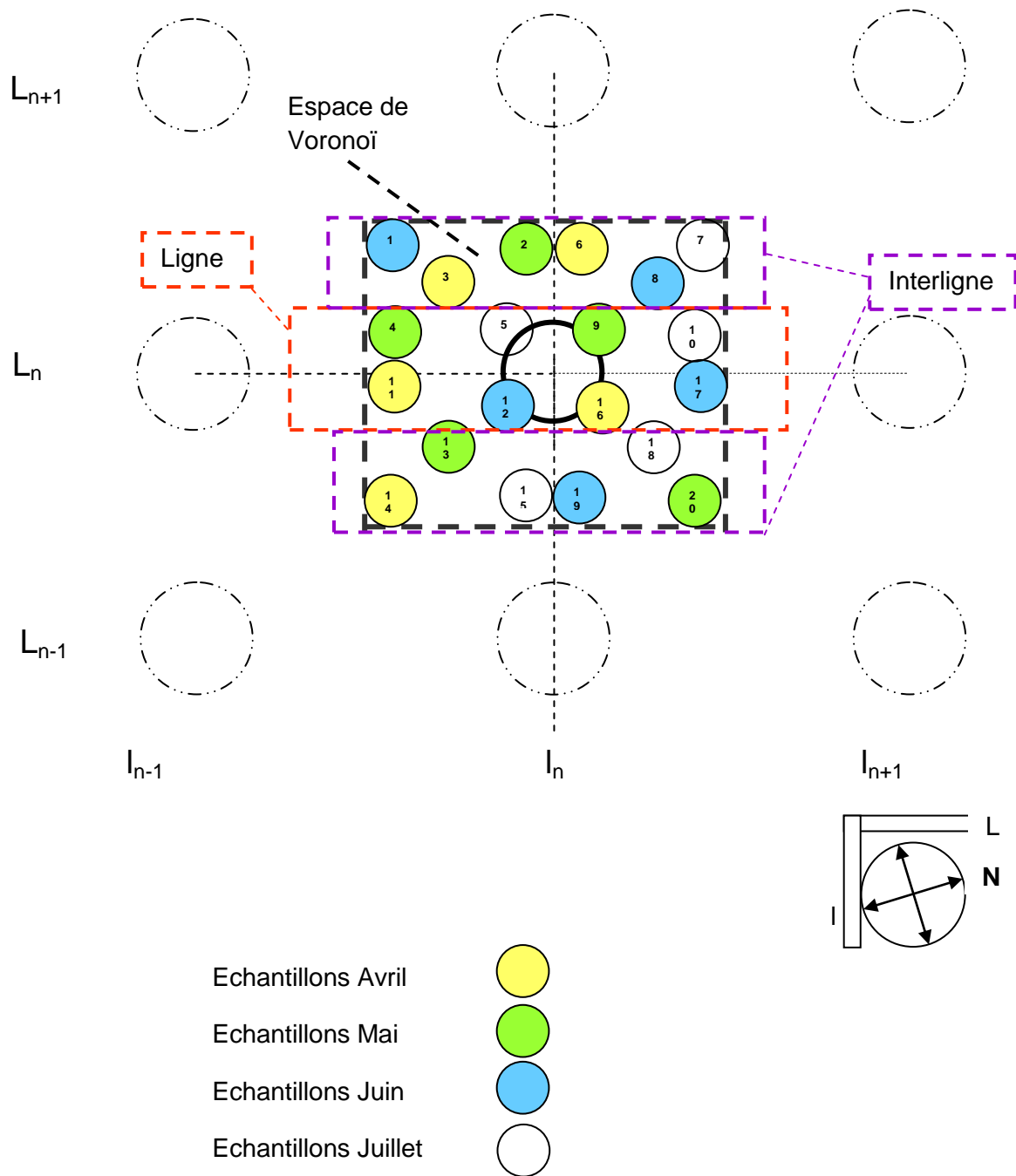
b) Fosses 0-450 cm dans l'interligne



Racine fine

a) Surface d'échantillonnage et premiers prélèvements à la tarière en Avril ; b) Installation pour le tri et le lavage des racines au laboratoire (bacs à eau, colonne de tamis) ; c) racines fines au dessus de la colonne de tamis ; d) passage des racines à la passoire pour les prélever individuellement ; e) détail de d)

ANNEXE 6: Schéma du dispositif expérimental sequential coring





Auteur : Elsa Defrenet Date de naissance : 07/04/88
Spécialité : Production Végétale et Ingénierie des agrosystèmes
Enseignant référent : Safya Menasseri
Nombre de pages : 29 Annexes : 10 Année de soutenance : 2012

Organisme d'accueil : CIRAD - UMR Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols & des Agro-écosystèmes ; Maitres de stage : Olivier Roupsard, Christophe Jourdan
Lieu du stage : CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza), Turrialba, COSTA RICA

Titre français : Evaluation de la biomasse et de la productivité souterraines du caféier dans un système agroforestier au Costa Rica

Titre anglais : Evaluating belowground biomass and net primary productivity (NPP) of coffee in an agroforestry system of Costa Rica

Résumé : La Productivité primaire nette (NPP) occupe une place centrale dans la compréhension du fonctionnement, de la productivité et de la séquestration de carbone des écosystèmes. Au Costa Rica, une étude préalable sur NPP aérienne de plantations de caféiers (arabica) cultivés à l'ombre d'Erythrine en système agroforestiers a été conduite et l'allocation de NPP aux différents compartiments aériens (feuilles, fruits, branches) est maintenant connue et quantifiée. Notre propre étude porte sur NPP du système racinaire et du cep en distinguant racines pérennes (pivot, racines grosses et moyennes) des racines fines ($\Phi < 2$ mm). Un défi important était d'évaluer la productivité souterraine dans un taillis fureté enraciné jusqu'à 450 cm (plusieurs souches par emplacement et élagage périodique des rejets). Nous avons développé des relations allométriques entre la biomasse des racines pérennes et l'aire au collet de caféiers. Le taux de renouvellement des racines fines, nécessaire au calcul de NPP, a été estimé par carottage séquentiel (30 cm de profondeur). La biomasse des racines fines a été comparée par deux méthodes : la fosse de Voronoï sur 150 cm et le carottage séquentiel sur 30 cm, extrapolé à 450 cm. La biomasse racinaire totale a été évaluée à $42 \text{ t}_{\text{MS}} \cdot \text{ha}^{-1}$ avec la méthode de Voronoï, soit 30% de la biomasse totale des plantes ; les racines fines ne représentaient que 3% de la biomasse totale du caféier. Nous avons obtenu une NPP de $1,45 \text{ t}_{\text{MS}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour les racines pérennes et une NPP entre $0,83$ et $1,27 \text{ t}_{\text{MS}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour les racines fines. Ni biomasse ni NPP des racines fines ne dépendaient de la présence des arbres d'ombrage. La NPP souterraine représentait ainsi 11% de la NPP totale des caféiers.

Abstract: Net primary productivity is a critical component for understanding functioning, productivity and carbon allocation of ecosystem. In Costa Rica, an ongoing study on aboveground NPP has been conducted on arabica coffee cultivated agroforestry system, under the canopy of Erythrina. Allocation of NPP to different above-ground compartments of the coffee tree (leaves, fruits, and branches) was already known and quantified. Our study focuses on belowground NPP: we distinguished perennial coffee roots (tap root, coarse roots and medium roots) from fine coffee roots ($\Phi < 2$ mm). The challenge was to evaluate the belowground productivity of this coppice, rooted down to 450 cm (several plants by location and periodic pruning of resprouts). We developed allometric relationships between coffee root biomass and the basal area of coffee for a depth of 150 cm, extrapolated at 450 cm. Fine root turnover, a component of NPP, has been estimated by sequential soil coring (30 cm deep). Biomass of fine roots was compared using two methods: Voronoï trench (150 cm) and sequential coring (measured for 30 cm, extrapolated at 450 cm). We extrapolated belowground biomass and NPP to the plot scale from an available inventory. We estimated root biomass at $42 \text{ t}_{\text{MS}} \cdot \text{ha}^{-1}$ with Voronoï trench, around 30% of the whole plant biomass. NPP was $1.45 \text{ t}_{\text{DM}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ for perennials roots and from 0.83 at $1.27 \text{ t}_{\text{DM}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ for fine roots. Neither fine roots NPP nor biomass depended on the distance to shade trees. Belowground NPP contributed to 11% of the whole plant NPP.

Mots clés: plantation de café, agroforesterie, biomasse racinaire, NPP, allométrie, carottage séquentiel, fosse de Voronoï

Key words : coffee plantation, agroforestry, root biomass, NPP, allometry, sequential coring, Voronoï trench

