

SIMIANE GRÉGOIRE VALENTINI

**ÉVALUATION DE LA SÉQUESTRATION DU CARBONE DANS DES
PLANTATIONS AGROFORESTIÈRES ET DES JACHÈRES ISSUES D'UNE
AGRICULTURE MIGRATOIRE DANS LES TERRITOIRES AUTOCHTONES DE
TALAMANCA, AU COSTA RICA**

Mémoire présenté

à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en biologie végétale
pour l'obtention du grade de Maître ès science (M.Sc.)

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2007

© Simiane Grégoire Valentini, 2007

Résumé

L'accroissement des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre est la cause d'importants changements climatiques. La présente étude visait à évaluer la séquestration du carbone dans trois systèmes agraires au Costa Rica. Cinq traitements ont été comparés : jachère jeune faisant partie d'un cycle d'agriculture migratoire, jachère âgée, système agroforestier (SAF) de cacaoyers sous ombrage mono-spécifique de *Cordia alliodora*, SAF de cacaoyers sous ombrage multi-spécifique et SAF de bananiers sous ombrage multi-spécifique. L'analyse démontre que les SAF de cacaoyers emmagasinent une quantité supérieure de carbone comparativement aux autres traitements. Environ 58 % du carbone total présent dans les unités expérimentales se retrouve dans le sol. Les arbres d'ombrage et les cacaoyers ont contribué à la majeure partie du carbone aérien vivant, soit 85 % en moyenne. Il ressort de cette étude que les SAF de cacaoyers sous ombrage constituent une solution de rechange avantageuse au système d'agriculture migratoire.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes et institutions suivantes, qui, à leur façon, ont fait en sorte que cette maîtrise puisse se réaliser.

Merci beaucoup à Alain Olivier qui a cru en moi et en ma capacité d'effectuer cette maîtrise dans des conditions si particulières. Grand merci à Anne Vanasse pour son soutien pédagogique mais surtout pour ses discussions enrichissantes et stimulantes.

Merci à toute l'équipe du CATIE qui m'a chaleureusement accueillie au Costa Rica et sans qui cette maîtrise n'aurait jamais existé. Merci à Eduardo Somarriba, Marylin Villalobos, Milena Segura, Hernán Andrade, Marco Otárola, Harold Viquez et tous les promoteurs qui ont marché des heures avec moi dans les Territoires Autochtones de Talamanca. Merci énormément aux nombreux agriculteurs de la région qui ont participé au projet.

Je tiens aussi à mentionner que cette maîtrise a pu être réalisée grâce au soutien financier des organismes suivants : le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), l'Office Québec-Amériques pour la jeunesse (OQAJ), le Bureau International de l'Université Laval et l'Ordre des Agronomes du Québec.

Finalement, le plus grand merci à Mathieu pour sa présence, sa patience et son soutien inconditionnel. Et merci à Nathan, alias le petit Gigoteux, qui m'a donné l'énergie pour terminer cette maîtrise dans le plaisir.

Table des matières

Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Listes des annexes	x
Liste des abréviations et acronymes	xi
<u>1 INTRODUCTION</u>	<u>1</u>
<u>2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</u>	<u>3</u>
2.1 Les changements climatiques	3
2.1.1 Le réchauffement planétaire et ses causes	3
2.1.2 Le Protocole de Kyoto	5
2.1.2.1 <i>Engagements des pays et mécanismes de flexibilité</i>	5
2.1.2.2 <i>Fonctionnement du mécanisme pour un développement propre et commerce du carbone</i>	6
2.2 Le potentiel de l'agroforesterie pour la séquestration du carbone	9
2.2.1 L'agroforesterie tropicale	9
2.2.2 La captation de carbone dans les systèmes agricoles et forestiers	11
2.2.2.1 <i>Systèmes agricoles</i>	11
2.2.2.2 <i>Systèmes forestiers</i>	12
2.2.3 La dynamique du carbone dans les systèmes agroforestiers tropicaux	13
2.3 Les systèmes agraires étudiés	15
2.3.1 L'agriculture migratoire	15
2.3.2 La culture du cacaoyer sous ombrage	17
2.3.3 La culture du bananier sous ombrage	20
2.4 La valorisation économique de la séquestration du carbone	22
<u>3 HYPOTHÈSE ET OBJECTIFS</u>	<u>23</u>
3.1 Hypothèse de recherche	23
3.2 Objectifs de recherche	23
3.2.1 Objectif général	23
3.2.2 Objectifs spécifiques	24
<u>4 MÉTHODOLOGIE</u>	<u>25</u>
4.1 Description des sites	25
4.1.1 Localisation de l'étude	25
4.1.2 Sélection des fermes	25
4.2 Description des systèmes d'utilisation de la terre	26
4.2.1 Jachères et production de cultures vivrières	26
4.2.2 Systèmes agroforestiers	27

4.3	Dispositif expérimental	27
4.3.1	Traitements	27
4.3.2	Analyse statistique	28
4.3.3	Méthodes d'estimation du carbone	28
4.3.4	Variables biophysiques étudiées	30
4.3.5	Description des unités expérimentales	30
4.4	Mesures réalisées dans les parcelles permanentes d'échantillonnage	32
4.4.1	Biomasse aérienne vivante	32
4.4.2	Biomasse aérienne morte	34
4.4.3	Carbone organique du sol	35
4.5	Évaluation de la séquestration du carbone dans les systèmes étudiés	35
4.5.1	Biomasse aérienne	35
4.5.2	Carbone aérien	42
4.5.3	Carbone souterrain	43
4.6	Évaluation de la séquestration du carbone en fonction de l'âge des jachères	43
4.7	Enquête socio-économique	44
4.7.1	Caractérisation des systèmes	44
4.7.2	Rentabilité économique des systèmes	44
5	RÉSULTATS ET DISCUSSION	47
5.1	La séquestration du carbone dans les systèmes étudiés	47
5.1.1	Le carbone total	47
5.1.2	La répartition du carbone total	50
5.1.3	La répartition du carbone aérien	54
5.1.3.1	<i>Le carbone aérien vivant</i>	54
5.1.3.2	<i>Le carbone aérien mort</i>	57
5.2	La séquestration du carbone en fonction de l'âge des jachères	60
5.2.1	Âge et cycles des jachères	60
5.2.2	Le carbone total	61
5.2.3	Le carbone aérien vivant	63
5.2.4	Le carbone aérien mort	65
5.2.5	Le carbone racinaire et le carbone du sol	66
5.3	La rentabilité économique des systèmes	67
5.3.1	Superficie des fermes et des systèmes liés à l'agriculture migratoire	67
5.3.2	Description des modèles de production	68
5.3.3	L'évaluation de la rentabilité économique des systèmes de culture	70
5.3.4	L'analyse de la rentabilité économique des systèmes de culture	72
5.3.5	La relation entre rentabilité économique et séquestration du carbone	74
5.4	Réflexions et préoccupations sur le commerce du carbone dans le cadre de projets MDP	75
5.4.1	Des préoccupations de nature scientifique	76
5.4.1.1	<i>Le changement d'affectation des terres : déplacement du problème ?</i>	76
5.4.1.2	<i>Le concept d'additionnalité des projets MDP</i>	76
5.4.2	Des préoccupations de nature socio-économique	77
5.4.2.1	<i>La permanence des crédits de carbone</i>	77

5.4.2.2	<i>Les coûts de transaction élevés des projets MDP</i>	78
5.4.2.3	<i>La variation des prix de vente des crédits de carbone</i>	78
6	<u>CONCLUSION</u>	79
7	<u>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	80
8	<u>ANNEXES</u>	89

Liste des figures

Figure 1	Prévisions de la variation de la température à l'échelle planétaire avec le CGCM	4
Figure 2	Contribution relative des émissions canadiennes de gaz à effet de serre de 2001 au réchauffement planétaire à venir	5
Figure 3	Système agroforestier de caféiers (<i>Coffea arabica</i>) sous ombrage de <i>poro</i> (<i>Erythrina poeppigiana</i>) récemment taillés au Costa Rica	11
Figure 4	Système d'agriculture migratoire au Costa Rica : champ de riz planté sur une jachère âgée brûlée	16
Figure 5	Culture de cacaoyers (<i>Theobroma cacao</i>) sous couvert arboré de <i>laurel</i> (<i>Cordia alliodora</i>) au Costa Rica	18
Figure 6	Couvert produit par le <i>Cordia alliodora</i> dans une parcelle agroforestière de cacaoyers au Costa Rica	19
Figure 7	Représentation d'un bananier avec ses rejets au moment de la fructification, et coupe longitudinale de la tige	20
Figure 8	Culture de bananiers (<i>Musa</i> spp.) sous couvert arboré mixte au Costa Rica	21
Figure 9	Schéma d'une parcelle permanente d'échantillonnage pour l'inventaire du carbone	31
Figure 10	Schéma de la seconde méthodologie d'évaluation de la végétation herbacée pour les jachères	34
Figure 11	Relation entre le poids sec de l'humus et sa hauteur. a) Données brutes recueillies au champ; et b) données transformées par logarithme naturel pour la construction du modèle	41
Figure 12	Quantité de carbone total emmagasinée dans les traitements étudiés	49
Figure 13	Répartition (a) et contribution relative (b) des quatre grandes composantes du carbone total dans les traitements étudiés	51
Figure 14	Répartition (a) contribution relative (b) des trois composantes du carbone aérien vivant dans les traitements étudiés	55

Liste des figures (suite)

Figure 15	Répartition (a) contribution relative (b) des trois composantes du carbone aérien mort dans les traitements étudiés	58
Figure 16	Distribution des jachères par groupe d'âge en 2005	61
Figure 17	Relation entre la quantité de carbone total emmagasinée et l'âge des jachères. a) Données brutes recueillies au champ; et b) moyennes par groupe d'âge pour la construction de la régression	62
Figure 18	Quantité de carbone emmagasinée dans les arbres d'ombrage (AO) (a) et dans le carbone aérien vivant (CAV) (b) en fonction de l'âge des jachères	64
Figure 19	Quantité de carbone emmagasinée dans l'humus jeune en fonction de l'âge des jachères	65
Figure 20	Quantité de carbone emmagasinée dans le système racinaire en fonction de l'âge des jachères	66

Liste des tableaux

Tableau 1	Quantité de carbone séquestrée dans la biomasse aérienne de différents systèmes d'utilisation de la terre	13
Tableau 2	Contenu relatif en carbone des sols de différents systèmes d'utilisation de la terre, comparativement au sol d'une forêt non perturbée	15
Tableau 3	Exigences écologiques du <i>Theobroma cacao</i>	17
Tableau 4	Modèles utilisés pour le calcul de la biomasse de certaines composantes présentes dans les PPE	37
Tableau 5	Contenu en carbone des espèces ligneuses prédominantes dans les PPE	42
Tableau 6	Résultats statistiques des contrastes pour le carbone total emmagasiné	49
Tableau 7	Résultats statistiques des contrastes pour les quatre grandes composantes du carbone total	51
Tableau 8	Résultats statistiques des contrastes pour les trois composantes du carbone aérien vivant	55
Tableau 9	Résultats statistiques des contrastes pour les trois composantes du carbone aérien mort	58
Tableau 10	Âge des jachères en 2005 et temps de repos des parcelles entre chaque cycle de production de cultures vivrières	60
Tableau 11	Superficie moyenne des fermes et de leurs systèmes liés à l'agriculture migratoire dans les communautés de l'échantillon	67
Tableau 12	Résultats des différents indicateurs de rentabilité financière pour les deux scénarios et les quatre systèmes de culture étudiés (par hectare et par année)	72

Liste des annexes

Annexe 1	Grandes étapes du développement de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et du Protocole de Kyoto	90
Annexe 2	Pays assujettis au Protocole de Kyoto	91
Annexe 3	Localisation géographique du site de l'étude	92
Annexe 4	Zone d'échantillonnage dans les Territoires Autochtones de Talamanca	93
Annexe 5	Caractéristiques des parcelles de jachères échantillonnées	94
Annexe 6	Formulaire de prise de données pour l'estimation de la biomasse présente dans les PPE	95
Annexe 7	Liste des espèces ligneuses rencontrées dans les PPE et formules utilisées pour calculer leur biomasse aérienne	96
Annexe 8	Formulaire de l'enquête socio-économique	101
Annexe 9	Liste des informateurs clefs rencontrés	108
Annexe 10	Informations supplémentaires recueillies auprès des informateurs-agriculteurs clefs	110
Annexe 11	Résultats obtenus pour la séquestration du carbone dans les traitements étudiés	113
Annexe 12	Valeurs de F calculées pour les analyses statistiques effectuées	114
Annexe 13	Images de jachères illustrant la difficulté de localiser la composante souche dans les PPE	122
Annexe 14	Détails des coûts et bénéfices associés aux différents systèmes étudiés pour un hectare en culture	123
Annexe 15	Coûts et bénéfices de la production de cacao et de banane échelonnés sur un cycle de 20 ans	127

Liste des abréviations et acronymes

AOC	Arbres d'ombrage et cacaoyers
AR	Petits arbres issus d'une régénération naturelle
AS	Arbres tombés au sol
CAM	Carbone aérien mort
CATIE	Centre de Recherche et d'Enseignement en Agronomie Tropicale (<i>Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza</i>)
CAV	Carbone aérien vivant
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (ou UNFCCC pour <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>)
CGCM	Modèle de circulation général canadien (<i>Canadian General Circulation Model</i>)
CH ₄	Méthane
CO ₂	Dioxyde de carbone
CR	Carbone racinaire
CS	Carbone organique du sol
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine (130 cm)
GES	Gaz à effet de serre (soit CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC et SF ₆)
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (ou IPCC pour <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
H	Humus jeune
MDP	Mécanisme pour un développement propre (ou CDM pour <i>Clean Development Mechanism</i>)
N ₂ O	Oxyde nitreux

Liste des abréviations et acronymes (suite)

PED	Pays en développement
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement (ou UNEP pour <i>United Nations Environment Programme</i>)
PPE	Parcelle permanente d'échantillonnage
S	Souches
SAF	Système agroforestier
URCE	Unité de réduction certifiée des émissions (générée par l'intermédiaire du MDP) (ou CERs pour <i>Certified Emission Reductions</i>).
VH	Végétation herbacée

1 Introduction

L'accroissement des concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère est maintenant reconnu pour être la principale cause des changements climatiques qui, selon plusieurs études, se traduiront par une augmentation de la température terrestre et de la fréquence d'événements météorologiques extrêmes, ainsi que par une élévation du niveau des océans (Boer et al., 2000). Afin de diminuer les coûts des engagements des pays industrialisés, le Protocole de Kyoto s'est doté d'un mécanisme de flexibilité, appelé le mécanisme pour un développement propre (MDP), permettant d'instaurer un marché mondial du carbone (CCNUCC, 2005). Cette réalité entraîne un intérêt grandissant pour les projets de séquestration du carbone basés sur des espèces ligneuses qui emmagasinent dans leur biomasse, via la photosynthèse, une quantité considérable de cet élément (Montagnini et Nair, 2004). Les augmentations de captation les plus importantes ont lieu lorsque l'on passe d'un système à faible biomasse (cultures annuelles, prairies, jachères) à un système basé sur les arbres (Palm et al., 2000). L'agroforesterie possède donc un potentiel très élevé dans un contexte où le carbone séquestré offre un revenu supplémentaire aux agriculteurs (Dixon, 1995). Ces derniers pourraient donc profiter d'une prime qui les encouragerait à modifier l'utilisation de leur terre pour se diriger vers des systèmes plus durables, captant plus de carbone et rentables économiquement.

Parallèlement à cela, il est reconnu qu'une part considérable des émissions de GES est attribuable à l'agriculture migratoire (ou sur brûlis), système très répandu dans les zones tropicales (Ministère de l'environnement du Canada, 2005). Ce dernier consiste à alterner la production de cultures vivrières avec une période plus ou moins longue de repos de la terre (appelé jachère) (MAE et al., 2002). En raison de ses impacts environnementaux élevés (libération de GES, dégradation des sols, etc.), de nombreuses recherches et projets tentent de lui trouver des systèmes de culture de rechange plus durables. Les incitatifs financiers générés dans le cadre du MDP permettraient peut-être aux producteurs de changer leurs modes d'utilisation de la terre. La question est donc de savoir s'il est avantageux pour l'agriculteur d'abandonner la production de cultures vivrières pour la convertir en systèmes agroforestiers ou en forêts secondaires et ainsi recevoir un paiement pour la vente du

carbone. La réduction éventuelle des superficies faisant partie d'un cycle d'agriculture migratoire, permettrait d'augmenter la couverture en espèces ligneuses et de réduire l'émission de carbone causée par le brûlis et l'abattage des forêts.

La présente étude porte sur l'évaluation de la captation de carbone dans trois systèmes agraires des Territoires Autochtones de Talamanca au Costa Rica. L'objectif du projet est de vérifier si le système agroforestier (SAF) de cacaoyers sous ombrage est une pratique plus avantageuse ou lucrative que le SAF de bananiers sous ombrage comme solution de rechange durable à l'agriculture migratoire dans un contexte de marché mondial du carbone. L'étude s'insérait dans un programme du Centre de Recherche et d'Enseignement en Agronomie Tropicale (CATIE).

Le mémoire de maîtrise présentera donc en premier lieu une revue bibliographique afin de décrire le contexte général dans lequel s'inscrit l'étude. Les hypothèses et objectifs de recherche seront ensuite présentés, ainsi que la méthodologie utilisée. Suivra ensuite une présentation des résultats obtenus et une discussion sur ces derniers.

2 Revue bibliographique

La présente section dresse un portrait de l'état des recherches scientifiques concernant les concepts relatifs aux changements climatiques, la séquestration du carbone dans les systèmes agricoles, forestiers et agroforestiers, les systèmes agraires étudiés dans la présente étude et la valorisation économique du service environnemental de captation de carbone.

2.1 Les changements climatiques

2.1.1 Le réchauffement planétaire et ses causes

Une partie du rayonnement solaire qui atteint la Terre est réfléchi vers l'atmosphère sous forme de radiation infrarouge. Cette perte énergétique est contrée par un phénomène appelé l'effet de serre. Divers gaz présents dans l'atmosphère (CO_2 , N_2O , CH_4) permettent en effet d'intercepter et de conserver cette chaleur émise par la planète. Ce phénomène naturel est nécessaire à la régulation de la température à la surface du globe. Sans ce processus, on estime que la température moyenne de la Terre diminuerait de 33 degrés Celsius, passant de 15 à -18°C (Ministère de l'environnement du Canada, 2005). Cependant, l'équilibre naturel peut être perturbé par des activités anthropiques. C'est ce que les scientifiques ont remarqué depuis l'accroissement de l'industrialisation au cours des années 1900.

En effet, les niveaux de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère sont passés de 280 ppm dans la période préindustrielle à 367 ppm en 2000, soit une augmentation de 31 %. Cet accroissement des émissions de gaz à effet de serre (GES) par les activités de l'homme a eu comme effet d'augmenter très rapidement la température moyenne mondiale depuis 1860 (Figure 1) et d'amorcer ainsi des changements climatiques (Boer et al., 2000). Or, les prévisions, si aucune action n'est prise, sont alarmantes : doublement de la concentration (550 ppm) à la fin du 21^e siècle (GIEC, 2001). Selon le Modèle de circulation générale canadien (CGCM), une augmentation de $3,5^\circ\text{C}$ à la surface de la planète serait à prévoir lors du doublement de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère vers 2100 (par

rapport aux observations des années 1980) (Ministère des ressources naturelles du Canada, 2004).

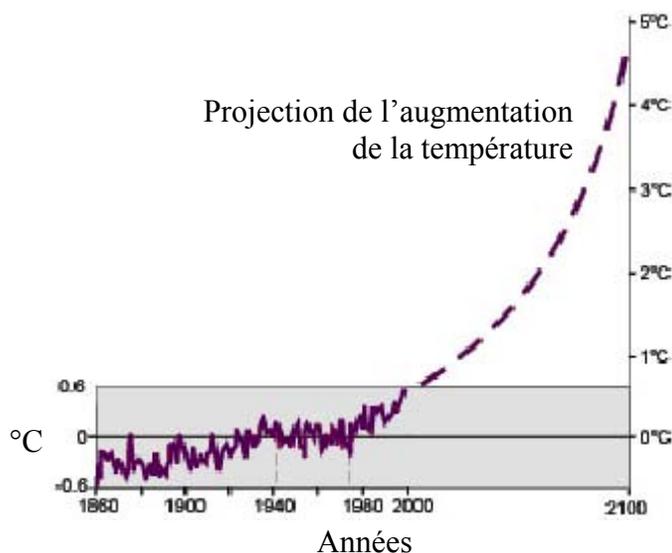


Figure 1. Prévisions de la variation de la température à l'échelle planétaire avec le CGCM

Source : Ministère des ressources naturelles du Canada, 2004

Le dioxyde de carbone (CO_2) est relâché dans l'atmosphère lors de l'utilisation de combustibles fossiles, de la décomposition de la matière organique par les microorganismes (respiration) et de la déforestation. Les sources agricoles d'azote comme les engrais et les fumiers sont la principale cause d'émission d'oxyde nitreux (N_2O). Le méthane (CH_4), pour sa part, provient en grande partie des ruminants et des surfaces inondées comme les rizières (Ministère de l'environnement du Canada, 2005). Le méthane est vingt et une fois plus efficace que le gaz carbonique pour capter les radiations; quant à l'oxyde nitreux, il l'est trois cent dix fois plus (Alberta Environmentally Sustainable Agriculture Council, 2001). Cependant, les émissions de CO_2 sont beaucoup plus importantes en proportion que celles des autres gaz (Figure 2).

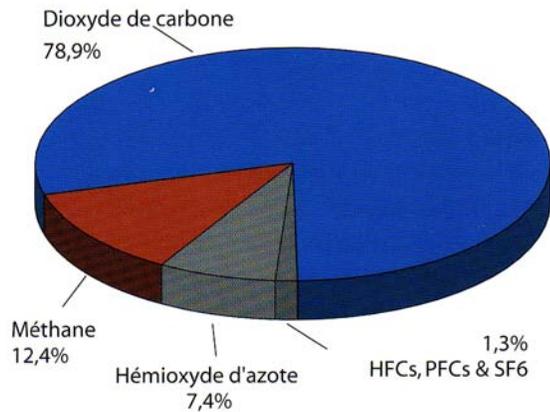


Figure 2. Contribution relative des émissions canadiennes de gaz à effet de serre de 2001 au réchauffement planétaire à venir
 Source : Ministère de l'environnement du Canada, 2005

2.1.2 Le Protocole de Kyoto

2.1.2.1 Engagements des pays et mécanismes de flexibilité

Dans le contexte décrit précédemment, de nombreux pays ont décidé de poser des actions concrètes afin de contrer le processus de réchauffement planétaire enclenché. Cependant, lors de l'élaboration du Protocole de Kyoto en 1997, plusieurs pays industrialisés se croyaient incapables de rencontrer avant 2010-2012 l'objectif de réduction des émissions de GES, qui avait été fixé à 5,2 % en moyenne sous le niveau de 1990 (voir l'Annexe 1 pour un résumé des différentes étapes menant à la mise en vigueur du Protocole) (Miles, 2004). Afin de diminuer les coûts des engagements des Parties visées à l'Annexe 1¹ et d'intégrer la participation des Parties non visées à l'Annexe 1², le Protocole s'est doté de trois mécanismes de flexibilité, à savoir l'application conjointe (*Joint Implementation*), l'échange de droits d'émission et le mécanisme pour un développement propre (*Clean Development Mechanism*) (voir l'Annexe 2 pour une carte du monde présentant les pays

¹ Les Parties visées à l'Annexe 1 sont les pays industrialisés qui étaient membres de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) en 1992, plus les pays en transition sur le plan économique (comme la Russie et les pays baltes). Ces pays sont tenus d'adopter des mesures pour atténuer les changements climatiques et doivent donc rencontrer certains engagements avant 2010-2012 (CCNUCC, 2005).

² Les Parties non visées à l'Annexe 1 sont pour la plupart des pays en développement. Ils ne sont tenus qu'à présenter leurs inventaires annuels de GES (CCNUCC, 2005).

assujettis au Protocole de Kyoto). Ces mécanismes «visent à accroître le rapport coût-efficacité des mesures d'atténuation des changements climatiques en offrant aux Parties la possibilité de diminuer les émissions ou de renforcer les puits de carbone³ en prenant ces mesures à l'étranger plutôt que sur leur propre territoire» (CCNUCC, 2005).

En effet, les coûts d'implantation des mesures d'atténuation des émissions de GES varient considérablement selon la position géographique tandis que l'effet bénéfique pour l'atmosphère est le même quelque soit l'endroit où sont menées ces activités. Ces mécanismes permettent donc à un État d'obtenir des crédits d'émission et d'atteindre plus facilement ses objectifs de réduction. L'utilisation des mécanismes de flexibilité doit par contre être complémentaire à l'établissement de mesures nationales d'atténuation des émissions de GES. Ainsi, tout pays, entreprise, organisation non gouvernementale ou entité légale (sous réserve de l'accord de son gouvernement) peut prendre part aux mécanismes (CCNUCC, 2005).

Les pays assujettis à des objectifs de réduction interagissent avec différents États selon les mécanismes utilisés. Ainsi, les projets d'application conjointe se déroulent surtout avec des pays en transition économique, tandis que l'échange de droits d'émission se fait avec des pays visés par l'Annexe 1 qui sont parvenus à atteindre leur cible de réduction fixée dans le Protocole et génèrent des «surplus». Finalement, le MDP se réalise avec des pays en développement (PED).

2.1.2.2 Fonctionnement du mécanisme pour un développement propre et commerce du carbone

Le mécanisme pour un développement propre⁴ a donc pour objectif plus particulier d'aider les PED à parvenir à un développement durable tout en permettant aux pays industrialisés de remplir leurs engagements à moindres coûts. Il comprend aussi une composante

³ Tout processus, toute activité ou tout mécanisme, naturel ou artificiel, qui élimine de l'atmosphère un GES. On cite généralement comme puits de carbone les arbres, les plantes herbacées et les océans (GIEC, 2001).

⁴ Défini par l'article 12 du protocole de Kyoto (UNEP, 2004).

importante de transfert technologique du Nord vers le Sud. Ainsi, un pays industrialisé obtiendra des unités de réduction certifiée des émissions (URCE, mieux connues sous leur acronyme anglais CERs) s'il finance un projet dans un PED dans le cadre du MDP. Ceci lui fournira le temps nécessaire pour développer des systèmes permanents de réduction des émissions des GES sur son territoire (Ministère des ressources naturelles du Québec, 2003).

Les projets réalisés dans le cadre du MDP doivent générer des bénéfices réels, mesurables et à long terme, reliés à la mitigation des changements climatiques. De plus, ils doivent respecter une notion primordiale : l'«additionalité» (UNEP, 2004). Cela signifie que les activités effectuées doivent engendrer des effets additionnels qui n'auraient pas eu lieu sans le projet. Il devient ainsi nécessaire de bien décrire le scénario de référence qui permet de montrer cette additionalité. Le cycle d'un projet MDP se déroule généralement en 5 étapes (CCNUCC, 2005):

- 1) Élaboration des documents descriptifs du projet. La description du projet doit comprendre l'évaluation du niveau de référence, ou *baseline*, servant à mesurer l'impact du projet sur la réduction des émissions ou l'augmentation de l'absorption des GES. Elle doit aussi contenir les méthodologies de base, un plan de suivi et de surveillance (ou *monitoring*), une analyse des impacts environnementaux et la description des avantages nouveaux et/ou additionnels que devrait procurer le projet sur le plan écologique;
- 2) Validation par une Entité opérationnelle désignée (EOD);
- 3) Enregistrement officiel du projet par le conseil exécutif du MDP;
- 4) Vérification et suivi à intervalles réguliers par une autre EOD afin d'évaluer si le projet continue à rencontrer tous les critères;
- 5) Certification des réductions d'émission.

Les règles énoncées dans les Accords de Marrakech concernaient initialement uniquement les projets de réduction d'émissions de GES (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC et SF₆). Elles ont ensuite été complétées par l'ajout d'activités qui permettent le renforcement de l'absorption

du CO₂, telles que le boisement et le reboisement⁵. En effet, les végétaux jouent un rôle majeur dans le cycle de cet élément. Ils captent le CO₂ atmosphérique via la photosynthèse, en réémettent une partie lors de la respiration et emmagasinent le reste dans leur tissus (formation des constituants cellulaires) (Montagnini et Nair, 2004). Les arbres accumulent donc une quantité considérable de carbone dans leur biomasse. Voici une liste non exhaustive des diverses activités de mitigation et de séquestration éligibles au MDP (UNEP, 2005) :

- Technologies d'énergies renouvelables (ex. hydroélectricité);
- Amélioration de l'efficacité énergétique;
- Modification du type de combustible utilisé (ex. passage de l'utilisation du charbon au gaz naturel);
- Séquestration et destruction des émissions de méthane (ex. provenant de sites d'enfouissement des déchets ou de rizières);
- Réduction des émissions dues au secteur du transport;
- Réduction des émissions dues au secteur agricole;
- Boisement et reboisement.

Les URCE sont émises pour chaque tonne d'émissions réduite (exprimée en CO₂ équivalent⁶). Dans le cas de projets de boisement et de reboisement, des unités temporaires ou à long terme (URCE-t ou URCE-lt) pourraient être délivrées pour chaque tonne de GES absorbée. Puisque cette séquestration du carbone n'est pas définitive (les arbres vont éventuellement mourir ou être récoltés), ces unités expirent après un certain délai. Elles doivent donc être remplacées par des unités plus permanentes (CCNUCC, 2005).

⁵ La différence entre ces deux concepts repose essentiellement sur le laps de temps pendant lequel la terre n'a pas été couverte par une forêt. Le boisement consiste en la plantation d'une forêt sur des terres qui ne sont plus boisées depuis longtemps (ex. de 20 à 50 ans, ou même plus) et qui sont donc caractérisées par une autre affectation, telle l'agriculture. Le reboisement, quant à lui, s'effectue sur des terres forestières qui n'ont été converties que tout récemment à d'autres usages (GIEC, 2000).

⁶ Quelque soit le GES visé par le projet, le tout est ramené en CO₂ équivalent en fonction du pouvoir de forçage radiatif de chacun (1 pour le CO₂, 21 pour le CH₄ et 310 pour le N₂O).

Les URCE engendrées par les projets de MDP peuvent donc être vendues sur le marché international de carbone et être achetées par des pays ou entreprises afin de leur permettre d'atteindre leur cible. Il existe déjà en Europe un marché du carbone et les prix de vente variaient au mois de juillet 2006 autour de 16 € la tonne de CO₂ équivalent (Point Carbon, 2005a).

2.2 Le potentiel de l'agroforesterie pour la séquestration du carbone

Les projets de séquestration du carbone MDP les plus communs sont actuellement les plantations d'arbres (pour la production de bois ou d'énergie) et la régénération naturelle de forêts secondaires (Segura, 1999; UNEP, 2005). On voit cependant apparaître un intérêt grandissant pour les activités agroforestières. Ces dernières présenteraient le double avantage de capter du carbone tout en permettant la production de cultures agricoles (Montagnini et Nair, 2004). Voici une brève présentation de l'état des recherches sur la séquestration du carbone dans les systèmes agricoles, forestiers et agroforestiers.

2.2.1 L'agroforesterie tropicale

Avant de débiter, il est important de bien définir ce qu'on entend par agroforesterie. Ce terme, relativement récent dans le langage scientifique, réfère en fait à une pratique très ancienne. Elle consiste à agencer au moins une espèce ligneuse pérenne avec une production agricole, végétale ou animale (dans ce dernier cas, on parle alors généralement de pratique sylvopastorale) (Torquebiau, 1990). Les systèmes agroforestiers (SAF) sont caractérisés par des interactions significatives entre leurs diverses composantes. L'espèce ligneuse peut fournir un produit direct (ex. bois, fruits, écorce, fourrage, etc.) et/ou un produit indirect appelé service (Beer et al., 2003). Ce dernier peut être de nature écologique, économique et/ou social :

- Amélioration de la fertilité du sol et du microclimat;
- Lutte contre l'érosion hydrique et éolienne;

- Répression des plantes adventices et ravageurs;
- Protection de la faune (biodiversité);
- Séquestration du carbone;
- Garantie de prêt;
- Délimitation des terres, etc.

L'agroforesterie présente aussi l'avantage pour le producteur de diversifier ses revenus et assure ainsi une certaine stabilité face aux aléas climatiques et commerciaux (ex. fluctuation des prix des produits agricoles). Elle est donc considérée par de nombreux auteurs comme une solution aux problèmes de pauvreté et de dégradation de l'environnement dans les pays en développement (Nair, 1993).

Les zones tropicales des PED contiennent une plus grande diversité de systèmes agroforestiers que les régions tempérées en raison d'un climat qui permet la croissance d'un nombre plus important d'espèces végétales. Les principales pratiques agroforestières retrouvées dans les tropiques sont la culture sous couvert arboré (Figure 3)⁷, les jardins multi-étagés⁸, les jardins de case, la culture intercalaire ou en couloirs⁹ et les jachères améliorées (Nair, 1993; Oelbermann et al., 2004).

⁷ La composante arborescente constitue un étage supérieur recouvrant les cultures et procurant divers biens et services. Pratique courante pour la production de café et de cacao.

⁸ Associations multistrates de plusieurs espèces. Système très répandu en Indonésie.

⁹ Les haies arbustives sont émondées régulièrement et leurs résidus sont déposés au sol, dans les couloirs, afin de fertiliser les cultures s'y trouvant.



Figure 3. Système agroforestier de caféiers (*Coffea arabica*) sous ombrage de *poro* (*Erythrina poeppigiana*) récemment taillés au Costa Rica
Source : Grégoire Valentini, 2005

2.2.2 La captation de carbone dans les systèmes agricoles et forestiers

2.2.2.1 Systèmes agricoles

Les études concernant les systèmes agricoles et les changements climatiques se concentrent principalement sur la quantification des émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O) dues à la fertilisation azotée, à la décomposition de la matière organique, aux déjections animales, etc. (Dixon, 1995; Palm et al, 2000). Elles tentent aussi de proposer des techniques permettant de limiter la libération de ces gaz dans l'atmosphère (Alberta Environmentally Sustainable Agriculture Council, 2000; Lal, 2003).

Celles qui se penchent sur la captation de carbone sont dirigées essentiellement sur le potentiel des sols comme puits de carbone. En effet, les cultures agricoles étant rarement composées de matière ligneuse, elles ne présentent pas un fort potentiel de séquestration de carbone (Albrecht et Kandji, 2003; Jawson et al., 2005). Selon Sharrow et Ismail (2004), plus de 90 % du carbone emmagasiné dans les pâturages (sans arbres) en milieu tempéré est localisé dans la matière organique du sol. Lal et Bruce (1999) ont évalué le potentiel

mondial de séquestration du carbone dans les sols agricoles à 0,75 à 1,0 Mt C/année, soit l'équivalent de 50 % des émissions dues à la déforestation et aux autres activités agricoles.

De nombreuses recherches tentent donc d'évaluer les pratiques permettant d'améliorer la séquestration du carbone dans les sols agricoles via la protection et l'enrichissement de sa matière organique (ex. contrôle de l'érosion hydrique et éolienne, adoption de pratiques sans labour, gestion des résidus de culture, etc.) (Lal et Bruce, 1999; Ministère de l'agriculture et de l'agroalimentaire du Canada, 2003b). Plusieurs études arrivent aussi à la conclusion que l'introduction d'arbres sur les terres agricoles permettrait d'améliorer considérablement la séquestration du carbone (Wright et al., 2001; Sharrow et Ismail, 2004).

2.2.2.2 Systèmes forestiers

Les forêts jouent un rôle majeur dans le cycle global du carbone. La végétation et les sols forestiers emmagasinent environ 60 % du carbone terrestre total (Winjum et al., 1992). Il semble donc normal que le secteur de la foresterie ait retenu l'attention de nombreux chercheurs ces dernières années pour son potentiel dans l'atténuation des changements climatiques. Les stratégies d'intervention suivantes ont été retenues et étudiées (Schroeder et al., 1993; Mitchell Aide et al., 2000; Oelbermann et al., 2004) :

- Diminuer les émissions de GES en luttant contre la déforestation;
- Maintenir les puits actuels de carbone en protégeant les écosystèmes forestiers existants;
- Augmenter les superficies forestières par des activités telles que le reboisement (ou la reforestation) et la réhabilitation de terres dégradées ou abandonnées.

Selon Schroeder et al. (1993) la régénération naturelle des forêts en milieu tropical permet d'accumuler, sur une longue période de temps (plus de 50 ans), une quantité de carbone supérieure à celle des plantations d'arbres (195 versus 65 t C/ha). De plus, la première

approche présente l'avantage de ne pas demander des coûts d'investissements élevés (et l'endettement à long terme qui s'en suit) tout en permettant une récolte régulière et durable de produits ligneux. Cependant, les plantations d'espèces à croissance rapide offrent des rendements très élevés et des taux de fixation de carbone supérieurs sur de plus courtes périodes (Olschewski et Benítez, 2005). De plus, Silver et al. (2000) ont observé que les forêts tropicales s'établissant sur des terres agricoles abandonnées présentaient une accumulation de biomasse plus rapide que celles établies sur d'anciens pâturages (en raison probable d'une compaction des sols). Certains auteurs proposent d'adopter des pratiques agroforestières afin de diminuer les pertes de superficies forestières (Schroeder et al., 1993).

2.2.3 La dynamique du carbone dans les systèmes agroforestiers tropicaux

La capacité de séquestration du carbone est donc beaucoup plus élevée dans les systèmes agroforestiers et forestiers qu'agricoles, puisque la biomasse aérienne présente y est plus importante (Dixon, 1995; Palm et al., 2000; Albrecht et Kandji, 2003) (Tableau 1). Montagnini et Nair (2004) précisent que la quantité de carbone séquestrée est fonction des espèces d'arbres, des régions géographiques (climat, sol), des densités de plantation et de la gestion du système. Ils estiment que la captation de carbone dans une culture agroforestière de région humide se situe autour de 50 tonnes C/ha en moyenne.

Tableau 1. Quantité de carbone séquestrée dans la biomasse aérienne de différents systèmes d'utilisation de la terre

Système	Carbone séquestré (tonne/ha)
Forêt primaire	300
Forêt exploitée	100-200
Jachère longue (rotation de 25 ans)	88
Agroforêt (rotation 25-30 ans)	40-60
Plantation d'arbres	11-61
Jachère courte (< 5 ans)	5
Pâturage et prairie	3

Adapté de Palm et al., 2000

Dixon (1995) ajoute que l'agroforesterie présente un double avantage : augmenter la captation du CO₂ tout en diminuant l'émission de GES associée à la déforestation et à l'agriculture migratoire qui s'en suit. Selon lui, un hectare agroforestier fournit des biens et services équivalant à 5-20 ha de terres déforestées (agriculture migratoire). Les réflexions de Montagnini et Nair (2004) abondent dans le même sens : les systèmes agroforestiers ont un effet indirect sur la captation de carbone en diminuant la pression sur les forêts naturelles.

Roshetko et al. (2002) ont démontré que le système agroforestier de jardin de case en Indonésie pourrait contribuer grandement à augmenter la séquestration du carbone dans une région, tout en améliorant le niveau de vie des agriculteurs. Ils proposent de favoriser les systèmes à haute densité d'arbres, à longues rotations, et à limiter les espèces présentant une biomasse faible (comme les cocotiers et les bananiers).

En ce qui a trait à la proportion de la répartition du carbone dans les différentes composantes du système agroforestier, Alvarado et al. (1999) ont démontré, dans une expérience menée au Guatemala, que le contenu en carbone des arbres d'ombrage, des caféiers et des plantes herbacées était respectivement de 15,82, 7,21 et 0,23 tonnes C/ha. On remarque donc l'importance de la composante ligneuse dans la biomasse aérienne.

Selon Montagnini et Nair (2004), plus de la moitié du carbone absorbé par les plantes est dirigée vers le sol via la croissance des racines et leur décomposition, les exsudats racinaires, et la décomposition de la litière. Les résultats de Palm et al. (2000) laissent entrevoir qu'un SAF conserve une proportion plus importante de carbone dans le sol qu'un sol dénudé d'arbres (Tableau 2). Ils soulignent par contre que les efforts de captation de carbone en milieu tropical devraient se concentrer sur la biomasse aérienne et non sur les sols car, en 25 ans, les stocks de carbone dans la végétation peuvent augmenter de 50 t C/ha, comparativement à seulement 5 à 15 t C/ha dans les sols (le taux de décomposition de la matière organique du sol étant très rapide sous ces climats).

Tableau 2. Contenu relatif en carbone des sols de différents systèmes d'utilisation de la terre, comparativement au sol d'une forêt non perturbée

Système	Contenu relatif en carbone
Agroforêt	80-100 %
Pâturage	80 %
Longue alternance culture/jachère (rotation de 25-30 ans)	90-100 %
Courte alternance culture/jachère (< 5 ans)	65 %
Prairie dégradée	50 % et moins

Adapté de Palm et al., 2000.

2.3 Les systèmes agraires étudiés

La section suivante présente les trois systèmes agraires étudiés dans la présente recherche, soit l'agriculture migratoire, la culture du cacaoyer sous ombrage et la culture du bananier sous ombrage.

2.3.1 L'agriculture migratoire

L'agriculture migratoire est un système agricole connu sous plusieurs appellations : agriculture sur brûlis ou d'abattis-brûlis, *slash-and-burn* (en anglais) et *tumba-quema* (en espagnol). Dans son expression la plus simple, le paysan abat la forêt et extrait le bois d'intérêt, brûle les résidus au sol puis sème des cultures vivrières, telles que le riz, le maïs et le haricot (Figure 4) (MAE et al., 2002). Le feu permet d'éliminer les espèces concurrentes (mauvaises herbes et autres) et libère rapidement les nutriments contenus dans la biomasse sylvicole et herbacée. Cependant, selon Warner (1995), ces «nutriments se raréfient rapidement après le brûlis, probablement en raison du lessivage des sols et de l'érosion». Ainsi, au bout de quelques années (1 à 4 ans), les paysans se déplacent (d'où l'appellation d'agriculture migratoire) et le champ est laissé en jachère pour que l'emplacement retrouve sa fertilité. Il pourra éventuellement être utilisé de nouveau pour la production de cultures vivrières. La jachère peut donc se définir comme «l'état d'une parcelle de terre entre la récolte d'une culture et le moment de la mise en place de la culture

suivante. Elle se caractérise, entre autres, par sa durée, par les techniques culturales qui sont appliquées à la terre, par les rôles qu'elle remplit. [...] Elle peut durer de quelques mois à plusieurs années» (MAE et al., 2002).



Figure 4. Système d'agriculture migratoire au Costa Rica : champ de riz planté sur une jachère âgée brûlée

Source : Grégoire Valentini, 2005

Selon le MAE et al. (2002), les jachères courtes (quelques mois à quelques années) ne permettent pas de rehausser le taux de matière organique de manière significative. «Seule une jachère de très longue durée le permet à travers la constitution et la transformation biologique d'une végétation importante». Malheureusement, on remarque de plus en plus un retour en culture trop rapide, amorçant ainsi un processus de dégradation à long terme (la principale raison de ce phénomène étant l'augmentation démographique).

Les activités généralisées de culture sur brûlis dans les forêts tropicales du monde sont aussi responsables de la libération dans l'atmosphère d'une quantité considérable de carbone. Le Ministère de l'environnement du Canada (2005) estime que le changement d'affectation des terres (de forêt ou jachère à la production de cultures vivrières) injecte dans l'atmosphère entre 0,6 à 2,5 milliards de tonnes de carbone par année.

2.3.2 La culture du cacaoyer sous ombrage

Botanique et exigences du cacaoyer

Le cacaoyer, *Theobroma cacao* L., est un arbre de petite taille mesurant en moyenne cinq à sept mètres de hauteur. Il atteint son plein développement vers l'âge de dix ans. La longévité d'une plantation se situe entre trente et quarante ans (Wood et Lass, 1985). Les feuilles du cacaoyer ont une durée de vie moyenne d'environ un an, après quoi elles tombent au sol. Le Tableau 3 présente une brève description de ses exigences écologiques.

Tableau 3. Exigences écologiques du *Theobroma cacao*

Température	Limites recommandées : 23 - 35°C. Optimum pour la production de cabosses : 26 - 28°C.
Pluviométrie	1500 - 2000 mm/an permettent une bonne exploitation économique de l'arbre à condition que la saison sèche (< 100 mm/mois) ne dure pas plus de 3 mois.
Humidité atmosphérique	70-100 % Le cacaoyer doit être protégé des vents desséchants.
Lumière	Les exigences en lumière varient selon le stade physiologique du cacaoyer. Les jeunes plants ont besoin d'ombre (70 à 80 %) pour se développer tandis que les plants adultes performant bien en plein soleil.
Sol	Riche en matière organique (> 3,5 %) et en éléments minéraux. Bien aéré tout en retenant efficacement l'eau. Profondeur minimale de 1,5 m.
Vent	Grande sensibilité aux vents violents.

Adapté de Saint-Clair, 1989 et Mossu, 1990

Description du système

Avant la transplantation des jeunes cacaoyers (provenant d'une pépinière), le paysan doit établir un ombrage temporaire. Ce couvert est le plus souvent assuré par des plantes vivrières qui fournissent un revenu, chose très importante compte tenu du fait que l'établissement de la plantation est une opération coûteuse et sans retour monétaire rapide (Schroth et al., 2001). Les cultures les plus utilisées sont celles du bananier (*Musa* spp.), du pois d'Angole (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.), de la papaye (*Carica papaya* L.), du manioc (*Manihot esculenta* Crantz) et du maïs (*Zea mays* L.). Dans la région de Talamanca, on y plante principalement le bananier. Cet ombrage temporaire est essentiel puisque les jeunes cacaoyers sont très sensibles à une exposition directe au soleil, aux vents et à un déficit

hydrique. Pour un bon développement des plants, l'intensité du rayonnement solaire doit être réduite de 50 à 75 % (Mossu, 1990). Après 3 ou 4 ans, les cultures vivrières sont éliminées au profit des arbres d'ombrage. Diverses espèces sont utilisées en fonction des zones géographiques et des besoins des producteurs : *Cordia alliodora* (Ruiz y Pavón) Oken (Figure 5), *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook, *Leucaena leucocephala* Dewit, *Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud., *Inga edulis* Mart., etc. (Wood et Lass, 1985).



Figure 5. Culture de cacaoyers (*Theobroma cacao*) sous couvert arboré de *laurel* (*Cordia alliodora*) au Costa Rica

Source : Grégoire Valentini, 2005

Le principal arbre d'ombrage retrouvé dans les cacaoyères de Talamanca est le *Cordia alliodora*, ou *laurel* (en espagnol). Cette espèce à croissance rapide est utilisée principalement comme bois de construction et représente une valeur considérable pour l'agriculteur. Sa zone de distribution naturelle s'étend du nord du Mexique au nord de l'Argentine dans les forêts tropicales humides. L'arbre produit de grandes quantités de semences dispersées par le vent, ce qui lui confère une capacité de colonisation très élevée. Il peut mesurer jusqu'à 40 mètres de hauteur et sa cime projette peu d'ombre au sol, ne causant ainsi pas de préjudices au développement des cultures pérennes (Figure 6). Les feuilles du *laurel* tombent au sol deux fois par année, soit aux mois de mars et mai (CATIE, 1994).

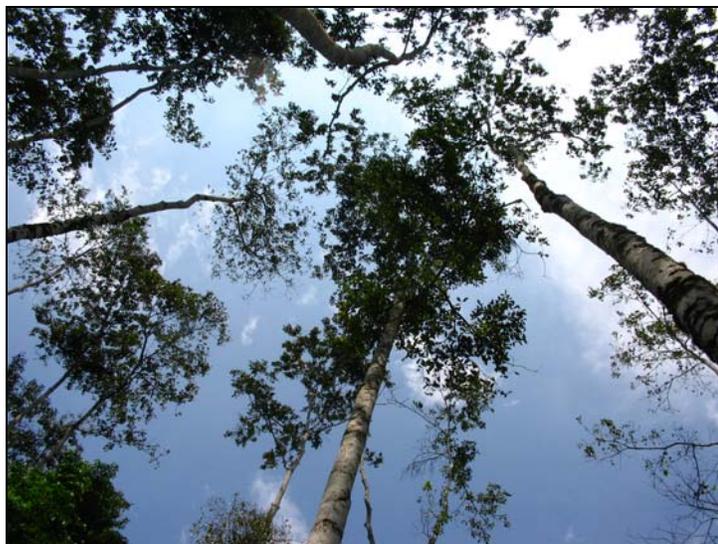


Figure 6. Couvert produit par le *Cordia alliodora* dans une parcelle agroforestière de cacaoyers au Costa Rica
Source : Grégoire Valentini, 2005

Avantages de l'ombrage

Le cacaoyer est originellement un arbre de sous-bois. Ainsi, sa culture traditionnelle a toujours été réalisée sous ombrage. Avec l'avènement de la production industrielle et de l'utilisation de fertilisants synthétiques, la culture du cacaoyer a évolué vers une monoculture en plein soleil. Selon Beer et al. (1998), une monoculture de cacaoyer en plein soleil, parfaitement entretenue, établie sur un sol très fertile et ne souffrant jamais de stress hydrique, produira plus qu'une plantation sous ombrage. Cependant, si certains facteurs sont limitants, alors la production sera supérieure dans un système agroforestier d'ombrage. De plus, la durée de vie d'une plantation est plus courte dans un système de plein soleil. L'ombrage conserve l'humidité du milieu et diminue la vitesse des vents, ce qui réduit les stress de la culture. Il maintient une couche de sol productive et une biodiversité plus importante qu'en monoculture, tout en contrôlant bien les mauvaises herbes. De plus, l'ombrage assure une diversification des revenus qui permet de contrebalancer les risques économiques que représente la monoculture de cacaoyer, en terme de chute des prix, de conditions climatiques défavorables et de ravageurs (Osei-Bonsu et al., 2002).

2.3.3 La culture du bananier sous ombrage

Le bananier, ou *Musa* spp., est parfois à tort considéré comme un arbre. C'est en fait une monocotylédone herbacée de grande taille. Son pseudo tronc, constitué par l'ensemble des feuilles enroulées sur elles-mêmes, atteint entre 1,5 à 8 mètres de hauteur selon les espèces. La tige est souterraine (rhizome) et produit des rejets d'où se dérouleront les feuilles. À maturité, une tige vraie se développe dans le faux tronc pour donner naissance à une inflorescence qui se transformera par la suite en fruits groupés en régime (Figure 7).

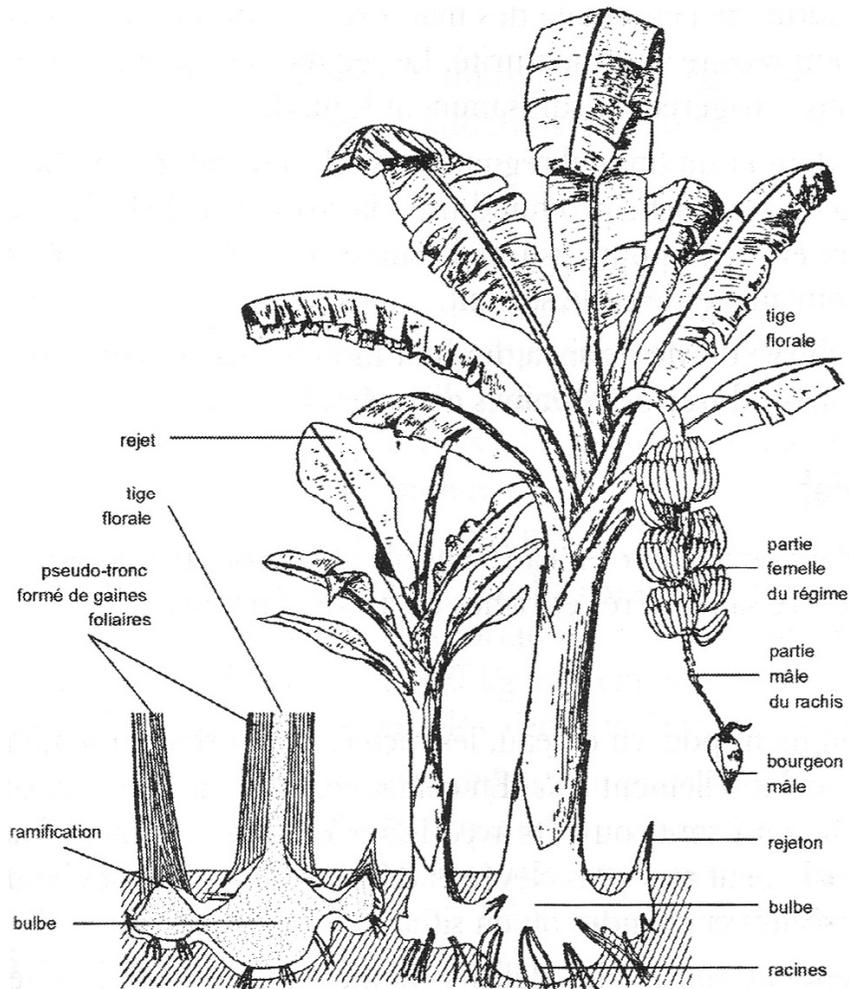


Figure 7. Représentation d'un bananier avec ses rejets au moment de la fructification, et coupe longitudinale de la tige
Source : MAE et al., 2002

Les cultivars commerciaux de banane sucrée sont à fruits parthénocarpiques¹⁰, raison pour laquelle on n’y retrouve pas de semences. La récolte a généralement lieu 10 à 12 mois après la sortie du rejet. Chaque rejet ne fructifie qu’une fois et meurt ensuite (MAE et al., 2002).

Cette plante est exigeante en eau, sensible aux basses températures et aux vents. Elle a besoin de peu d’engrais et supporte assez bien les effets d’ombrage. Le bananier est donc souvent associé à d’autres cultures en milieu familial (contrairement aux monocultures des productions commerciales). On le retrouve souvent entouré de haies brise-vent ou en culture en couloirs avec le *Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.. Dans la région de Talamanca, le bananier est cultivé sous des arbres d’ombrage de plusieurs espèces dispersés dans la parcelle (Figure 8). Cette pratique protège la plante contre les vents violents et desséchants, tout en permettant de conserver un bon niveau d’humidité en dessous des cimes. Elle diminue aussi les conditions favorables au développement de certaines maladies telles que la cercosporiose ou Sigatoka (*Mycosphaerella fijiensis*) (Umaña Rojas, 2002).



Figure 8. Culture de bananiers (*Musa* spp.) sous couvert arboré mixte au Costa Rica
Source : Grégoire Valentini, 2005

¹⁰ Il n’y a pas de pollinisation, ou reproduction sexuée.

2.4 La valorisation économique de la séquestration du carbone

Malgré la contribution des systèmes agroforestiers à la captation du carbone, la mise en place des SAF est coûteuse et leurs bénéfices se font sentir parfois seulement à long terme. Certaines études ont donc tenté d'évaluer les coûts associés à la séquestration du carbone dans de tels systèmes.

De Jong et al. (2000) ont effectué une étude au Mexique pour évaluer les incitatifs économiques qui stimuleraient de petits fermiers à adopter des mesures d'accumulation de biomasse comme l'agroforesterie. Pour ce faire, ils ont déterminé les coûts et les bénéfices associés aux systèmes de cultures actuels et à leurs alternatives agroforestières et forestières, et en sont venus à la conclusion que la méthode de séquestration de carbone la plus efficace en terme de retours financiers semble être celle de la gestion améliorée de forêts naturelles sur des terres communes (type d'agroforesterie).

Une expérience similaire a été menée par Shively et al. (2004) dans le but de mesurer le coût de la séquestration du CO₂ via une conversion de culture, leur permettant ainsi d'estimer le prix auquel devrait être vendu le carbone sur le marché international (entre 3,3 et 62,5 \$/t CO₂ selon la pratique culturale). Ils ont obtenu des coûts moins élevés dans les systèmes agroforestiers que dans les plantations d'arbres en monoculture. Ils expliquent ces résultats par la présence, dans les systèmes agroforestiers, de cultures qui assurent un revenu supplémentaire au paysan.

Ces résultats laissent donc présager un avantage compétitif des systèmes agroforestiers, en termes de séquestration du carbone et de retours financiers, comparativement à des systèmes agricoles ou des forêts.

3 Hypothèse et objectifs

Le présent projet de maîtrise s'insère dans un programme plus vaste du Centre de Recherche et d'Enseignement en Agronomie Tropicale (CATIE), situé au Costa Rica, dont le but général est de faciliter la transition des agriculteurs indigènes de la région de Talamanca vers une utilisation durable des terres en utilisant comme moyen l'implantation d'un marché de séquestration du carbone.

Il convient ici de préciser la raison pour laquelle cette étude se concentre uniquement sur le carbone. Palm et al. (2000) ont démontré que, dans des systèmes agraires tropicaux où aucune fertilisation azotée (tant de nature chimique qu'organique) n'est appliquée, les taux d'émission d'oxyde nitreux (N_2O) ne variaient pas selon les pratiques agricoles, agroforestières et forestières. Des conclusions similaires ont été obtenues pour le méthane (CH_4). Puisque les méthodes culturales présentes dans les Territoires Autochtones de Talamanca sont caractérisées par une utilisation presque inexistante d'engrais, la présente recherche porte donc exclusivement sur le carbone.

3.1 Hypothèse de recherche

Les systèmes agroforestiers de cacaoyers et de bananiers sous ombrage permettent une séquestration de carbone supérieure à celle des jachères issues d'une agriculture migratoire.

3.2 Objectifs de recherche

3.2.1 Objectif général

Comparer la quantité de carbone séquestrée dans des jachères faisant partie d'un cycle d'agriculture migratoire avec celle des systèmes agroforestiers (SAF) de cacaoyers et de bananiers sous ombrage dans les Territoires Autochtones de Talamanca, au Costa Rica.

3.2.2 Objectifs spécifiques

- 1) Évaluer la quantité totale de carbone emmagasinée dans des jachères jeunes (1 à 3 ans) et âgées (6 à 10 ans), des SAF de cacaoyers sous ombrage mono-spécifique (*Cordia alliodora*) et multi-spécifique et des SAF de bananiers sous ombrage multi-spécifique, par le biais de l'estimation des différentes sources de carbone présentes dans les parcelles.
- 2) Quantifier la contribution relative de chaque source de carbone dans les systèmes étudiés (en %).
- 3) Décrire la relation de la quantité de carbone emmagasinée (totale et provenant de différentes sources) en fonction du temps dans des jachères faisant partie d'un cycle d'agriculture migratoire (1 à 10 ans).
- 4) Développer un modèle permettant de relier la biomasse de l'humus jeune avec la hauteur de ce dernier afin d'utiliser ce même modèle dans toutes les parcelles pour estimer le carbone emmagasiné dans cette composante.
- 5) Caractériser le système d'agriculture migratoire pour en faire ressortir des indicateurs agronomiques et financiers : cycle de migration des cultures à l'intérieur des fermes, durée de rotation des jachères, superficies impliquées, coûts et bénéfices reliés à la production des cultures vivrières.
- 6) Caractériser la rentabilité économique des SAF en termes de coûts-bénéfices.

4 Méthodologie

4.1 Description des sites

4.1.1 Localisation de l'étude

Le projet s'est déroulé dans les Territoires Autochtones Bribri et Cabécar, situés dans le canton de Talamanca de la province de Limón, au Costa Rica (9°00'-9°50' N, 82°35'-83°05' O) (voir l'Annexe 3 pour une carte du Costa Rica). La réserve s'étend sur 62 000 ha. Selon la classification de Holdridge, les Territoires font partie de la zone des forêts tropicales humides (Tosi, 1969). La région est caractérisée par deux types de paysages : la vallée, constituée des alluvions formées par un important réseau hydrographique, et les montagnes, composées par du matériel sédimentaire et des roches intrusives. La température annuelle moyenne se situe entre 24 et 27 °C et la pluviométrie entre 1990 et 2740 mm/an (Borge et Villalobos, 1998). Les précipitations sont distribuées également tout au long de l'année, avec deux périodes un peu moins pluvieuses : les mois de février à avril et de septembre à octobre (Somarriba et al., 1995).

4.1.2 Sélection des fermes

L'étude a été réalisée dans la région des Territoires Autochtones de Talamanca caractérisée par un relief escarpé, entre la vallée et les montagnes. Cette zone est éloignée des infrastructures routières et commerciales, faisant en sorte qu'une agriculture migratoire y est encore pratiquée (voir l'Annexe 4 pour une carte des Territoires présentant la zone d'échantillonnage).

Les agriculteurs ont été choisis au hasard à l'aide de la base de données développée dans le cadre d'un projet antérieur du CATIE intitulé «Cacao biologique et biodiversité» («*Cacao Orgánico y Biodiversidad*»). L'unique critère de sélection était la présence d'au moins un des systèmes étudiés sur la ferme et bien évidemment l'intérêt et l'accord du producteur.

Au total, 33 exploitations agricoles provenant de quatre communautés (San Vicente, San Miguel, Sibuju et Shwabb) ont été échantillonnées.

4.2 Description des systèmes d'utilisation de la terre

4.2.1 Jachères et production de cultures vivrières

Bien que traditionnellement distribué dans toute la superficie des Territoires Autochtones de Talamanca, le système d'agriculture migratoire (alternance de production de cultures vivrières - céréales ou légumineuses - avec des jachères) se retrouve maintenant presque uniquement confiné aux zones montagneuses (Borge et Villalobos, 1998). L'hypothèse la plus probable qui expliquerait cette modification du système d'utilisation de la terre est l'amélioration du réseau routier dans la vallée et, par le fait même, l'accessibilité au marché (autant pour la vente des produits agricoles que pour l'achat des cultures vivrières essentielles à l'alimentation de la famille), qui a entraîné l'introduction de la monoculture de la banane plantain avec l'utilisation d'intrants chimiques.

Les cultures sont généralement semées sur de petites parcelles de moins de 0,5 hectare. Le riz (*Oryza sativa* L.) est planté entre les mois de février et d'avril lorsque les pluies sont les moins abondantes, permettant ainsi de bien brûler la végétation présente sur la parcelle (technique *quemado*). Il est récolté 5 à 6 mois plus tard. Le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), culture un peu moins fréquente, est quant à lui produit par la technique du *tapado* ou *slash-mulch*, souvent confondues avec le *slash and burn* (Thurston, 1994). Cette pratique consiste à désherber grossièrement à coups de machette une parcelle (où une végétation peu dense s'est installée) pour ensuite y semer à la volée le haricot. Sa culture dure environ 3 mois et peut être réalisée deux fois par année. Finalement, le maïs (*Zea mays* L.) est produit à l'aide des deux techniques. Les agriculteurs le sèment durant la saison sèche sur un brûlis (*quemado*), puis refont un ou deux cycles de production plus tard dans l'année avec la méthode *tapado*.

4.2.2 Systèmes agroforestiers

La production de cacao dans les Territoires Autochtones de Talamanca est réalisée sous ombrage et de façon biologique, c'est-à-dire sans utilisation d'intrants chimiques. Les interventions dans les parcelles se résument au désherbage et à la taille des arbustes. Les distances de plantation varient de 4 m x 4 m à 3 m x 3 m (soit des densités de 625 à 1111 cacaoyers/ha). Le *Cordia alliodora* est le principal arbre d'ombrage et il est présent dans les parcelles par régénération naturelle (le producteur choisit ensuite de conserver ou non certains individus). La culture du bananier se fait aussi sous ombrage et de façon biologique. Les distances de plantation varient aussi de 4 m x 4 m à 3 m x 3 m.

4.3 Dispositif expérimental

4.3.1 Traitements

La présente recherche a porté sur les cinq traitements suivants :

- 1) Jachère jeune (1 à 3 ans) faisant partie d'un cycle d'agriculture migratoire, c'est-à-dire où la culture précédente a été soit du riz, du maïs ou du haricot.
- 2) Jachère âgée (6 à 10 ans) faisant partie d'un cycle d'agriculture migratoire.
- 3) Système agroforestier de cacaoyers sous ombrage mono-spécifique : l'ombrage dans les parcelles est à prédominance de *Cordia alliodora*, qui forme entre 55 et 100 % du couvert (en terme de proportion par rapport aux autres essences retrouvées dans les sites).
- 4) Système agroforestier de cacaoyers sous ombrage multi-spécifique : l'ombrage est constitué seulement entre 0 et 15 % par du *Cordia alliodora* (le reste de l'espace étant occupé par un mélange de plusieurs espèces¹¹).
- 5) Système agroforestier de bananiers sous ombrage multi-spécifique.

¹¹ Se référer à l'Annexe 7 pour une liste complète des espèces d'arbres d'ombrage retrouvées dans les sites expérimentaux.

4.3.2 Analyse statistique

Puisque l'étude est basée sur cinq traitements qualitatifs structurés (il existe un lien entre eux) distribués selon un plan entièrement aléatoire, l'analyse statistique a porté sur les quatre contrastes suivants établis à priori :

- 1) Systèmes agroforestiers (SAF) versus jachères;
- 2) SAF de cacaoyers versus SAF de bananiers;
- 3) SAF de cacaoyers sous ombrage mono-spécifique (*Cordia alliodora*) versus SAF de cacaoyers sous ombrage multi-spécifique;
- 4) Jachères jeunes (1-3 ans) versus jachères âgées (6-10 ans).

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel SAS. Lorsque la variance n'était pas homogène et/ou les résidus n'étaient pas normaux, une transformation a été effectuée sur les données brutes : transformation racine carrée (\sqrt{x}), logarithmique ($\log_{10}(x+1)$) ou angulaire ($\arcsin(\sqrt{(x/100)})$). Les données sur lesquelles une transformation a été effectuée sont spécifiées dans la section 5 (Résultats et discussion).

4.3.3 Méthodes d'estimation du carbone

Pour évaluer la quantité de carbone séquestrée dans un écosystème, les scientifiques procèdent généralement par l'évaluation de la biomasse présente dans les parcelles puisque les plantes accumulent le CO₂ atmosphérique dans leurs constituants cellulaires (Alpizar et al., 1986; Beer et al., 1990; Alvarado et al., 1999; Ávila et al., 2001; Pallardy et al., 2003; Tufekcioglu et al., 2003; Sharrow et Ismail, 2004). Le GIEC (2001) définit la biomasse comme la «masse totale des organismes vivants se trouvant dans un périmètre ou un volume donné». Cette donnée est donc exprimée en kilogrammes (sur une base de poids sec). Pour obtenir la quantité de carbone total séquestré dans une parcelle, la biomasse est multipliée par le contenu en carbone des végétaux. Sous les recommandations de l'IPCC

(2003), la majorité des études utilisent une valeur de 50 % lorsque des données plus précises ne sont pas disponibles¹².

Certaines études se limitent à n'évaluer que quelques composantes de la biomasse aérienne (seulement les arbres, par exemple), tandis que d'autres prennent aussi en considération la matière organique contenue dans le sol. Une méthode, basée sur le modèle CO2FIX, incorpore même la notion de longévité des produits récoltés pour évaluer si le carbone est rapidement relâché dans l'atmosphère (Masera et al., 2003).

Dans la présente étude, la méthodologie d'estimation du carbone est basée sur les recommandations faites par l'IPCC en 2003 dans le «*Good Practice Guidance for Land Use, Land-use Change and Forestry*» (LULUCF) ainsi que sur l'ouvrage réalisé par MacDiken en 1997. Elle consiste à évaluer la biomasse présente dans plusieurs composantes (aériennes et souterraines), en plus de prendre en considération la matière organique du sol.

Il est possible d'estimer la biomasse à l'aide de deux approches : les méthodes directes ou dites destructives, et les méthodes indirectes (Segura, 1999). Les premières méthodes impliquent généralement la récolte au champ d'échantillons et parfois même de végétaux complets. Les secondes méthodes consistent, entre autres, à appliquer des modèles de régression, des tables de volume ou des formules géométriques sur des mesures faites sur le terrain. Les méthodes directes permettent d'atteindre un niveau de précision plus élevé mais présentent des coûts considérables. Le choix d'utiliser une méthode ou l'autre résulte donc d'un compromis entre le degré de fiabilité des résultats désiré, le temps disponible et le budget alloué au projet (MacDiken, 1997). Dans la présente étude, les deux types de méthodes ont été utilisés.

¹² Pour obtenir la quantité de CO₂ séquestré (les URCE sont vendues sur cette base), il faut multiplier la quantité de carbone par 3,667 (Olschewski et Benitez, 2005).

4.3.4 Variables biophysiques étudiées

Les variables suivantes ont été évaluées afin de déterminer la quantité totale de carbone séquestré dans les traitements (MacDiken, 1997 ; IPCC, 2003; UNEP, 2005) :

- Biomasse aérienne vivante : Arbres d'ombrage (tronc, branches, feuilles et fruits), cacaoyers, arbres issus d'une régénération naturelle mais encore petits et végétation herbacée.
- Biomasse aérienne morte : Arbres morts sur pied ou tombés au sol, souches et humus jeune.
- Biomasse racinaire.
- Carbone présent dans la matière organique du sol.

4.3.5 Description des unités expérimentales

De par la nécessité de faire un suivi du carbone dans le temps (exigence pour la vente de crédits d'émission de carbone), le CATIE a jugé qu'il était plus adéquat d'établir des parcelles permanentes d'échantillonnage (PPE) que des parcelles temporaires. Au total, 45 PPE (ou unités expérimentales) ont été établies, soit 9 répétitions par traitement.

En ce qui a trait aux jachères, les 18 PPE des traitements «jachère jeune» et «jachère âgée», auxquelles on a ajouté 8 PPE supplémentaires d'âge intermédiaire, ont servi à la construction d'une courbe de régression reliant le carbone emmagasiné à l'âge de la jachère (voir la section 4.6). On peut voir à l'Annexe 5 que les jachères âgées de 2 et 3 ans sont celles qui se retrouvent en plus grand nombre. Ceci provient du fait que lors de l'élaboration de la méthodologie, les chercheurs au CATIE possédant une expérience dans la région pensaient qu'on ne retrouverait en général pas de jachère âgée de plus de 4 ans. Cette supposition a été démentie lors de la phase terrain, puisqu'on a pu voir alors qu'il était facile d'identifier des jachères ayant jusqu'à 10 ans. Cependant, le temps de réaliser cette erreur, de nombreuses parcelles avaient déjà été établies sur des jachères jeunes. Si

l'expérience était à refaire, un meilleur équilibre dans l'échantillonnage serait nécessaire entre les jachères jeunes et les plus âgées.

Les PPE ont été installées dans des zones que les expérimentateurs considéraient représentatives du niveau de biomasse présent sur l'ensemble du système agricole du propriétaire, et loin des bordures pour éviter les biais. Neuf PPE ont été établies pour chaque traitement selon un plan entièrement aléatoire. Les parcelles étaient de forme circulaire avec un rayon principal de 17,84 m pour une superficie totale de 1000 m² (en rouge sur la Figure 9). Leurs centres ont tous été géoréférencés afin de faciliter un suivi ultérieur de l'évolution du carbone (*monitoring*). Les formulaires de prise de données pour l'estimation de la biomasse présente dans les PPE sont présentés à l'Annexe 6. La section suivante décrit en détails l'échantillonnage terrain de chaque composante du carbone total.

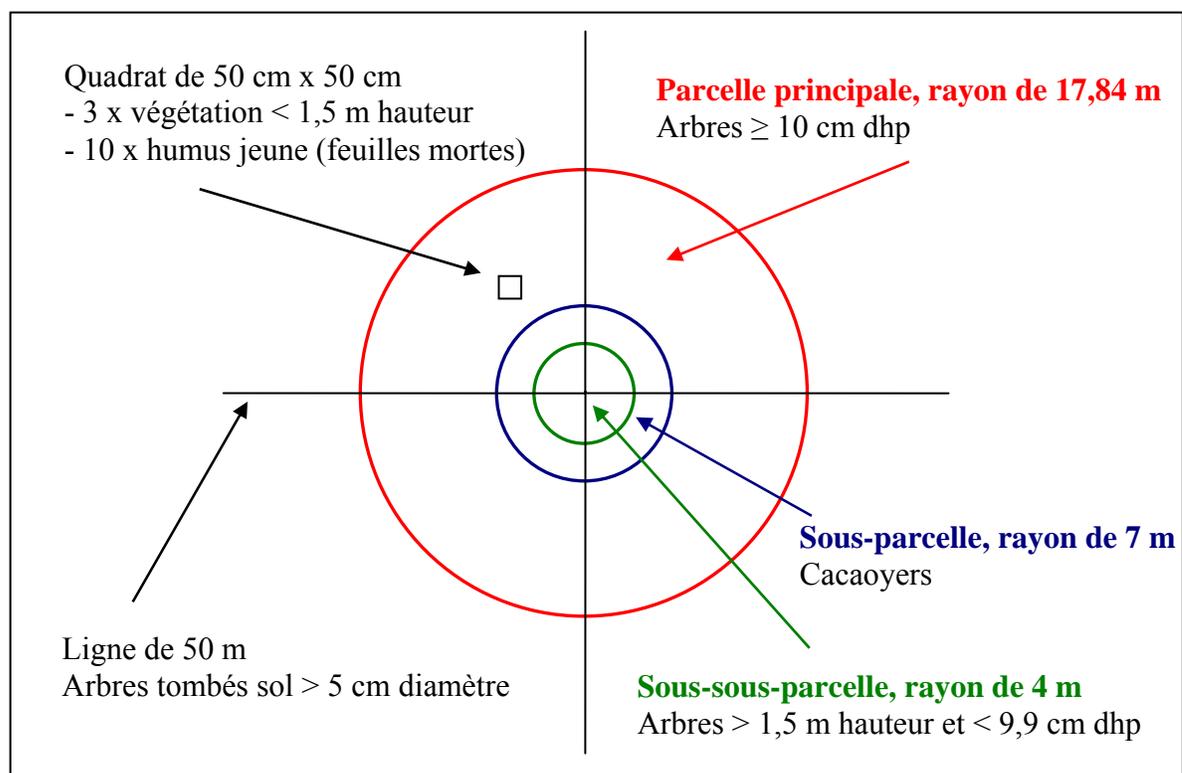


Figure 9. Schéma d'une parcelle permanente d'échantillonnage pour l'inventaire du carbone

4.4 Mesures réalisées dans les parcelles permanentes d'échantillonnage

4.4.1 Biomasse aérienne vivante

Arbres d'ombrage

Tous les arbres présentant un diamètre à hauteur de poitrine (ou dhp-130 cm) supérieur ou égal à 10 cm ont été mesurés dans la parcelle principale de 1000 m² (en rouge dans la Figure 9). Les variables suivantes ont été notées, soit l'espèce, le dhp, la hauteur totale, la hauteur commerciale (dans le cas d'espèces ayant une valeur commerciale) ainsi que l'état de l'arbre. Les instruments suivants ont été utilisés : ruban diamétrique, ruban métrique et clinomètre. Les arbres présentant deux troncs de dhp supérieur à 10 cm ont été considérés comme deux arbres lors de l'analyse de la biomasse.

Cacaoyers

Les cacaoyers ont quant à eux été mesurés dans une sous-parcelle de 7 mètres de rayon, partant du centre de la parcelle principale (en bleu dans la Figure 9). Les données récoltées ont été les suivantes : diamètre à 30 cm du sol (ici le dhp n'est pas utilisé car la fourche des branches se situe généralement en deçà de 130 cm), hauteur de la fourche, hauteur totale (mesurée à l'aide d'une tige télescopique), diamètre basal des branches, diamètre de la cime et état de l'arbre. La prise d'un aussi grand nombre de données a été rendue nécessaire par le fait qu'une équipe du programme de recherche du CATIE était chargée de développer un modèle allométrique pour la biomasse, et qu'on ne pouvait prévoir quelles variables fourniraient le meilleur ajustement du modèle.

Petits arbres issus d'une régénération naturelle

Une autre sous-sous-parcelle de 4 m de rayon (en vert dans la Figure 9) a permis de prendre en compte la régénération naturelle des arbres. Ainsi, tous les arbres mesurant plus de 1,5 m de hauteur et présentant un dhp inférieur ou égal à 9,9 cm ont été enregistrées (dhp, diamètre à 30 cm et hauteur totale).

Végétation herbacée

Afin d'évaluer la biomasse de la végétation herbacée¹³, un quadrat de 50 cm x 50 cm a été lancé trois fois au hasard dans la parcelle principale de 1000 m². La végétation inférieure à 1,5 m de hauteur ainsi délimitée a été coupée à l'aide d'une machette. Les trois échantillons ont été pesés au champ avec une balance digitale et un sous-échantillon a été envoyé au laboratoire du CATIE (*Laboratorio de análisis de suelos, tejido vegetal y aguas*) afin de déterminer son pourcentage de matière sèche.

Lors de la réalisation de l'échantillonnage terrain, les expérimentateurs ont réalisé que la méthodologie des quadrats s'avérait inadaptée aux conditions qui prévalaient dans les jeunes jachères. En effet, la végétation herbacée est si imposante dans ce système qu'il devient presque impossible que le quadrat retombe au sol lorsqu'on le lance. De plus, puisque cette composante représente la quasi totalité de la biomasse aérienne, il était important de s'assurer que sa mesure était précise. On a donc décidé de développer une seconde méthodologie (en parallèle de la première qui a été conservée) pour les jachères de moins de 10 ans. Dans un rectangle de 10 m x 12,5 m, pour une superficie de 125 m² (Figure 10), toute la végétation présentant un dhp inférieur à 10 cm a été séparée en 4 catégories, soit les Musacées (ou bananes sauvages qui colonisent rapidement les jeunes jachères), les plantes de 0 à 2 cm de diamètre, de 2 à 5 cm de diamètre et de 5 à 9,9 cm de diamètre. Cette végétation a été coupée puis pesée. Les résultats obtenus à l'aide de cette seconde méthode d'évaluation de la végétation herbacée ont pu être comparés avec ceux obtenus à l'aide de la première méthode. L'Annexe 5 présente les PPE de jachère où cette parcelle complémentaire a été établie.

¹³ Le carbone contenu dans les Musacées, ou bananiers, n'a pas été évalué puisque cette espèce est constituée en très grande proportion d'eau et qu'elle est abattue après chaque cycle de production (environ 1 an).

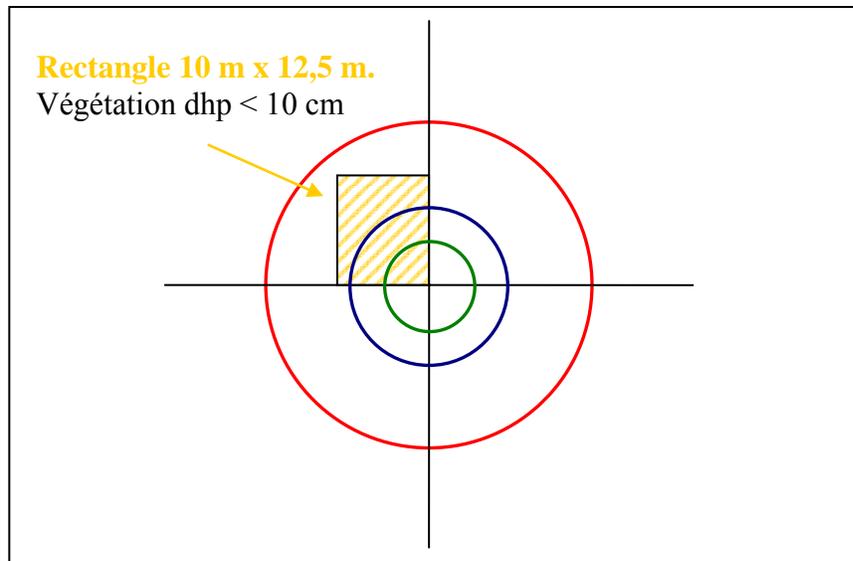


Figure 10. Schéma de la seconde méthodologie d'évaluation de la végétation herbacée pour les jachères

4.4.2 Biomasse aérienne morte

Arbres tombés au sol

Deux lignes perpendiculaires de 50 m se croisant au centre de la parcelle ont été tracées (Figure 9). Les diamètres des troncs ou branches tombés au sol et interceptant cette ligne ont été mesurés à l'aide d'un pied à coulisse. Seuls les diamètres supérieurs à 5 cm ont ensuite été pris en compte pour l'analyse. Pour chaque mesure, une appréciation de la densité du bois a été faite à l'aide d'un coup de machette : consistant (dur), intermédiaire et mou (pourri). Dix échantillons de chaque catégorie ont été pris afin d'attribuer une valeur quantitative à ces évaluations qualitatives, c'est-à-dire une densité en g/cm^3 . Cette approche est directement tirée des recommandations de l'IPCC (2003).

Souches

Toutes les souches présentes dans les parcelles principales de 1000 m^2 ont été recensées afin d'évaluer leur volume et ensuite leur biomasse. Dans le cas de souches cylindriques, la hauteur totale et le diamètre à mi-hauteur ont été mesurés. Dans le cas de souches coniques (présence de contreforts), en plus de la hauteur totale, les diamètres supérieurs et inférieurs ont été mesurés (Segura et Kanninen, 2002).

Humus jeune

Pour évaluer la biomasse de l'humus jeune (feuilles mortes, petites branches, écorce, fruits, etc.), il a été décidé de développer un modèle mettant en relation le poids sec (ou biomasse sèche) de l'humus et sa hauteur (mesurée en centimètres à l'aide d'une règle). Pour ce faire, le quadrat de 50 cm x 50 cm a été tiré au hasard 10 fois dans 12 PPE (2 PPE pour le SAF de bananier, 4 pour le SAF de cacaoyer et 6 pour les jachères). La hauteur de l'humus y a été mesurée et toute la biomasse ainsi circonscrite récoltée. Une fois pesés, les échantillons ont été envoyés au laboratoire pour y déterminer leur contenu en matière sèche. Ceci a permis d'obtenir un modèle relativement fiable entre la matière sèche et la hauteur de l'humus. Les prises de données subséquentes au champ consistaient à lancer 10 fois le quadrat dans chaque PPE et à évaluer uniquement la hauteur de l'humus (IPCC, 2003).

4.4.3 Carbone organique du sol

Dans chaque parcelle principale de 1000 m², cinq échantillons de sol ont été pris de façon entièrement aléatoire à l'aide d'une tarière afin de déterminer le pourcentage de carbone organique du sol (sur une profondeur de 40 cm). La méthode de Walkley et Black a été utilisée (combustion humide) à cette fin (Nelson et Sommers, 1996). Pour évaluer la densité apparente du sol, deux cylindres de sol de volume connu (70,658 cm³) ont été extraits de la couche 0-40 cm (UNEP, 2005).

4.5 Évaluation de la séquestration du carbone dans les systèmes étudiés

4.5.1 Biomasse aérienne

Arbres vivants

Lors des premières études sur la séquestration du carbone dans les forêts, les chercheurs utilisaient les données recueillies lors des inventaires forestiers (dhp, hauteur totale et hauteur commerciale) et déterminaient ainsi le volume des troncs à l'aide d'équations géométriques ou de tables de rendement. En combinant une valeur moyenne de densité de bois et un facteur d'expansion de la biomasse (relation entre la biomasse totale de l'arbre et

la biomasse du tronc), ils estimaient ensuite la biomasse totale de l'arbre (Fearnside, 1997; Brown et al., 1999). Ces évaluations permettaient d'obtenir une idée de la quantité de carbone présente dans un écosystème forestier, mais sans grande précision.

De nombreux auteurs recommandent maintenant de développer des équations de régression spécifiques pour les espèces les plus rencontrées dans les sites étudiés afin d'améliorer la fiabilité des résultats (MacDiken, 1997; IPCC, 2003). Les responsables du programme du CATIE, suivant cette tendance, ont donc décidé de produire leurs propres modèles afin d'évaluer la biomasse de certains arbres d'ombrage (*Cordia alliodora* et arbres fruitiers), des cacaoyers et des petits arbres issus d'une régénération naturelle. Pour les autres espèces, des équations générées dans d'autres recherches réalisées dans des conditions biophysiques semblables ont été utilisées.

Les différentes relations utilisées pour l'évaluation de la biomasse des arbres d'ombrage sont énumérées dans le Tableau 4. Ces modèles sont spécifiques à chaque espèce (cacaoyer, *Cordia alliodora*, caféier) ou groupe d'espèces (arbres fruitiers¹⁴, palmiers). Ils se rapportent aussi parfois à un type de végétation comme la forêt primaire tropicale. Ils relient la biomasse aérienne de l'arbre à diverses variables telles que le dhp et la hauteur totale. L'Annexe 7 présente la liste des espèces ligneuses rencontrées dans les PPE et les modèles utilisés pour estimer leur biomasse.

¹⁴ Le modèle de biomasse pour les arbres fruitiers a été développé à l'aide des espèces suivantes : *Inga* sp., *Spondias mombin* L., *Citrus* spp., *Persea americana* Mill., *Psidium guajava* L., *Nephelium lappaceum* L., *Syzigium malacensis* (L.) Merr. & Perr., *Syzigium jambos* (L.) Alst., *Mangifera indica* L. et *Mammea americana* L..

Tableau 4. Modèles utilisés pour le calcul de la biomasse de certaines composantes présentes dans les PPE

No	Composante	Spectre couvert par la variable indépendante	Formule	R ²	Source
Espèce ou groupe d'espèces d'arbres					
1	Cacaoyer (<i>Theobroma cacao</i>)	1,3 - 26,8 (cm)	Ba = 10 ^{(-1,625 + 2,626*LOG(d30))}	0,98	Segura et al., 2005a
2	Laurel (<i>Cordia alliodora</i>)	3,9 – 102 (cm)	Ba = 10 ^{(-0,51 + 2,08*LOG(dhp))}	0,92	Segura et al., 2005a
3	Caféier (<i>Coffea arabica</i>)	0,3 - 7,4 (cm)	Ba = 10 ^{(-1,18 + 1,99*LOG(d15))}	0,93	Segura et al., 2005b
4	Arbres fruitiers (multi-spécifique)	1,9 - 46,5 (cm)	Ba = 10 ^{(-1,11 + 2,64*LOG(dhp))}	0,95	Segura et al., 2005a
5	Individus issus d'une forêt primaire (dhp ≥ 60 cm)	60 – 105 (cm)	Ba = (exp(0,76 + 0,00015*dhp ²))*1000	0,71	Segura et Kanninen, 2005
6	Individus issus d'une forêt secondaire (dhp < 60cm)	5 – 66,6 (cm)	Ba = 10 ^{(-1,473 + 2,716*LOG(dhp))}	0,89	Proyecto LUCCAM, 2005
7	Bois durs de la forêt tropicale humide	5 – 148 (cm)	Ba = exp(-2,289 + 2,649*LN(dhp) - 0,021*(LN(dhp)) ²)	0,98	IPCC, 2003
8	Palma escoba (<i>Sabal</i> sp.)	0,2 – 14,5 (m)	Ba = 24,559 + 4,921*(ht) + 1,017*(ht) ²	0,82	IPCC, 2003
9	Autres espèces de palmiers	1 – 33 (m)	Ba = 6,666 + 12,826*(ht) ^{0,5} *Ln(ht)	0,75	IPCC, 2003
Autre composante du carbone					
10	Arbres de régénération (multi-spécifique)	0,3 - 9,3 (cm)	Ba = 10 ^{(-1,27 + 2,20*LOG(dhp))}	0,88	Segura et al., 2005a
11	Racines		Br = exp(-1,0587 + 0,8836*LN(Bt))	0,84	Cairns et al., 1997
12	Humus jeune	0,5 – 5,33 (cm)	Ps = exp(4,01571 + 0,71764*LN(hh))	0,72	Grégoire Valentini, 2006

Légende : Ba = Biomasse de l'arbre au-dessus du sol (kg/arbre), Br = Biomasse racines (t/ha), Bt = Biomasse totale au-dessus du sol (t/ha), dhp = Diamètre tronc principal à hauteur de poitrine (cm), d15 = Diamètre tronc principal à 15 cm du sol (cm), d30 = Diamètre tronc principal à 30 cm du sol (cm), exp = le nombre E exposé à la puissance x, hh = Hauteur humus jeune (cm), ht = Hauteur totale de l'arbre (m), LN = logarithme naturel, LOG = logarithme en base 10, Ps = Poids sec humus jeune (g).

Brièvement, le développement des modèles dans le cadre du programme du CATIE a consisté à mesurer les arbres sur pied, puis à les abattre pour ensuite évaluer de façon directe et indirecte leur biomasse. Pour les petits arbres, toutes les composantes (feuilles, fruits, branches, tronc) ont été pesées et converties en biomasse à l'aide des équations 1 et 2. Dans le cas de grands arbres, le volume du tronc et des grosses branches a été estimé à l'aide de formules géométriques telles que celles de Smalian et Huber (Segura et Kanninen, 2002). La prise d'échantillon a permis de déterminer la densité du bois (g/cm³), donnée essentielle pour convertir le volume en poids.

Les arbres morts sur pied (secs ou pourris) ainsi que les arbres décimés ont été inclus dans la catégorie des souches puisque leur biomasse ne doit pas être incluse dans le groupe des arbres vivants.

Végétation herbacée

Le pourcentage de matière sèche de la végétation herbacée a été déterminé à l'aide de l'équation 1 et la biomasse au moyen de l'équation 2 (Segura et Kanninen, 2002). La biomasse moyenne des trois quadrats a ensuite été convertie en tonnes par hectare.

$$MS = (PSE / PHE) * 100 \quad (1)$$

où :

MS = pourcentage de matière sèche (%)

PSE = poids sec de l'échantillon après 3 jours au four à 65°C (g)

PHE = poids humide de l'échantillon au champ (g)

$$B = (PHT * MS) / 100 \quad (2)$$

où :

B = biomasse (g)

PHT = poids humide total au champ (g)

MS = pourcentage de matière sèche (%)

Arbres morts tombés au sol

Afin d'évaluer le volume total des arbres morts tombés au sol dans chaque PPE, tous les diamètres des arbres d'une même classe de densité qui interceptaient les deux lignes de 50 m ont été additionnés et utilisés dans l'équation 3 développée par l'IPCC en 2003. Cette équation permet d'obtenir directement le volume à l'hectare des arbres tombés au sol. Un

échantillonnage au sein de chacune des trois classes de densité (dur, intermédiaire, mou) a permis d'accorder une valeur quantitative à cette évaluation qualitative. La détermination de la densité a été effectuée en laboratoire à l'aide de la méthode par immersion ou de Buoyancy (Beaudoin, 1997). Les valeurs obtenues furent respectivement de 0,60, 0,42 et 0,23 g/cm³ pour les arbres durs, intermédiaires et mous. La biomasse des arbres tombés au sol a ensuite été évaluée à l'aide de l'équation 4. Finalement, les biomasses associées aux trois classes de densité (Bcd) ont été additionnées pour obtenir une seule valeur par hectare pour cette composante dans chaque PPE.

$$Vat = \pi^2 * (D1^2 + D2^2 + D3^2 + \dots + Dn^2) / (8 * L) \quad (3)$$

où :

Vat = volume des arbres tombés au sol d'une même classe de densité (m³/ha)

D1...Dn = diamètres des arbres d'une même classe de densité (cm)

L = longueur totale de la ligne (100 m)

$$Bcd = Vat * D \quad (4)$$

où :

Bcd = biomasse des arbres tombés au sol d'une même classe de densité (t/ha)

Vat = volume des arbres tombés au sol d'une même classe de densité (m³/ha)

D = densité associée à l'une des trois classes (t/m³)

Souches

Le volume des souches a été déterminé à l'aide de deux équations en fonction de la forme géométrique observée (Segura et Kanninen, 2002). Dans le cas d'un cylindre, l'équation 5 a été utilisée alors qu'en présence de contreforts (forme conique), c'est plutôt l'équation 6 qui a été appliquée. Les volumes ont ensuite été convertis en biomasse à l'aide des valeurs suivantes : 0,23 g/cm³ pour les souches pourries et l'espèce *Ochroma pyramidale*, 0,42 g/cm³ pour les palmiers et 0,60 g/cm³ pour les autres.

$$Vs = D^2 * (\pi / 4) * H \quad (5)$$

où :

Vs = volume de la souche (m³)

D = diamètre à mi-hauteur de la souche (m)

H = hauteur totale de la souche (m)

$$V_s = (H / 4) * [S_i + (S_i^2 * S_s)^{1/3} + (S_s^2 * S_i)^{1/3} + S_s] \quad (6)$$

où :

V_s = volume de la souche (m^3)

S_i = surface inférieure de la souche (m^2)

S_s = surface supérieure de la souche (m^2)

H = hauteur totale de la souche (m)

Humus jeune

L'élaboration de la régression reliant le poids sec de l'humus jeune (ou biomasse) et sa hauteur répondait à l'objectif 4 du présent travail de recherche. Afin d'obtenir une meilleure précision dans le modèle, il a été décidé d'éliminer les quadrats présentant les poids secs extrêmes (inférieur et supérieur) pour chaque PPE. Nous avons donc travaillé avec la moyenne des 8 quadrats restants, pour un total de 12 moyennes (puisque la régression était basée sur l'échantillonnage complet de 12 PPE) (Figure 11a). Une transformation avec le logarithmique naturel a permis d'améliorer sensiblement l'ajustement de la courbe et de passer d'un r^2 de 0,716 (avec les données brutes) à un r^2 de 0,836 (Figure 11b). L'équation linéaire suivante a donc été retenue puisque hautement significative ($P < 0,0001$) :

$$P_s = \exp(4,01571 + 0,71764 * \text{LN}(H_h)) \quad (7)$$

où :

P_s = poids sec de l'humus jeune (g)

H_h = hauteur de l'humus jeune (cm)

Exp = le nombre E exposé à la puissance x

LN = logarithme naturel

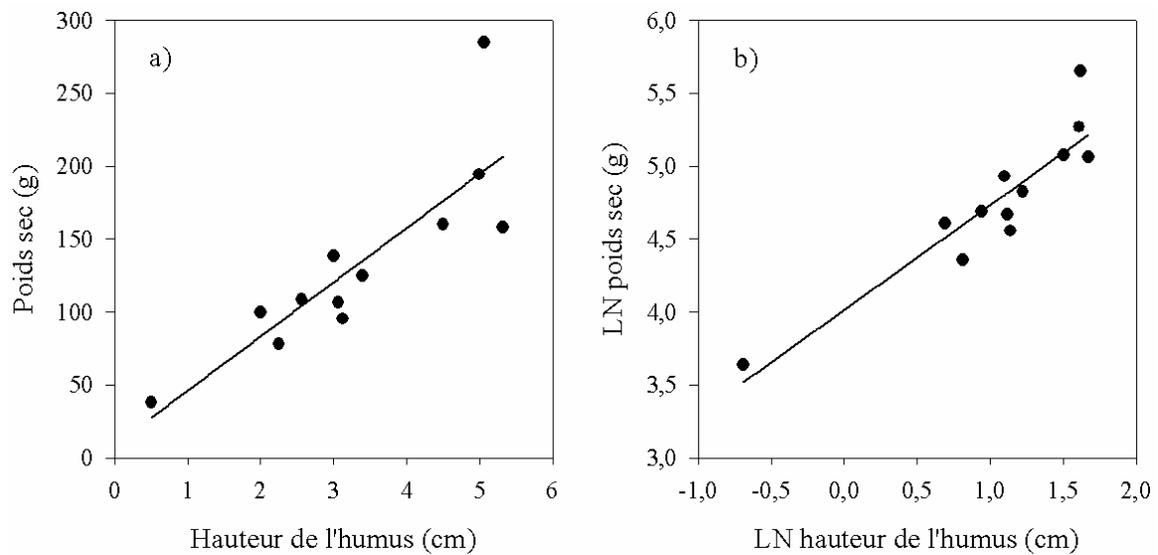


Figure 11. Relation entre le poids sec de l'humus et sa hauteur. a) Données brutes recueillies au champ; et b) données transformées par logarithme naturel pour la construction du modèle

Les parcelles rectangulaires supplémentaires qui ont été réalisées dans les jachères (Figure 10 de la section 4.4.3.1) ont permis de confirmer la justesse du modèle développé pour tous les systèmes. En effet, dans chaque parcelle supplémentaire établie, un échantillon de 1 m² d'humus a été pesé après que sa hauteur ait été mesurée. Les résultats obtenus ont concordé avec ceux générés par le modèle. Il importe ici de mentionner que le modèle développé a servi à estimer le poids sec de cette composante pour les 41 parcelles restantes.

Ce modèle pourra être utilisé dans d'autres recherches réalisées dans des conditions biophysiques similaires. Il ne sera pas nécessaire que ces études portent sur les mêmes systèmes agricoles puisque le modèle a été développé pour trois pratiques différentes (avec un r² très satisfaisant de 0,84). Aussi, le fait que la relation porte sur le poids sec de l'humus et non directement sur la quantité de carbone emmagasinée permet l'utilisation d'un pourcentage de carbone spécifique à la culture qui sera étudiée, pour une meilleure précision.

4.5.2 Carbone aérien

L'évaluation en laboratoire du contenu en carbone des espèces ligneuses prédominantes dans les PPE a été déterminée par spectrophotométrie¹⁵. Le Tableau 5 présente les différents pourcentages obtenus. En ce qui a trait à la végétation herbacée, à l'humus jeune et aux arbres tombés au sol, la moyenne obtenue pour les espèces ligneuses, c'est-à-dire 46,7 %, a été utilisée puisque les données d'analyse de laboratoire n'étaient pas disponibles. Cette valeur se rapproche de celle recommandée par l'IPCC (2003), qui est de 50 %.

Tableau 5. Contenu en carbone des espèces ligneuses prédominantes dans les PPE

Nom commun	Nom scientifique	Contenu moyen en carbone (%)
<i>Laurel</i>	<i>Cordia alliodora</i>	46,4
<i>Cacaoyer</i>	<i>Theobroma cacao</i>	45,8
<i>Avocatier</i>	<i>Persea americana</i>	47,1
<i>Citrus</i>	<i>Citrus spp.</i>	45,0
<i>Guaba</i>	<i>Inga sp.</i>	48,1
<i>Goyavier</i>	<i>Psidium guajava</i>	49,1
<i>Mamón chino</i>	<i>Nephelium lappaceum</i>	47,6
<i>Manguier</i>	<i>Mangifera indica</i>	46,3
<i>Sapotillo</i>	<i>Mammea americana</i>	49,3
	Moyenne	46,7

L'équation 8 a ensuite permis d'évaluer la quantité de carbone présente dans la biomasse des composantes étudiées.

$$CE = B * FC \quad (8)$$

où :

CE = carbone emmagasiné (t C/ha)

B = biomasse (t/ha)

FC = fraction de carbone (%)

¹⁵ L'analyse portait sur les résidus d'une combustion réalisée à de très hautes températures. Elle a été effectuée à l'aide d'un *CHN Analyser*.

4.5.3 Carbone souterrain

Carbone organique du sol

Le pourcentage de carbone organique du sol a été déterminé à l'aide de la méthode de Walkley et Black (Nelson et Sommers, 1996). L'équation 9 a permis d'évaluer ensuite la quantité totale de carbone emmagasinée dans le sol d'une PPE.

$$CE = CO * DA * P * 100 \quad (9)$$

où :

CE = carbone emmagasiné (t C/ha)

CO = pourcentage de carbone organique du sol (%)

DA = densité apparente du sol, évaluée à l'aide de la méthode du cylindre connu (g/cm³)

P = profondeur d'échantillonnage (40 cm)

100 = facteur de conversion pour obtenir des t C/ha

Carbone du système racinaire

En raison de coûts d'échantillonnage très élevés, il a été décidé que la composante racinaire serait estimée à l'aide de relations développées dans d'autres recherches menées dans des types de végétation semblables à celle présente dans l'étude (MacDiken, 1997). Le modèle développé par Cairns et al. (1997) pour la forêt tropicale humide (modèle no 11 du Tableau 4) nous a permis d'évaluer la contribution de cette composante au carbone total présent dans les PPE (sous les recommandations de l'IPCC).

4.6 Évaluation de la séquestration du carbone en fonction de l'âge des jachères

Le but d'une partie de la présente recherche était d'évaluer l'évolution de la séquestration du carbone dans des jachères âgées de 1 à 10 ans. Pour ce faire, 26 PPE ont été établies (soit les 9 PPE du traitement «jachère jeune», les 9 PPE du traitement «jachère âgée» et 8 PPE supplémentaires d'âge intermédiaire) (voir l'Annexe 5) afin de mettre en relation la quantité de carbone emmagasinée et l'âge de la jachère. Les mêmes mesures que celles décrites à la section 4.4 ont été réalisées dans ces PPE. L'analyse des données a ensuite consisté à évaluer si la régression entre le carbone (total et ses diverses composantes) et le temps était significative, et dans le cas positif, d'en dégager une équation de régression.

4.7 Enquête socio-économique

4.7.1 Caractérisation des systèmes

Afin de dresser un portrait des systèmes étudiés dans les Territoires Autochtones de Talamanca, et plus particulièrement de celui de l'agriculture migratoire, une brève enquête socio-économique a été menée entre le 16 mai et le 16 juin 2005 auprès de 34 producteurs provenant des communautés de San Vicente, San Miguel, Sibuju et Shwabb (les mêmes communautés que celles échantillonnées lors de l'évaluation de la biomasse dans les cinq traitements). Les données suivantes concernant les jachères, les SAF de cacaoyers et les SAF de bananiers ont été recueillies : les superficies, l'âge des systèmes, les rendements et les cycles de production. L'Annexe 8 présente le questionnaire utilisé lors de cette enquête. De nombreuses informations ainsi obtenues n'ont pas été utilisées dans le cadre de cette maîtrise, mais ont servi à préparer une base de données pour le programme du CATIE.

4.7.2 Rentabilité économique des systèmes

Pour évaluer la rentabilité économique des systèmes de production de cacao, banane, riz et maïs¹⁶, il a fallu compléter les informations obtenues dans l'enquête socio-économique. Des informateurs clefs appartenant à diverses institutions et organisations, ainsi que des agriculteurs maîtrisant très bien leurs productions, ont été rencontrés afin de développer un modèle type de production dans les fermes des Territoires Autochtones de Talamanca (voir les Annexes 9 et 10).

Les coûts opérationnels de chaque système ont été déterminés grâce à l'évaluation de la main d'œuvre nécessaire à l'établissement et à la gestion du système. Bien que cette main d'œuvre représente le principal coût puisqu'il s'agit de cultures biologiques avec peu d'intrants, l'achat de certains outils et des semences a aussi été évalué. Les bénéfices bruts correspondent quant à eux aux profits tirés de la vente des produits sur le marché ou à leur

¹⁶ La rentabilité économique de la production du haricot n'a pas été évaluée car cette culture est moins fréquente que celles du riz et du maïs.

valeur estimée dans le cas de produits consommés au sein de la famille et donc non commercialisés (cas du riz et du maïs).

La rentabilité des cultures de cacaoyers, bananiers et céréales a été évaluée à l'aide de trois indicateurs financiers : la valeur actualisée nette (équation 10)¹⁷, la relation bénéfices-coûts (équation 11)¹⁸ et la valeur de la main d'œuvre familiale (équation 12)¹⁹ (Clutter et al., 1983). L'analyse financière du système de production s'est réalisée sur un cycle de 20 ans pour les cultures pérennes (cacao et banane). Le choix d'un cycle d'une telle durée a été basé sur les particularités des cultures, l'historique de production dans la région (Borge et Villalobos, 1998) et la facilité de comparaison entre les systèmes. Pour les cultures annuelles, la valeur actualisée nette a été remplacée par le bénéfice net, soit la différence entre le bénéfice brut et les coûts opérationnels.

$$VAN = \Sigma [(BB - CO) / (1 + t)^n] \quad (10)$$

où :

VAN = valeur actualisée nette (\$ ha⁻¹ an⁻¹)

BB = bénéfices bruts à l'année *n* (\$ ha⁻¹)

CO = coûts opérationnels à l'année *n* (\$ ha⁻¹)

t = taux d'actualisation (10 %)

$$B/C = VAN (BB) / VAN (CO) \quad (11)$$

où :

B/C = relation bénéfices-coûts

VAN = valeur actualisée nette (\$ ha⁻¹ an⁻¹)

BB = bénéfices bruts (\$ ha⁻¹)

CO = coûts opérationnels (\$ ha⁻¹)

¹⁷ La valeur actualisée nette permet de ramener sur une même année tous les coûts et bénéfices générés par une activité sur plusieurs années.

¹⁸ La relation bénéfices-coûts représente la rentabilité sur le capital, c'est-à-dire qu'elle permet de déterminer combien de bénéfices totaux sont générés pour chaque dollar investi.

¹⁹ La valeur de la main d'œuvre familiale réfère au montant auquel est rémunéré l'agriculteur pour les journées travaillées sur sa ferme.

$$\text{Valeur MO familiale} = (\text{BB} - \text{CO}) / (\text{MO} * 0,75) \quad (12)$$

où :

MO = main d'œuvre journalière (jour)

BB = bénéfices bruts (\$ ha⁻¹)

CO = coûts opérationnels (\$ ha⁻¹)

0,75 = correspond à la proportion de la MO familiale (qui n'est pas directement rémunérée)

Les analyses ont été réalisées en dollars américains en utilisant un taux de change de 479,92 colones/\$US (taux moyen qui prévalait au moment de l'enquête économique, soit entre le 15 juillet et le 15 août 2005). Sous les recommandations d'experts du CATIE, un taux d'actualisation de 10 % a été utilisé pour les calculs (Otárola, 2005).

5 Résultats et discussion

5.1 La séquestration du carbone dans les systèmes étudiés

Dans la présente section, les valeurs obtenues pour les cinq traitements à l'étude sont illustrées dans des histogrammes auxquels sont joints des tableaux présentant les résultats statistiques des contrastes. Pour connaître le détail des résultats ainsi que les analyses statistiques qui leur sont rattachées, le lecteur peut se référer aux Annexes 11 et 12, respectivement.

Il est important de spécifier que certaines données ont dû être transformées afin de rendre leur variance homogène et/ou leurs résidus normaux. Dans le cas des résultats pour le carbone en valeurs absolues, les données des composantes suivantes ont été transformées : arbres d'ombrage et cacaoyers (transformation racine carrée- $\sqrt{\quad}$), petits arbres issus d'une régénération naturelle ($\sqrt{\quad}$), arbres tombés au sol ($\sqrt{\quad}$), carbone aérien vivant ($\sqrt{\quad}$), carbone du sol (logarithmique-LOG) et carbone total ($\sqrt{\quad}$). Concernant les contributions relatives des composantes, les données suivantes ont subi une transformation : petits arbres issus d'une régénération naturelle (LOG), végétation herbacée (LOG), humus jeune ($\sqrt{\quad}$) et carbone aérien vivant (angulaire).

Les différents acronymes utilisés dans les histogrammes et dans les analyses leur étant rattachées sont présentés dans la liste des abréviations et acronymes située au début du document (pages xii-xiii).

5.1.1 Le carbone total

La quantité de carbone total emmagasinée dans les cinq traitements de l'étude est présentée à la Figure 12. Le système agroforestier (SAF) de cacaoyers sous ombrage mono-spécifique est celui qui obtient le résultat le plus élevé avec 148 t C/ha. Il est suivi de près par le SAF de cacaoyers sous ombrage multi-spécifique et la jachère âgée (126 et 123 t C/ha,

respectivement). Le SAF de bananiers et la jachère jeune présentent la séquestration du carbone la plus faible (77 et 79 t C/ha, respectivement).

L'analyse des contrastes permet de conclure que les systèmes agroforestiers tendent à séquestrer une quantité supérieure de carbone comparativement aux jachères issues d'une agriculture migratoire (Tableau 6). On ne peut cependant parler ici que de tendance puisque la valeur de P est légèrement supérieure à 0,05 ($P = 0,0557$). La décomposition de ces contrastes offre des informations supplémentaires importantes. On observe en effet une différence hautement significative entre les SAF de bananiers et les SAF de cacaoyers ($P < 0,0001$). Ces résultats démontrent bien que ce dernier système est beaucoup plus efficace pour emmagasiner le carbone atmosphérique. Par ailleurs, les jachères âgées séquestrent plus de carbone que les jachères jeunes ($P = 0,0003$). Le facteur temps semble donc influencer grandement l'accumulation de cet élément dans ce type de système. Par contre, il ne semble pas exister de différence entre les traitements «ombrage mono-spécifique» et «ombrage multi-spécifique» dans le SAF de cacaoyers pour ce qui est de la quantité totale de carbone séquestrée ($P = 0,1266$). Il convient cependant de préciser que la distinction entre ces deux catégories était basée sur le nombre d'arbres présents dans les parcelles, sans prendre en considération la taille de ces arbres (et donc leur âge). Une étude menée en milieu expérimental, plutôt qu'en conditions paysannes, permettrait de contrôler ce facteur et ainsi de mieux comparer ces deux systèmes.

En termes de valeur absolue, les résultats obtenus sont légèrement supérieurs à ceux rapportés dans d'autres études. En effet, Palm et al. (2000) observent des captations de carbone variant entre 60 et 90 t C/ha pour une agroforêt²⁰ de 20 ans, alors que les résultats obtenus dans la présente recherche pour les SAF de cacaoyers sous ombrage se situent en moyenne à 137 t C/ha. Les résultats de notre étude sont aussi supérieurs aux 92 t C/ha séquestrés dans des SAF de caféiers dans l'étude de Alvarado et al. (1999), mais se rapprochent des 121 à 195 t C/ha de la recherche de Ávila et al. (2001).

²⁰ SAF caractérisé par la culture d'une ou plusieurs espèces ligneuses protégées par des arbres d'ombrage.

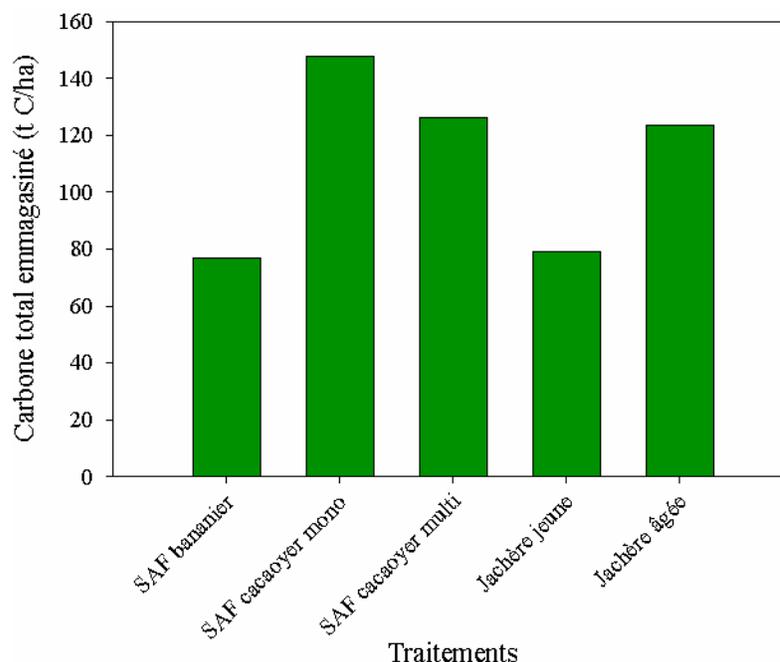


Figure 12. Quantité de carbone total emmagasinée dans les traitements étudiés

Tableau 6. Résultats statistiques des contrastes pour le carbone total emmagasiné

Contraste	P ²¹
SAF vs jachères	0,0557
SAF cacaoyers vs SAF bananiers	<,0001 **
Cacaoyers mono vs multi	0,1266
Jachère jeune vs âgée	0,0003 **

En ce qui a trait aux jachères, Palm et al. (2000) ont observé une séquestration de 64 à 131 t C/ha pour des jachères âgées de 25 ans. Ces résultats concordent assez bien avec ceux générés par notre étude pour les jachères de 6 à 10 ans (123 t C/ha). Par contre, les résultats qu'ils ont obtenus pour des jachères de moins de 5 ans (5 à 20 t C/ha) sont nettement inférieurs à ceux des jachères de 1 à 3 ans de notre étude (79 t C/ha).

²¹ Une statistique à 5 % ($P < 0,05$) est dite «significative» et est indiquée par un astérisque (*), tandis que celle à 1% ($P < 0,01$) est dite «hautement significative» et est marquée de deux astérisques (**).

La captation de carbone obtenue dans les SAF de bananiers sous ombrage (77 t C/ha) s'approche quant à elle des valeurs recensées dans la littérature. En effet, Montagnini et Nair (2004) estiment qu'une culture agroforestière de région humide emmagasine en moyenne 50 t C/ha. Globalement, les différences observées entre les résultats de notre étude et ceux retrouvés dans la littérature pourraient s'expliquer par le fait qu'un plus grand nombre de composantes du carbone ont été évaluées dans la présente recherche, notamment les petits arbres issus d'une régénération naturelle, les souches et les arbres tombés au sol.

5.1.2 La répartition du carbone total

Valeurs absolues

La Figure 13a illustre la répartition de la quantité de carbone emmagasinée dans les cinq systèmes selon les quatre grandes composantes du carbone total, soit le carbone aérien vivant (CAV), le carbone aérien mort (CAM), le carbone racinaire (CR) et le carbone organique du sol (CS). Le Tableau 7 présente les statistiques qui lui sont rattachées.

L'analyse statistique des contrastes démontre clairement que les SAF emmagasinent plus de carbone dans la composante «carbone aérien vivant» que les jachères ($P < 0,0001$) et que les systèmes de cacaoyers sont plus efficaces que les systèmes de bananiers pour cette même composante ($P < 0,0001$). On n'observe par contre pas de différence entre les systèmes de cacaoyers sous ombrage mono-spécifique et ceux sous ombrage multi-spécifique ($P = 0,2688$). Finalement, il apparaît que les jachères âgées séquestrent une quantité supérieure de CAV que les jachères jeunes ($P < 0,0001$). Ces différences entre les traitements paraissent attribuables aux variations quant à la prédominance des espèces ligneuses dans les systèmes. Il semble en effet que les systèmes comprenant le plus d'espèces ligneuses sont ceux présentant le plus de CAV.

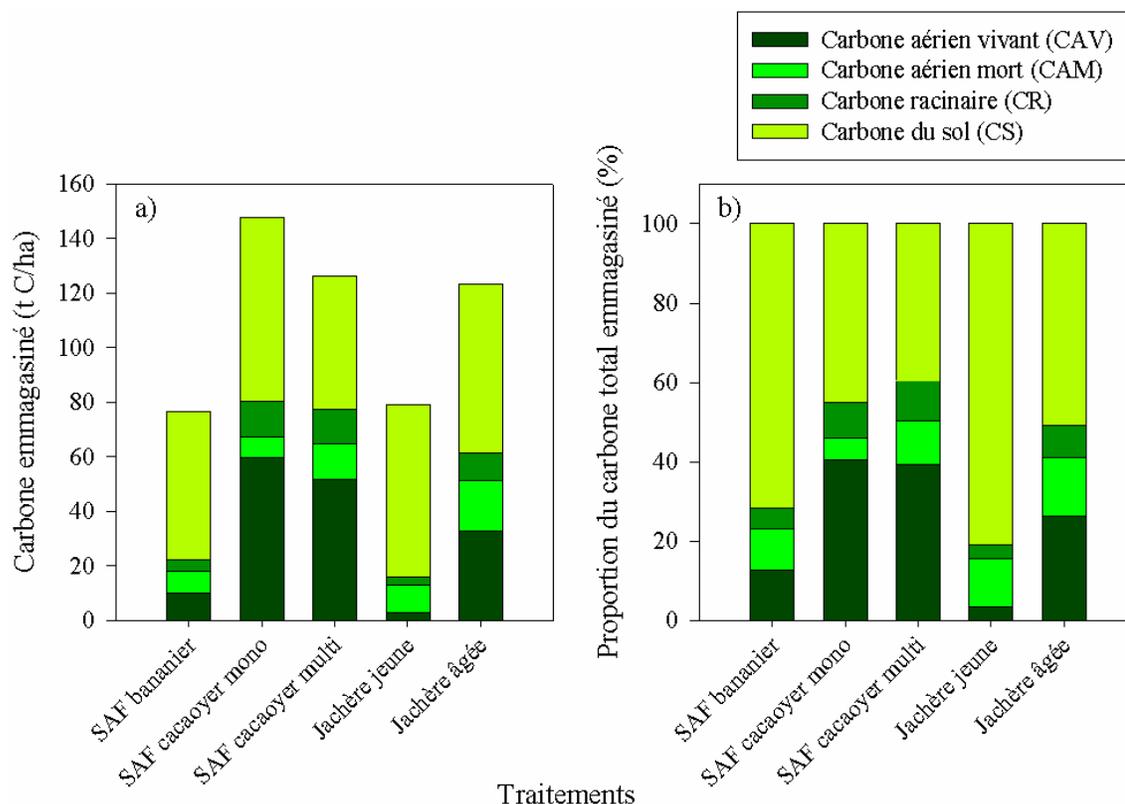


Figure 13. Répartition (a) et contribution relative (b) des quatre grandes composantes du carbone total dans les traitements étudiés

Tableau 7. Résultats statistiques des contrastes pour les quatre grandes composantes du carbone total

Contraste		CAV	CAM	CR	CS
Valeur (t C/ha)	SAF vs jachères	**	0,0592	**	-
	SAF cacaoyers vs SAF bananiers	**	-	**	-
	Cacaoyers mono vs multi	-	-	-	*
	Jachère jeune vs âgée	**	*	**	-
Proportion (%)	SAF vs jachères	**	0,0505	**	**
	SAF cacaoyers vs SAF bananiers	**	-	**	**
	Cacaoyers mono vs multi	-	-	-	-
	Jachère jeune vs âgée	**	-	**	**

CAV = carbone aérien vivant, CAM = carbone aérien mort, CR = carbone racinaire, CS = carbone organique du sol

La quantité de carbone retrouvée dans la biomasse aérienne vivante des SAF a varié de 10 à 60 t C/ha. Ces résultats se rapprochent de ceux présentés par Beer et al. en 1990 (60 t C/ha) et Schroth et al. en 2002 (13 à 42 t C/ha). Concernant les jachères jeunes, la séquestration de 2,9 t C/ha qui y a été mesurée est nettement inférieure aux 7 à 43 t C/ha rapportés dans l'étude de Albrecht et Kandji (2003). Cependant, cette dernière recherche portait sur des jachères améliorées où l'agriculteur était intervenu pour planter des espèces ligneuses. On peut donc conclure que l'introduction d'arbres dans ce système améliore grandement la captation de carbone.

Les résultats pour le carbone aérien mort sont moins concluants puisqu'on observe seulement une tendance ($P = 0,0592$) qui laisse présager que les jachères séquestrent une quantité de carbone supérieure à celle séquestrée par les SAF. Il est par contre clair que les jachères âgées emmagasinent plus de carbone dans la composante CAM que les jachères jeunes ($P = 0,0192$). On peut supposer que cela est attribuable à la présence d'un plus grand nombre d'arbres dans les jachères âgées, d'où la présence d'un plus grand nombre de souches et d'arbres tombés au sol. Il apparaît finalement que le CAM est très semblable entre les SAF de cacaoyers et de bananiers ($P = 0,4585$), contrairement au CAV.

Les contrastes pour le carbone racinaire reflètent les résultats obtenus pour le CAV. Cela était prévisible puisque la composante CR a été calculée à l'aide d'un modèle basé sur la biomasse aérienne. Puisque le CAV contribue à la majorité de la biomasse aérienne, le CR suit la même dynamique. Les valeurs de CR ont varié de 3 à 13 t C/ha, pour une moyenne de 9 t C/ha. Cette valeur se rapproche de celles obtenues dans les recherches de Alvarado et al. (1999) et de Schroth et al. (2002), menées dans des conditions similaires.

L'analyse du carbone organique du sol apparaît plus problématique. En effet, cette composante ne présente une différence significative qu'entre le SAF de cacaoyers sous ombrage mono-spécifique et celui sous ombrage multi-spécifique (67 t C/ha versus 49 t C/ha) ($P = 0,0150$). Cela voudrait donc dire que le *Cordia alliodora* améliore sensiblement le contenu en matière organique du sol. La caractéristique botanique de cet arbre de laisser tomber ses feuilles au sol deux fois par année pourrait expliquer cette

observation. Celle-ci devrait cependant être confirmée par d'autres études car le sol est la seule composante pour laquelle une différence significative a été observée entre ces deux traitements. La moyenne de séquestration de carbone du sol obtenue pour les SAF de cacaoyers, soit 58 t C/ha, concorde avec les résultats de l'étude de Alvarado et al. (1999), réalisée dans des SAF de caféiers sous ombrage. Le CS est donc la composante qui accumule le plus de carbone.

Contributions relatives

Les contributions relatives en pourcentage des quatre grandes composantes du carbone total sont présentées à la Figure 13b et les contrastes qui leurs sont associés au Tableau 7. On y remarque que l'importance du CAV dans le bilan total suit la même tendance que pour les valeurs absolues. Cette composante constitue environ 25 % (4 à 40 %) du carbone total. La contribution du CAM se situe quant à elle à 11 % (6 à 15 %) du carbone total. Finalement, le CR suit encore la logique du CAV et constitue la composante qui contribue le moins au carbone total avec seulement 7 % (4 à 10 %).

La contribution relative du CS au carbone total est à l'inverse des résultats obtenus pour les valeurs absolues. En effet, puisque la quantité de carbone séquestrée dans cette composante varie peu entre les traitements, le CS présente une importance relative plus grande dans les systèmes qui emmagasinent le moins de carbone. Ainsi, la proportion du carbone total séquestré par cette composante est plus élevée dans les jachères que dans les systèmes agroforestiers ($P < 0,0001$). Elle est aussi beaucoup plus importante dans les SAF de bananiers que dans les SAF de cacaoyers ($P < 0,0001$). Par contre, elle ne présente aucune différence significative entre les cacaoyers sous ombrage mono-spécifique et ceux sous ombrage multi-spécifique ($P = 0,1955$). Finalement, la contribution du CS est très différente dans les jachères jeunes et les jachères âgées, soit 81 et 51 % du carbone total, respectivement ($P < 0,0001$).

En moyenne, 58 % du carbone total présent dans les traitements a été retrouvé dans le sol, la proportion la plus élevée ayant été observée dans les jachères jeunes (81 %), et la plus faible dans les SAF de cacaoyers (42 %). Le sol représente donc le principal puits de

carbone dans les systèmes étudiés, tel que Dixon (1995) l'avait démontré. Presque aucune variation de CS en termes de valeur absolue n'a cependant été observée entre les traitements. Ce résultat est peut-être dû à la profondeur d'échantillonnage qui a été utilisée (0-40 cm). En effet, Schroth et al. (2002) rapportent des différences significatives en ce qui a trait à la captation de carbone dans le sol de SAF et de jachères sur 10 cm, mais notent que ces différences disparaissent à de plus grandes profondeurs (10-200 cm). Ces résultats coïncident aussi avec ceux de Kotto-Same et al. (1997) qui concluent que le carbone organique contenu dans le sol est la composante la plus stable face à un changement d'utilisation de la terre. Ainsi, malgré la forte contribution du CS au carbone total, la composante qui doit être visée lorsque l'on tente d'augmenter la quantité de carbone séquestrée n'est pas le sol, mais bien la biomasse aérienne, et plus particulièrement la composante ligneuse.

5.1.3 La répartition du carbone aérien

5.1.3.1 Le carbone aérien vivant

Valeurs absolues

L'analyse de la Figure 14a et du Tableau 8 démontre que l'ensemble constitué par les arbres d'ombrage et les cacaoyers (AOC) est de loin la composante la plus importante dans la séquestration du carbone aérien vivant. Bien que très variable entre les systèmes, une quantité de 30,5 t C/ha (1,7 à 59,1 t C/ha) est en moyenne séquestrée dans les AOC sur un total de 31,3 t C/ha (total CAV). Les résultats des contrastes pour la composante AOC sont identiques à ceux obtenus pour la composante CAV.

En ce qui a trait aux petits arbres issus d'une régénération naturelle (AR), on observe que les jachères emmagasinent plus de carbone dans cette composante que les SAF ($P < 0,0001$). Il est normal que les AR soient plus importants dans des systèmes en pleine régénération comme les jachères. Cependant, globalement, cette composante emmagasine très peu de carbone, soit seulement 0,5 t C/ha (0,1 à 1,1 t C/ha) en moyenne.

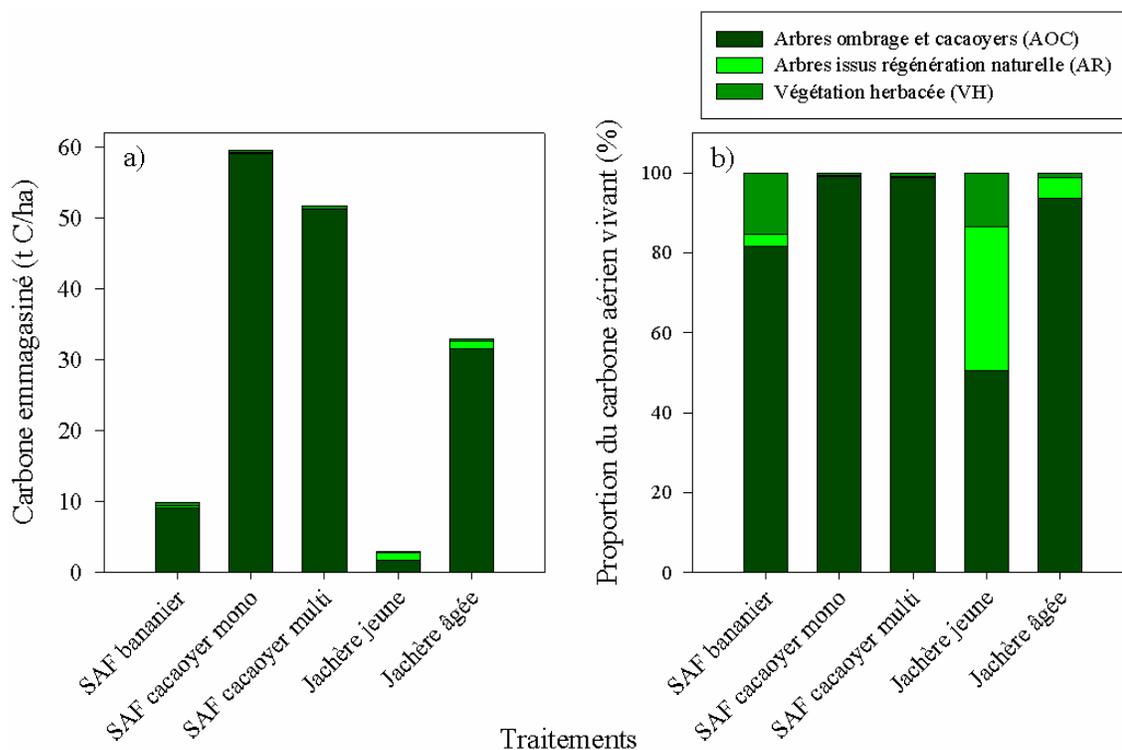


Figure 14. Répartition (a) et contribution relative (b) des trois composantes du carbone aérien vivant dans les traitements étudiés

Tableau 8. Résultats statistiques des contrastes pour les trois composantes du carbone aérien vivant

Contraste		AOC	AR	VH
Valeur (t C/ha)	SAF vs jachères	**	**	-
	SAF cacaoyers vs SAF bananiers	**	-	-
	Cacaoyers mono vs multi	-	-	-
	Jachère jeune vs âgée	**	-	-
Proportion (%)	SAF vs jachères	*	**	0,0568
	SAF cacaoyers vs SAF bananiers	0,0545	*	**
	Cacaoyers mono vs multi	-	-	-
	Jachère jeune vs âgée	**	**	**

AOC = arbres d'ombrage et cacaoyers, AR = petits arbres issus d'une régénération naturelle, VH = végétation herbacée

Finalement, la végétation herbacée (VH) ne présente aucun contraste significatif pour les valeurs absolues de carbone séquestré. Ce résultat est quelque peu surprenant compte tenu

de la végétation très dense retrouvée dans les jachères. Les parcelles rectangulaires supplémentaires (Figure 10 de la section 4.4.3.1) ont permis de confirmer que la composante VH a été grandement sous-estimée dans ces systèmes. L'analyse démontre en effet que la captation de carbone dans la VH des jachères, obtenue à l'aide de la méthode des quadrats de 50 cm x 50 cm (en moyenne de 0,3 t C/ha), ne représente en fait qu'environ 10 % du carbone réellement emmagasiné dans cette composante. Les résultats auraient donc dû se situer plutôt autour de 3 t C/ha pour les systèmes de jachères si on avait pu évaluer le carbone réellement emmagasiné.

Contributions relatives

Les contrastes sur la contribution relative des AOC au carbone aérien vivant présentent presque les mêmes résultats que les contrastes sur la valeur absolue (Figure 14b et Tableau 8). L'unique différence concerne le contraste pour les SAF de cacaoyers versus ceux de bananiers où seule une tendance a pu être observée ($P = 0,0545$). Il est pertinent ici de souligner que le contraste des cacaoyers sous ombrage mono-spécifique versus multi-spécifique n'est pas significatif. Cette observation permet donc de conclure que ces deux traitements, bien que distincts dans la composition des espèces d'arbres d'ombrage, ne sont pas différents en ce qui a trait au carbone séquestré dans la composante ligneuse. Tel qu'attendu, les arbres d'ombrage et les cacaoyers ont contribué à la majeure partie du carbone aérien vivant, soit en moyenne 85 %. Cette valeur augmente à 99 % dans les SAF de cacaoyers sous ombrage, ce qui correspond aux observations de Alvarado et al. (1999) dans un SAF de caféiers sous ombrage. Il apparaît aussi que l'importance de cette composante varie considérablement avec les systèmes étudiés. Cette observation concorde avec la conclusion de l'étude de Kotto-Same et al. (1997) selon laquelle le carbone contenu dans les arbres est la composante la plus vulnérable à un changement d'utilisation de la terre.

La contribution relative des AR à la séquestration du carbone aérien vivant semble plus concluante que les valeurs absolues de carbone emmagasiné. On observe en effet un apport plus importante de cette composante dans les SAF de bananiers comparativement à ceux de cacaoyers ($P = 0,0488$). Il ressort aussi que la contribution des AR au CAV est nettement

plus élevée dans les jachères jeunes (36 %) que dans les âgées (5 %) ($P = 0,0099$), bien qu'au plan de la quantité de carbone séquestrée (t C/ha) on n'observe pas de différence. La composante AR contribue en moyenne à 9 % (0,2 à 36,0 %) du CAV.

Les résultats pour les contributions relatives de la VH au CAV sont aussi plus concluants que les valeurs absolues de carbone emmagasiné. On remarque ainsi une tendance forte pour le contraste SAF versus jachères ($P = 0,0568$). La raison pour laquelle cette composante tendrait à contribuer davantage au CAV dans les jachères est certainement que la composante ligneuse y a un moindre poids. Si les données avaient été obtenues à l'aide des parcelles rectangulaires supplémentaires, on peut penser que le contraste aurait été significatif. Par ailleurs, les SAF de cacaoyers emmagasinent moins de carbone dans cette composante que les SAF de bananiers ($P < 0,0001$). Encore là, le plus faible poids des AOC dans les SAF de bananiers permet de faire ressortir l'importance de la composante VH. On peut aussi supposer que s'il y a moins de biomasse attribuable aux AOC, alors il y a moins d'ombre projetée au sol, ce qui facilite la croissance de la végétation herbacée. Finalement, la contribution de la VH dans les jachères jeunes (14 %) est nettement supérieure à celle retrouvée dans les jachères âgées (1 %) ($P = 0,0009$). La proportion moyenne du carbone aérien vivant attribuable à la VH est de 6,3 % (0,7 à 15,3 %).

5.1.3.2 Le carbone aérien mort

Valeurs absolues

La quantité de carbone emmagasinée dans les composantes constituant le carbone aérien mort est présentée à la Figure 15a et les résultats des contrastes au Tableau 9. Pour les arbres tombés au sol (AS), on observe une différence significative seulement entre les SAF et les jachères ($P = 0,0375$). La raison pour laquelle les jachères emmagasinent plus de carbone dans cette composante est certainement due au fait que les agriculteurs interviennent très peu dans ce type de système, contrairement aux SAF où les arbres tombés au sol sont le plus souvent récoltés (pour des fins de construction ou de bois de chauffe).

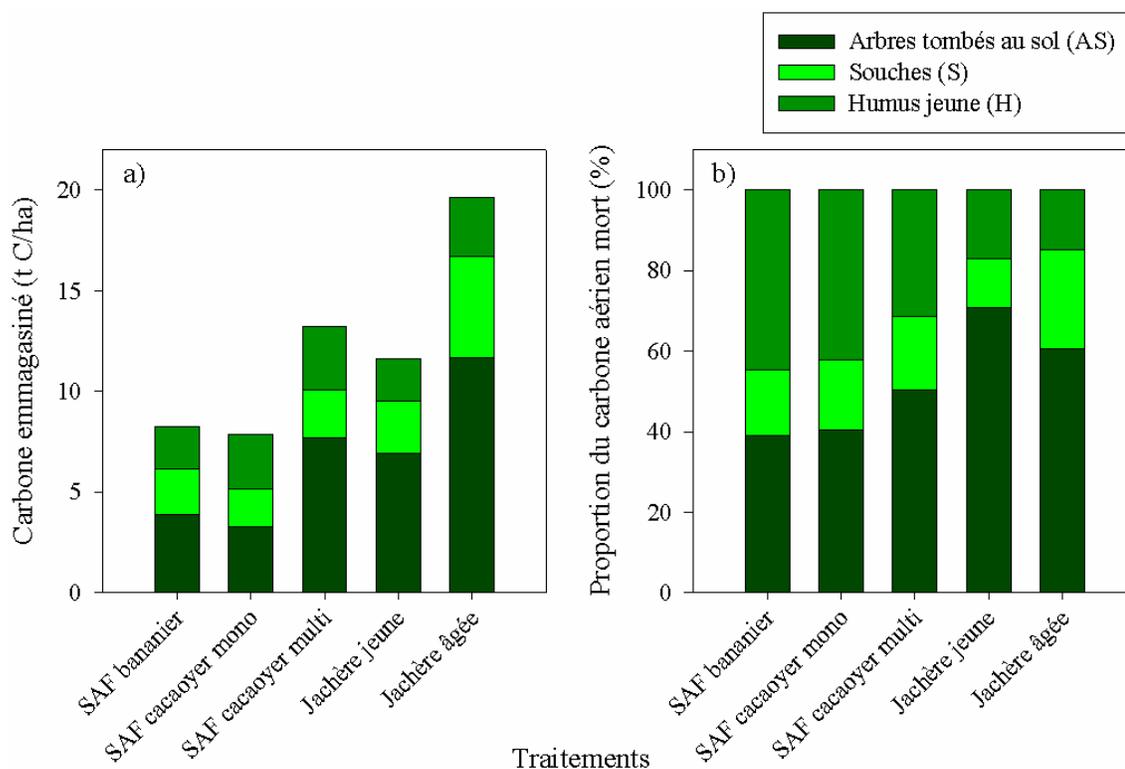


Figure 15. Répartition (a) et contribution relative (b) des trois composantes du carbone aérien mort dans les traitements étudiés

Tableau 9. Résultats statistiques des contrastes pour les trois composantes du carbone aérien mort

Contraste		AS	S	H
Valeur (t C/ha)	SAF vs jachères	*	-	-
	SAF cacaoyers vs SAF bananiers	-	-	**
	Cacaoyers mono vs multi	-	-	-
	Jachère jeune vs âgée	-	-	*
Proportion (%)	SAF vs jachères	*	-	**
	SAF cacaoyers vs SAF bananiers	-	-	-
	Cacaoyers mono vs multi	-	-	-
	Jachère jeune vs âgée	-	-	-

AS = arbres tombés au sol, S = souches, H = humus jeune

Il ne semble pas y avoir de différence entre les traitements pour le carbone emmagasiné dans les souches (S). Cela est quelque peu étonnant puisqu'on aurait pu penser que cette composante suivrait la même tendance que celle des arbres tombés au sol. Toutefois, il faut

mentionner que l'importance des souches a pu être sous-estimée dans les systèmes de jachères en raison de la difficulté à localiser cette composante dans les parcelles très denses (voir l'Annexe 13 pour des images de jachères illustrant les problèmes de visibilité).

En ce qui a trait à l'humus jeune (H), le contraste SAF de cacaoyers versus SAF de bananiers est hautement significatif ($P = 0,0038$). La chute des feuilles et des cabosses de cacaoyers au sol peut expliquer que l'humus soit plus important dans ce premier système. On observe aussi une différence entre les jachères ($P = 0,0141$), les plus âgées étant caractérisées par une accumulation d'humus plus importante. Ce résultat semble logique compte tenu du fait que les jachères âgées se rapprochent d'un écosystème forestier où une certaine épaisseur d'humus a pu s'accumuler avec le temps. Mais en général, la quantité de carbone emmagasinée dans cette composante varie peu entre les systèmes : de 2,1 à 3,2 t C/ha. Ces valeurs sont similaires à celles obtenues dans d'autres recherches (Alvarado et al., 1999; Schroth et al., 2002).

Contributions relatives

La Figure 15b et le Tableau 9 présentent la contribution relative de chaque composante au carbone aérien mort. On y remarque que la contribution relative des AS et des S au CAM suit la même tendance que pour les valeurs absolues. Concernant l'humus jeune, on observe que les SAF y emmagasinent une quantité de carbone supérieure à celle accumulée dans les jachères ($P = 0,0014$). Ceci est certainement dû au fait que la composante AS est très importante dans les jachères, diminuant ainsi la contribution relative de l'humus. Globalement, l'humus contribue pour 30 % (15 à 45 %) du carbone aérien mort.

Les résultats présentés dans cette section démontrent clairement que les systèmes où prédominent des espèces ligneuses à maturité (arbres d'ombrage, cacaoyers, etc.) emmagasinent une quantité supérieure de carbone. Il apparaît aussi que la biomasse aérienne vivante est la composante la plus sensible à un changement d'utilisation de la terre. On observe ainsi, par exemple, une grande différence dans la captation de carbone entre les SAF de cacaoyers et les SAF de bananiers. La composante où les quantités de carbone séquestrées varient le moins d'un système de culture à un autre est le sol, bien que

ce dernier représente le principal puits de carbone. Finalement, pour une même composition en espèces ligneuses, le facteur temps semble influencer grandement l'accumulation de carbone dans un même système. La section suivante aborde donc le cas spécifique de l'évolution de la séquestration du carbone en fonction de l'âge des jachères.

5.2 La séquestration du carbone en fonction de l'âge des jachères

5.2.1 Âge et cycles des jachères

L'âge des jachères rencontrées dans la zone échantillonnée pour le carbone se situait en moyenne autour de 4,8 ans en 2005 (Tableau 10). Cette donnée se rapproche du temps de repos des jachères entre deux cycles de production de cultures vivrières dans la même zone, qui était de 4,3 ans en moyenne. Une telle valeur laisse présager une diminution du temps de repos des jachères comparativement à celui qui avait cours dans le système traditionnel du début du XX^e siècle, qui était de 10 ans en moyenne (Borge et Villalobos, 1998). Ce retour en culture trop rapide peut laisser craindre qu'un processus de dégradation à long terme des terres ne soit enclenché (Lal, 2003).

Tableau 10. Âge des jachères en 2005 et temps de repos des parcelles entre chaque cycle de production de cultures vivrières

	Âge des jachères en 2005	Temps de repos entre chaque cycle
Moyenne (années)	4,8	4,3
Médiane (années)	3,0	4,0
Min (années)	0,1	1,0
Max (années)	25,0	10,0

Bien qu'on observe une grande dispersion de l'âge des jachères dans la zone échantillonnée en 2005 (Figure 16), environ 69 % des jachères rencontrées ont moins de 5 ans. En ce qui a trait aux temps de repos des parcelles entre chaque cycle de production de cultures vivrières, ils varient de 1 à 10 ans, résultat qui justifie très bien le spectre qui a été couvert pour l'échantillonnage du carbone servant à la construction de la courbe de régression (section 4.6).

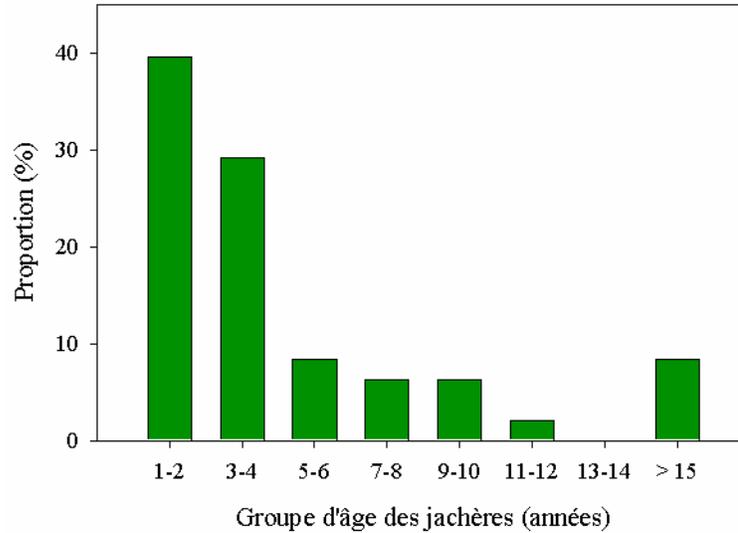


Figure 16. Distribution des jachères par groupe d'âge en 2005

5.2.2 Le carbone total

La quantité de carbone total emmagasinée dans les jachères est fortement corrélée avec l'âge de ces dernières. La Figure 17 présente la régression effectuée pour des jachères de 1 à 10 ans. Les âges ont été regroupés par tranches de deux ans pour une meilleure précision : 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10 ans. Le r^2 pour toutes les données expérimentales (n=26) était de 0,546 et a été amélioré à 0,967 en travaillant avec les moyennes de chaque groupe d'âge (n=5). L'équation quadratique suivante a été retenue puisque significative (P = 0,0333) :

$$CEt = 1,9398(A)^2 - 15,3391(A) + 105,5996 \quad (13)$$

où :

CEt = carbone total emmagasiné dans les jachères (t C/ha)

A = âge regroupé de la jachère (années) : 1-2 ans regroupés sous l'an 2, 3-4 ans regroupés sous l'an 4, etc.

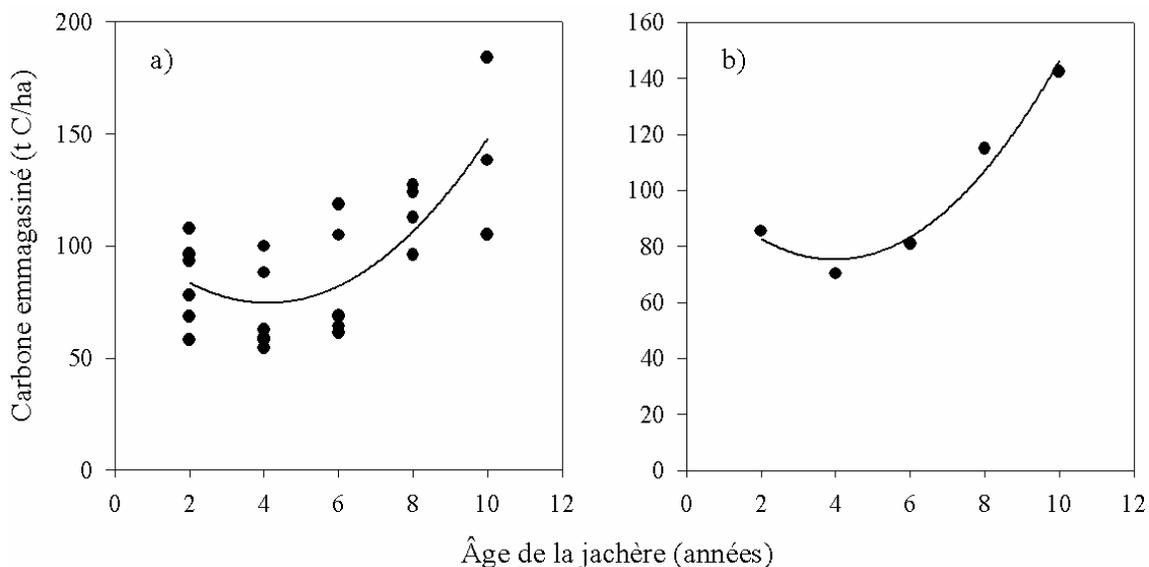


Figure 17. Relation entre la quantité de carbone total emmagasinée et l'âge des jachères. a) Données brutes recueillies au champ; et b) moyennes par groupe d'âge pour la construction de la régression

Contrairement aux informations retrouvées dans la littérature (Kotto-Same et al., 1997; Palm et al, 2000), cette régression ne s'est pas avérée significativement linéaire ($P = 0,0674$) mais plutôt quadratique ($P = 0,0333$). Par contre, on observe tout de même une tendance forte vers une régression linéaire, comme on aurait pu s'y attendre. Ce résultat pourrait peut-être s'expliquer par les difficultés d'échantillonnage pour la tranche d'âge de 3 à 4 ans en raison d'une très forte présence de Musacées sauvages. Ces dernières occupant une superficie importante des PPE, cela empêchait de bien repérer les petits arbres d'ombrage, les arbres tombés au sol et les souches, et de bien échantillonner la végétation herbacée (tel que mentionné précédemment – voir l'Annexe 13).

Quoi qu'il en soit, on peut retenir que ce qui fait varier le plus la captation de carbone dans une jachère est son âge. Selon l'étude de Albrecht et Kandji (2003), les conditions de l'environnement local, les caractéristiques du sol et les espèces végétales présentes contribuent beaucoup moins à cette variation que l'âge lui-même.

Si on avait obtenu une relation linéaire, on aurait pu déterminer le taux moyen de fixation de carbone par année dans les jachères. Bien que cela ne soit pas possible, on peut tout de

même avoir une idée de ce taux en divisant la quantité de carbone emmagasinée à 10 ans (selon l'équation 13) par ce même nombre d'années. On obtient alors 14,6 t C ha⁻¹année⁻¹. Ce taux est nettement supérieur à ceux obtenus dans d'autres études : 9,4 t C ha⁻¹année⁻¹ (Kotto-Same et al., 1997), 3,9 à 8,5 t C ha⁻¹année⁻¹ (Palm et al., 2000), 5 à 9 t C ha⁻¹année⁻¹ (Pandey, 2002) et 11,5 t C ha⁻¹année⁻¹ (Naughton-Treves, 2004). Encore une fois, la valeur supérieure obtenue dans notre recherche s'explique probablement par le fait qu'on a considéré un plus grand nombre de sources de carbone.

5.2.3 Le carbone aérien vivant

Il existe une forte corrélation entre la quantité de carbone emmagasinée dans les arbres d'ombrage (AO) et l'âge de la jachère (r^2 de 0,998) (Figure 18a). Il en est de même entre le carbone aérien vivant (CAV) et l'âge de la jachère ($r^2 = 0,998$) (Figure 18b). Cette similitude était prévisible puisque la proportion des AO dans le CAV est en moyenne de 92 %. Les modèles quadratiques suivants décrivent les relations pour les AO et le CAV, respectivement :

$$CE_{ao} = 0,8182(A)^2 - 4,4302(A) + 7,7138 \quad (14)$$

où :

CE_{ao} = carbone emmagasiné dans les arbres d'ombrage des jachères (t C/ha)

A = âge de la jachère (années)

$$CE_{cav} = 0,8088(A)^2 - 4,346(A) + 8,7342 \quad (15)$$

où :

CE_{cav} = carbone emmagasiné dans le carbone aérien vivant des jachères (t C/ha)

A = âge de la jachère (années)

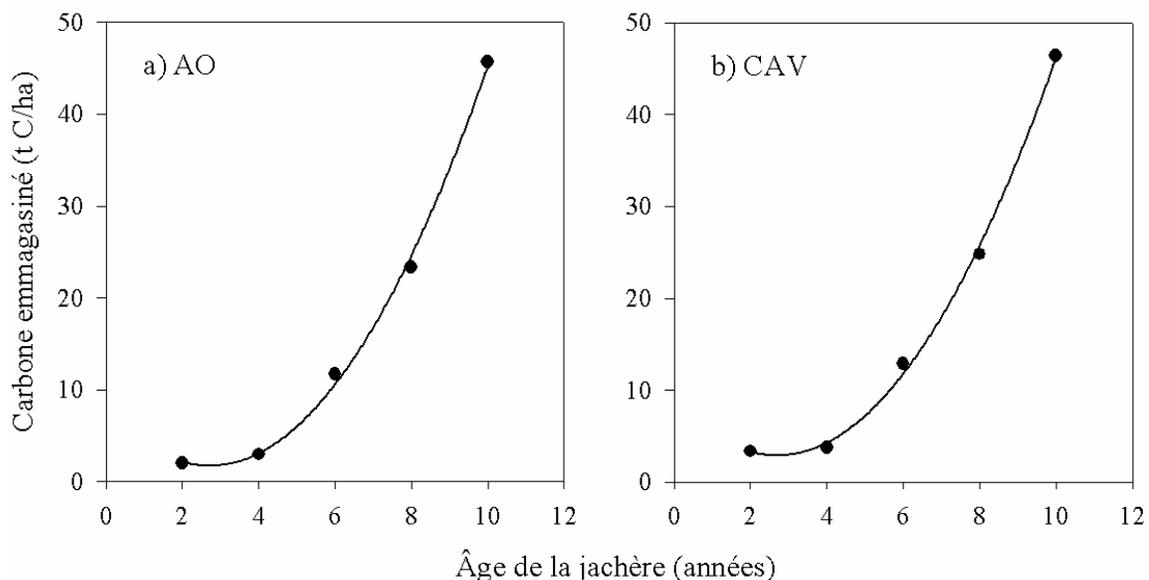


Figure 18. Quantité de carbone emmagasinée dans les arbres d’ombrage (AO) (a) et dans le carbone aérien vivant (CAV) (b) en fonction de l’âge des jachères

Les résultats pour les petits arbres issus d’une régénération naturelle (AR) n’ont cependant pas donné de relation significative ($P = 0,8239$). Cela s’explique certainement par le fait que la présence de cette composante varie beaucoup au fil du temps dans les jachères : les AR sont rapidement visibles après la récolte de la culture vivrière, puis diminuent avec l’arrivée des Musacées sauvages, pour réapparaître avec la disparition des Musacées et finalement diminuer considérablement lorsque les arbres d’ombrage prennent de l’ampleur. Cette piste d’explication mériterait cependant d’être approfondie par une étude détaillée de la succession écologique dans les jachères faisant partie d’un cycle d’agriculture migratoire.

La végétation herbacée, quant à elle, n’a pas non plus donné de relation significative avec l’âge de la jachère ($P = 0,6975$). L’emploi d’une méthodologie d’échantillonnage inappropriée (quadrats de 50 cm x 50 cm) en est certainement la cause. On aurait dû s’attendre à une diminution du carbone emmagasiné dans cette composante en fonction du temps.

5.2.4 Le carbone aérien mort

En ce qui a trait à la quantité de carbone emmagasinée dans les arbres tombés au sol (AS) en fonction du temps, la relation avec l'âge de la jachère ne s'est pas avérée significative ($P = 0,5536$). Par contre, on observe une relation linéaire pour les souches (S) ($P = 0,0022$). Ce résultat est quelque peu surprenant car on se serait attendu à ce que ces deux composantes se comportent de la même façon. Nous croyons que la relation des S ne représente en fait que l'augmentation de la visibilité de cette composante dans les jachères avec le temps, et non la dynamique réelle du carbone.

La Figure 19 illustre la relation linéaire significative entre la quantité de carbone emmagasinée dans l'humus jeune et l'âge de la jachère ($r^2 = 0,91$). Ce résultat était prévisible puisqu'on s'attend à ce que l'humus augmente avec la végétation et s'accumule donc avec le temps. Le modèle suivant a été retenu :

$$CEh = 0,1179(A) + 1,9024 \quad (16)$$

où :

CEh = carbone emmagasiné dans l'humus jeune des jachères (t C/ha)

A = âge de la jachère (années)

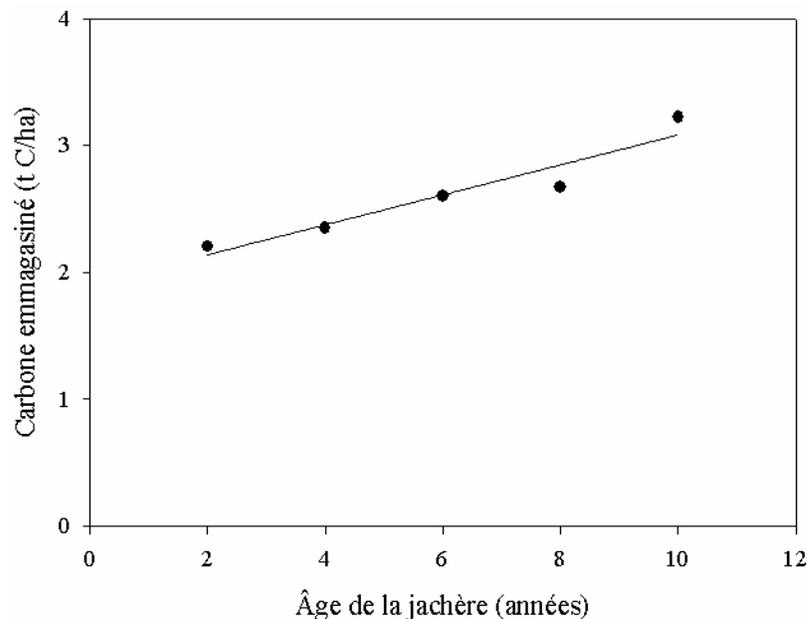


Figure 19. Quantité de carbone emmagasinée dans l'humus jeune en fonction de l'âge des jachères

Finalement, on n'observe pas de relation significative entre la quantité de carbone emmagasinée dans le carbone aérien mort (CAM) et l'âge des jachères ($P = 0,3240$). Cela est certainement dû au fait que les AS, qui ne présentent pas non plus de relation significative, contribuent fortement au CAM (66 % en moyenne).

5.2.5 Le carbone racinaire et le carbone du sol

Contrairement au carbone organique du sol, qui ne semble pas être corrélé avec l'âge de la jachère ($P = 0,4938$), la quantité de carbone emmagasinée dans le système racinaire est fortement liée à l'âge des jachères ($r^2 = 0,993$). La Figure 20 illustre cette relation hautement significative ($P = 0,0074$). Un tel résultat est logique puisqu'on s'attend à ce que la biomasse racinaire augmente avec la croissance de la végétation (voir la relation pour les AO). Le modèle quadratique suivant a donc été retenu :

$$CEr = 0,1918(A)^2 - 1,1387(A) + 5,1153 \quad (17)$$

où :

CEr = carbone emmagasiné dans le système racinaire des jachères (t C/ha)

A = âge de la jachère (années)

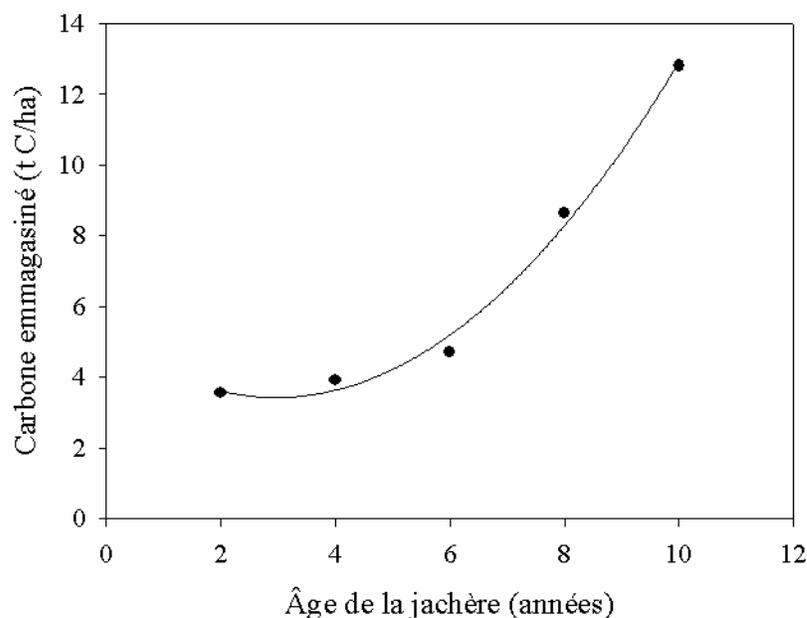


Figure 20. Quantité de carbone emmagasinée dans le système racinaire en fonction de l'âge des jachères

Les résultats présentés dans cette section démontrent bien que le carbone emmagasiné dans les jachères est fortement corrélé à l'âge de ces dernières. Les composantes du carbone qui évoluent avec le temps, de façon quadratique ou linéaire, sont le carbone aérien vivant, les arbres d'ombrage, l'humus jeune et le système racinaire. Les autres composantes n'ont pas présenté de relation significative entre le carbone et le temps, sans doute en raison d'une méthodologie d'échantillonnage inappropriée (végétation herbacée) ou d'un problème de visibilité (arbres tombés au sol, souches et carbone aérien mort). On s'attendait à ne pas observer de relation uniquement dans le cas du sol, puisque le carbone du sol, tel que démontré dans la section précédente et dans de nombreuses recherches (Kotto-Same et al., 1997; Schroth et al., 2002), varie très peu en fonction des systèmes d'utilisation de la terre et par le fait même en fonction du temps.

5.3 La rentabilité économique des systèmes

5.3.1 Superficie des fermes et des systèmes liés à l'agriculture migratoire

Suite à l'analyse des 34 questionnaires réalisés dans le cadre de l'enquête socio-économique, il apparaît que dans la zone montagneuse échantillonnée pour le carbone, les fermes ont en moyenne une superficie de 20,8 ha, dont 6,3 ha en jachère et 0,1 ha consacré à la production de cultures de subsistance (riz, maïs, haricot) (Tableau 11). Les superficies restantes sont occupées par des SAF de cacaoyers (1,4 ha), des SAF de bananiers (0,6 ha), des monocultures de bananes plantains (0,4 ha), des pâturages (2,3 ha) et des forêts (9,9 ha).

Tableau 11. Superficie moyenne des fermes et de leurs systèmes liés à l'agriculture migratoire dans les communautés de l'échantillon

	Ferme entière	Jachère	Culture vivrière
Moyenne (ha)	20,8	6,3	0,1
Médiane (ha)	10,9	3,8	0,0
Minimum (ha)	0,5	0,3	0,3
Maximum (ha)	75,0	70,0	1,5

Il ressort aussi de l'enquête que 82 % des répondants possédaient des jachères comparativement à seulement 9 % pour les cultures vivrières. Si on analyse seulement les fermes possédant des jachères, on observe alors une augmentation de la superficie moyenne de la propriété à 24,9 ha, dont 7,6 ha en jachères (les superficies consacrées aux cultures vivrières restant identiques). Les jachères occupent donc environ 30,5 % de la superficie de la ferme comparativement à seulement 0,4 % pour les cultures de subsistance.

Les données de superficies des fermes obtenues dans la présente recherche diffèrent quelque peu des résultats exposés dans l'étude de Somarriba et al. (2003). On y mentionnait que la taille moyenne des fermes se situait autour de 10 ha et que les superficies en jachères étaient très faibles. Cette différence s'explique certainement par le fait que la recherche de Somarriba et al. (2003) portait sur tous les Territoires Autochtones de Talamanca, régions de vallée et de montagne confondues. Les résultats de la présente étude semblent donc démontrer que les fermes de la zone montagneuse occupent de plus grandes superficies que celles de la vallée et qu'une part encore importante de ces superficies est occupée par des jachères. On peut ainsi conclure que la pression démographique dans les montagnes n'est pas encore trop forte en comparaison avec la région de vallée, permettant ainsi la possession de terrains plus vastes et la pratique d'une agriculture migratoire (Borge et Villalobos, 1998).

En ce qui a trait aux superficies utilisées pour les cultures de subsistance (riz, maïs et haricot), il apparaît clairement qu'elles sont de faible importance, sans doute en raison de leurs exigences en main d'œuvre (abattage de la forêt, brûlis, semis, récolte, etc.), particulièrement pour le riz. Somarriba et al. (2003) avaient aussi observé que ces cultures n'étaient maintenant produites que dans les zones éloignées, car elles sont destinées uniquement à la consommation familiale.

5.3.2 Description des modèles de production

À l'aide de l'enquête socio-économique et des diverses informations récoltées lors d'échanges avec les informateurs clés (voir l'Annexe 9), un modèle de production a été

développé pour chacun des systèmes de culture étudiés, soit le cacao, la banane, le riz et le maïs. Ces modèles permettent de décrire les systèmes de production et les coûts et bénéfices associés à ces derniers, afin de servir de base au calcul de la rentabilité économique. Il est important de mentionner que les modèles générés tentent de représenter la réalité des systèmes présents dans les Territoires Autochtones bien qu'on retrouve une grande hétérogénéité entre les fermes²². Il faut donc garder à l'esprit que les résultats ici obtenus ne permettent que d'émettre des conclusions fort générales sur la rentabilité des systèmes étudiés. Une recherche beaucoup plus approfondie, menée par un économiste, permettrait de générer des résultats beaucoup plus fiables. Cette partie de la présente étude n'avait donc qu'une visée exploratoire.

Systèmes agroforestiers

Le modèle de production du cacao choisi est caractérisé par une densité de plantation de 1111 plantes/ha (3 m x 3 m). Puisque la façon la plus fréquente de vendre le cacao est à l'état frais (comparativement à sa forme fermentée ou séchée), les rendements et les prix sur le marché ont été évalués sur cette base. Ainsi, le prix moyen de vente est de 0,52 \$US/kg. La production commerciale débute à la troisième année avec des rendements de 300 kg/ha, puis augmente à la quatrième année à 400 kg/ha pour finalement se stabiliser à la cinquième année à 500 kg/ha. Le modèle de production de la banane choisi est quant à lui caractérisé par une densité de plantation de 1111 plantes/ha, un prix de vente de 0,094 \$US/kg et une production annuelle d'environ 9100 kg/ha (qui débute dès la première année après l'établissement de la parcelle).

Céréales

Le riz est produit une fois par année avec la technique du *quemado* (voir la section 4.2.1) et présente des rendements de l'ordre de 1200 kg/ha. Le maïs, quant à lui, est plutôt produit avec la méthode du *tapado* (voir la section 4.2.1) puisque cette dernière est moins exigeante en main d'œuvre. Deux cycles de culture par année ont été considérés avec des rendements de 960 kg/ha (sous forme d'épis) par récolte. Bien que la production des céréales soit

²² Les facteurs qui expliquent cette hétérogénéité sont multiples : densités de plantation; mélanges de cultures; type, fréquence et intensité des soins portés aux cultures; source et qualité du matériel de plantation; rendements; etc.

généralement toute consommée par la famille, un prix de vente sur le marché a été estimé afin de comparer la rentabilité des systèmes, soit 0,3 \$US/kg pour le riz et 0,16 \$US/kg pour le maïs.

5.3.3 L'évaluation de la rentabilité économique des systèmes de culture

Coûts et bénéfices

Les modèles de production ont été développés pour un hectare de culture. Les coûts associés aux différentes activités de production (établissement, entretien et récolte) et les coûts d'achat de matériel sont présentés aux Annexes 14 et 15, conjointement avec les revenus générés par les systèmes. L'achat de matériel n'a été inclus que dans la première année, pour les cultures pérennes, et seulement dans le premier cycle de production annuel, pour le riz et le maïs. La valeur d'une journée (4 heures) de travail d'un journalier dans les Territoire Autochtones se situe à 4,16 \$US/jour. Le coût de transport de la récolte jusqu'au point de vente a été estimé à 6,25 \$US par voyage, ce qui correspond au temps de travail et aux frais associés à la location d'un cheval, d'un bateau ou d'une voiture.

Il importe ici de mentionner que les bénéfices générés par les arbres d'ombrage dans les SAF, soient les fruits, le bois de chauffe et le bois d'œuvre, n'ont pas été comptabilisés dans l'étude économique en raison d'une trop grande variation entre les fermes (densité des arbres, niveaux de maturité des arbres, taux d'approvisionnement, besoins des familles, etc.). Il est donc important de garder à l'esprit que de tels bénéfices supplémentaires peuvent être associés aux SAF, et qu'ils se retrouvent en plus grande quantité dans les SAF de cacaoyers que de bananiers.

Scénarios d'analyse économique

Dans un souci de représenter la réalité avec une plus grande précision, il a été décidé de développer deux scénarios pour l'analyse économique. Le premier considère tous les coûts de la main d'œuvre au prix du marché et inclut les dépenses liées à l'achat des semences lors de la plantation. C'est un modèle qui permet de comparer la rentabilité financière théorique des systèmes étudiés (VAN et rapport B/C). Le second scénario considère

seulement 25 % de la main d'œuvre comme un coût. En effet, sur les fermes des Territoires Autochtones, la majorité de la main d'œuvre nécessaire à la réalisation des activités de production provient de la famille et n'est donc pas rémunérée directement. Aussi, dans ce scénario, les semences sont gratuites, ce qui reflète mieux la réalité : les plantations de cacaoyers retrouvées actuellement dans la région ont été établies suite à des donations de divers projets, les rejets de bananiers proviennent de champs appartenant à la famille ou aux voisins et les semences de céréales sont issues de la récolte précédente. Le second scénario permet ainsi d'estimer un indicateur financier supplémentaire : la valeur à laquelle est rémunérée la main d'œuvre familiale.

Indicateurs de rentabilité financière

Le Tableau 12 présente les résultats des différents indicateurs de rentabilité financière pour les deux scénarios et les quatre systèmes de culture étudiés. On observe dans le scénario 1 que la production de cacao n'est pas rentable en termes financiers puisque que la VAN est de $-48,74 \text{ \$US ha}^{-1} \text{ année}^{-1}$. De plus, pour chaque dollar investi, l'agriculteur ne retire que 0,63 \$ de bénéfices. Le scénario 2 nous permet de conclure que la main d'œuvre familiale est sous-rémunérée (2,5 \$US/jour) comparativement à la valeur du journalier sur le marché (4,16 \$US/jour).

Dans le cas de la production de bananes, l'activité semble rentable puisque une VAN positive de $61,88 \text{ \$US ha}^{-1} \text{ année}^{-1}$ a été obtenue. Le rapport B/C est supérieur à 1 (1,21) ce qui laisse aussi présager une rentabilité financière intéressante. Par ailleurs, la valeur de la main d'œuvre familiale est supérieure au coût d'opportunité du marché avec 6,1 \$US/jour.

L'analyse des résultats économiques des céréales est un peu plus difficile. Sur une base financière, on observe que la production de riz n'est pas rentable puisque le bénéfice net est négatif ($-112,0 \text{ \$US ha}^{-1} \text{ année}^{-1}$), le rapport B/C est inférieur à 1 (0,76) et la valeur de la main d'œuvre familiale est inférieure au prix du marché (2,8 \$US/jour). À l'inverse, la production de deux cycles de culture de maïs par année semble beaucoup plus rentable, s'approchant même de la rentabilité de la production de bananes, avec un bénéfice net

positif de 43,0 \$US ha⁻¹ année⁻¹, un rapport B/C supérieur à 1 (1,16) et une valeur de la main d'œuvre familiale supérieure au prix du marché (5,3 \$US/jour).

Tableau 12. Résultats des différents indicateurs de rentabilité financière pour les deux scénarios et les quatre systèmes de culture étudiés (par hectare et par année)

Systèmes de culture	Scénario 1 (100 % MO)	Scénario 2 (25 % MO)
SAF de cacaoyers		
VAN (\$US ha ⁻¹ année ⁻¹)	-48,74	38,84
B/C	0,63	1,89
Valeur MO familiale (\$US jour ⁻¹)	-	2,5
SAF de bananiers		
VAN (\$US ha ⁻¹ année ⁻¹)	61,88	238,46
B/C	1,21	2,90
Valeur MO familiale (\$US jour ⁻¹)	-	6,1
Riz		
Bénéfice net (B-C) (\$US ha ⁻¹ année ⁻¹)	-112,0	218,70
B/C	0,76	2,55
Valeur MO familiale (\$US jour ⁻¹)	-	2,8
Maïs (2 cycles de production)		
Bénéfice net (B-C) (\$US ha ⁻¹ année ⁻¹)	43,0	205,20
B/C	1,16	3,01
Valeur MO familiale (\$US jour ⁻¹)	-	5,3

VAN = valeur actualisée nette, B/C = relation bénéfices (BB) divisés par les coûts (CO), MO = main d'œuvre

5.3.4 L'analyse de la rentabilité économique des systèmes de culture

Les valeurs des indicateurs financiers pour les systèmes étudiés ne permettent pas de conclure clairement qu'une culture est plus intéressante qu'une autre en raison du fait que ces rentabilités économiques sont plutôt théoriques et ne reflètent qu'une partie de la réalité observée sur le terrain.

Par exemple, la presque totalité de la récolte des céréales (riz et maïs) est consommée par la famille. Attribuer une valeur marchande à cette production fausse la réalité car les agriculteurs n'en retirent en fait aucun revenu monétaire. De plus, il semble que la raison de cultiver des céréales ne soit pas seulement économique, mais relève aussi de facteurs culturels et de considérations liées à la sécurité alimentaire (puisque les routes et les chemins sont souvent barrés lors des inondations fréquentes, par exemple) et à l'utilisation du territoire²³ (Borge et Villalobos, 1998; Otárola, 2005). La production du riz et du maïs est également une réponse au fait que les agriculteurs ont peu d'argent liquide permettant d'acheter quotidiennement ces denrées sur le marché.

L'estimation de la rentabilité des céréales est aussi en grande partie fictive parce que la main d'œuvre utilisée provient presque uniquement de corvées familiales et communautaires (appelées *junta de trabajo*²⁴). La production de riz est une activité particulièrement exigeante en main d'œuvre (106 journaliers/année) compte tenu de la faible récolte qui en est tirée. En comparaison, la culture du maïs semble être un peu plus rentable puisque moins demandante en main d'œuvre (52 journaliers/année).

En ce qui a trait à culture du cacaoyer, cette dernière ne semble pas rentable lorsque toute la main d'œuvre est rémunérée au prix du marché et lorsque les semences ont été achetées pour la plantation. Par contre, la très grande majorité des parcelles de cacaoyers retrouvées actuellement dans les Territoires Autochtones ont été établies dans le cadre d'activités de projets de recherche et d'organismes de charité. De plus, bien que la valeur de la main d'œuvre familiale soit inférieure au prix du marché (2,5 \$US/jour < 4,16 \$US/jour), il n'existe pas réellement de coût d'opportunité de cette main d'œuvre puisque les occasions de travailler à l'extérieur de la ferme dans les Territoires Autochtones sont presque

²³ Dans les Territoires Autochtones de Talamanca, il n'existe pas de droits de propriété terrienne comme tel. Les agriculteurs occupent les terres de leurs familles ou vont défricher des parcelles encore non exploitées dans la forêt. La culture de céréales répondrait donc, entre autres, à un besoin d'utiliser certaines superficies de sa ferme afin de marquer ses droits d'utilisation de la terre (Borge et Villalobos, 1998).

²⁴ La *junta de trabajo* est une activité qui consiste à rassembler plusieurs membres d'une même famille ou d'une même communauté afin d'effectuer un travail agricole exigeant plus rapidement (ex. plantation, récolte, etc). Le producteur chez qui les travaux sont réalisés offre la nourriture et la boisson toute la journée et participe ultérieurement aux autres *junta* de son village (Borge et Villalobos, 1998).

inexistantes. La production de cacao permet donc d'une certaine façon de créer de l'emploi pour les agriculteurs (bien que sous-payé). La culture de la banane semble quant à elle plus rentable et génère un travail rémunéré plus cher que le «prix du marché». Cela est important compte tenu du fait qu'elle nécessite aussi une plus grande quantité de main d'œuvre que la production de cacao (93 journaliers/année versus 45 en moyenne).

Outre les résultats des indicateurs financiers, il est important de comprendre la logique économique sous-jacente à la production des deux cultures pérennes. Ainsi, le cacao représente plutôt une épargne pour la famille puisque ses récoltes sont concentrées sur quelques périodes de l'année et exige relativement peu de main d'œuvre. La production du bananier génère quant à elle une entrée d'argent régulière car les récoltes se font toutes les deux semaines. Cela explique pourquoi la majorité des agriculteurs possèdent conjointement ces deux systèmes de culture sur leurs fermes.

5.3.5 La relation entre rentabilité économique et séquestration du carbone

De nombreuses études ont comme objectif de déterminer le prix auquel devraient être vendues les unités de réduction certifiée des émissions (URCE) pour initier un changement d'utilisation de la terre (Newell et Stavins, 2000; Van Kooten et al., 2004; Olschewski et Benítez, 2005). En d'autres termes, elles tentent de déterminer le coût d'opportunité de la séquestration du carbone²⁵. Malheureusement, une telle analyse n'a pu être réalisée dans le cadre de la présente recherche pour deux raisons principales.

Tout d'abord, les URCE étant actuellement basées sur des augmentations de captation de carbone (par rapport au *baseline* – voir la section 2.1.2.2), il est nécessaire de connaître le taux de séquestration du carbone par année ($t\ C\ ha^{-1}\ année^{-1}$) (Palm et al., 2000) pour déterminer le coût d'opportunité. Cependant, dans la présente recherche, il n'a pas été possible de déterminer ce taux dans les SAF de cacaoyers puisque les plantations actuelles

²⁵ Le coût d'opportunité de la séquestration du carbone se définit comme la compensation financière minimum par tonne de CO₂ qu'un agriculteur doit recevoir pour changer son mode d'utilisation de la terre (ex. passer d'un pâturage à une forêt) (Olschewski et Benítez, 2005).

ont toutes été établies à la même période, c'est-à-dire il y a entre 15 et 20 ans. En ce qui a trait aux SAF de bananiers, l'âge des parcelles ne fournit de l'information que sur les bananiers et non pas sur les arbres d'ombrage (composante contribuant majoritairement au carbone aérien vivant) qui étaient là bien avant l'installation du système. Il serait donc intéressant de réaliser une nouvelle étude, à plus long terme et en conditions expérimentales, qui viserait à établir des SAF de cacaoyers et de bananiers et à mesurer l'évolution de la séquestration du carbone dans le temps. Une recherche d'une telle envergure pourrait aussi être remplacée par l'utilisation de la modélisation, comme l'offre le logiciel CO2FIX (Maserà et al., 2003).

Un autre aspect qui a empêché le calcul du coût d'opportunité dans la présente étude est le manque d'exactitude des rentabilités économiques obtenues pour les systèmes étudiés (voir la section précédente). Ces rentabilités, trop théoriques, ne permettent pas de bien exprimer la logique d'utilisation de la terre des agriculteurs des Territoires de Talamanca. Une recherche détaillée menée par un économiste permettrait certainement de pallier cette faiblesse. Il est tout de même important de rappeler que la présente recherche n'avait pas comme objectif de déterminer ce coût d'opportunité, mais seulement de fournir quelques éléments de réflexion concernant la rentabilité économique des systèmes étudiés.

5.4 Réflexions et préoccupations sur le commerce du carbone dans le cadre de projets MDP

Au-delà de l'incertitude liée à la précision de l'estimation du carbone séquestré (Gupta et al., 2003), la vente de carbone via les URCE générées par l'intermédiaire des projets de mécanisme pour un développement propre (MDP) soulève encore quelques interrogations majeures autant au plan scientifique que socio-économique. Cette section tente d'amorcer une réflexion sur le marché du carbone qui se met actuellement en place dans le monde et sur les objectifs qui sont visés par un tel commerce.

5.4.1 Des préoccupations de nature scientifique

5.4.1.1 Le changement d'affectation des terres : déplacement du problème ?

Si des terres anciennement dévouées à l'agriculture migratoire pour la production de denrées de subsistance, telles que le maïs, le riz et le haricot, sont converties en systèmes agroforestiers, la production de ces cultures vivrières va nécessairement diminuer (puisque'une certaine partie de la superficie sera maintenant occupée par des arbres). Le pari que les chercheurs et les producteurs font est que le nouveau système générera des profits suffisants pour combler le manque à gagner en aliments de subsistance (en s'approvisionnant sur les marchés). Ce qui signifie que cette diminution de la production agricole devra presque nécessairement être compensée ailleurs... L'IPCC (2003) suggère donc fortement aux projets de MDP comme alternative à l'agriculture migratoire de s'assurer que de nouvelles terres ne seront pas défrichées afin de compenser pour les anciennes terres maintenant dédiées à la captation de carbone (avec un système agroforestier). Mais comment s'assurer réellement que ce phénomène ne se produira pas ? La question demeure.

5.4.1.2 Le concept d'additionnalité des projets MDP

De nombreux auteurs questionnent le concept d'«additionnalité» qui doit caractériser les projets MDP. Mathy (2005) expose les composantes multidimensionnelles de ce concept. L'additionnalité environnementale, telle que prescrite dans les exigences des projets MDP, peut s'évaluer relativement facilement lorsque le niveau de référence a été bien mesuré (bien que dans certains cas cette mesure soit bien difficile à réaliser). Mais lorsqu'on parle d'«additionnalité développementale», l'opération devient beaucoup plus compliquée puisqu'il faut définir ce développement et déterminer comment le mesurer : parle-t-on de «développement en terme de croissance économique, d'indicateurs de développement humain, de diminution des inégalités de revenus, d'accès aux services essentiels ?» (Mathy, 2005). Il serait important d'harmoniser ces concepts pour mieux les traduire dans des projets réels.

L'exigence d'«additionnalité» empêche aussi actuellement d'inclure la protection de forêts déjà existantes dans les projets de MDP (UNEP, 2005), alors qu'on sait très bien que la déforestation est une cause importante de l'augmentation des niveaux de GES dans l'atmosphère (Naughton-Treves, 2004).

5.4.2 Des préoccupations de nature socio-économique

5.4.2.1 La permanence des crédits de carbone

La question de la permanence des crédits de carbone est un sujet sur lequel de nombreux auteurs se sont penchés. Dans une brochure d'information destinée aux agriculteurs canadiens, le Ministère de l'agriculture et de l'agroalimentaire du Canada (2003a) déconseille fortement aux producteurs de signer des accords permanents de vente de crédit de carbone avec les acheteurs, et propose plutôt des crédits de carbone à bail. «Créer un puits est une chose, le maintenir en est une autre» (Ministère de l'agriculture et de l'agroalimentaire du Canada, 2003a). Bien que ce conseil concerne principalement les puits de carbone dans les sols, une réflexion semblable peut être appliquée aux systèmes agroforestiers.

Marland et al. (2001) suggèrent aussi de louer les URCE plutôt que de les vendre dans les cas où la permanence de la séquestration du carbone n'est pas certaine ou non désirable. D'ailleurs, Maréchal et Hecq (2006) proposent la vente de crédits temporaires pour pallier la non-permanence de la séquestration du carbone dans les forêts (et par le fait même dans les systèmes agroforestiers). Ils arguent que cela offre de nombreux avantages tant sur le plan environnemental qu'économique. Bien que l'attribution d'URCE temporaires soit possible depuis tout récemment selon les mécanismes du Protocole, leur utilisation concrète est encore à démontrer.

5.4.2.2 Les coûts de transaction élevés des projets MDP

Michaelowa et al. (2003) ont réalisé une étude portant sur les coûts de transaction liés aux mécanismes de flexibilité du Protocole de Kyoto. Ces frais se résument essentiellement au développement du scénario de référence, à la vérification des taux de séquestration et à la certification des URCE. Il en ressort que ces frais sont très élevés pour les petits projets (les montants diminuent avec une augmentation de l'importance des projets grâce aux économies d'échelle). Les auteurs avancent même que des projets générant moins de 50 000 t CO₂ équivalant ne sont pas viables. Mathy (2005) arrive aussi à cette conclusion que les coûts de transaction élevés découragent la réalisation de petits projets. Or, les projets agroforestiers sont souvent de petits projets en lien direct avec les producteurs. Michaelowa et al. (2003) proposent donc de développer des règles spéciales pour favoriser ces initiatives de plus petite envergure. Mais aucune mesure concrète n'a encore été prise.

5.4.2.3 La variation des prix de vente des crédits de carbone

Une autre inquiétude face au marché du carbone concerne la variation des prix de vente des URCE. En 2003, elles valaient entre 1 et 9 € la tonne de CO₂ équivalant (Michaelowa et al., 2003). Elles ont ensuite augmenté jusqu'à 20 € à la fin de 2005, pour finalement redescendre à 16 € au mois de juillet 2006 (Point Carbon, 2005a). Ces prix évolueront selon l'offre et la demande et la majorité des estimés actuels convergent vers une augmentation soutenue. Par ailleurs, on peut aussi se préoccuper de la possibilité que ce produit devienne rapidement l'objet de spéculations boursières, ce qui aura des effets encore inconnus. Pour les producteurs, ce facteur d'insécurité revêt une importance primordiale dans leur choix d'affectation de leurs terres : agriculture ou agroforesterie et captation de carbone ?

6 Conclusion

Le Protocole de Kyoto et le marché mondial du carbone sont l'occasion pour de petits pays, comme le Costa Rica, de profiter d'un apport financier et technique pour développer des systèmes agraires durables via l'implantation de projets de séquestration du carbone.

Il ressort de la présente étude que les systèmes agroforestiers tendent à emmagasiner une quantité de carbone supérieure aux jachères issues d'une agriculture migratoire. De plus, le potentiel de captation est nettement plus important dans les SAF de cacaoyers sous ombrage que dans les SAF de bananiers sous ombrage. Bien que la majorité du carbone soit séquestrée dans le sol, il semble beaucoup plus facile de faire varier les stocks de cet élément dans la biomasse aérienne. Ainsi, le SAF de cacaoyers semble constituer une solution de rechange réelle et intéressante au système d'agriculture migratoire tel que pratiqué dans la région de Talamanca au Costa Rica.

Cependant, pour que cette pratique soit adoptée par les agriculteurs, l'établissement de plantations de cacaoyers devra être encadré par un projet fournissant gratuitement les semences. Aussi, bien que la culture du bananier sous ombrage présente un potentiel de captation de carbone relativement faible, il y a peu de chance que les agriculteurs la délaissent dans un contexte de rétribution monétaire du carbone puisque cette pratique offre une entrée d'argent régulière essentielle au bon déroulement des activités familiales. Cette culture est donc complémentaire à celle du cacaoyer qui représente une épargne sur pied pour le producteur.

Enfin, si l'on vise l'abandon de la pratique de l'agriculture migratoire dans la région, il est primordial de garder à l'esprit que plusieurs facteurs autres que monétaires régissent les stratégies de production des agriculteurs, notamment des facteurs culturels, des facteurs liés à la sécurité alimentaire et des facteurs liés à l'utilisation du territoire. De plus, il ne faut pas oublier que de nombreuses interrogations subsistent quant à l'établissement et au fonctionnement du marché mondial du carbone encadré par le Protocole de Kyoto.

7 Références bibliographiques

- Alberta Environmentally Sustainable Agriculture Council. 2000. *Greenhouse gas emissions, Alberta's Cropping Industry*. Alberta Government - Agriculture, Food and Rural Development, Edmonton, Canada, no 5. 4 p.
- Alberta Environmentally Sustainable Agriculture Council. 2001. *Greenhouse gas emissions, trading and agriculture – Risk and opportunities*. Alberta Government - Agriculture, Food and Rural Development, Edmonton, Canada, no 7. 4 p.
- Albrecht, A. et Kandji, S.T. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 99: 15-27.
- Alpizar, L., Fassbender, H.W., Heuvelop, J., Fölster, H. et Enríquez, G. 1986. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. I. Inventory of organic matter and nutrients. *Agroforestry Systems*. 4: 175-189.
- Alvarado, J., López de León, E. et Medina, B. 1999. Cuantificación estimada del dióxido de carbono fijado por el agroecosistema café en Guatemala. *Boletín PROMECAFE* (IICA). 81: 7-14.
- Ávila, G., Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M. et Ibrahim, M. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*. 8 (30): 32-35.
- Beaudoin, M. 1997. *Propriétés physico-mécaniques du bois*. p. 1301. Dans «Manuel de foresterie», Les Presses de l'Université Laval, publié en collaboration avec l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Québec, Canada, 1428 p.
- Beer, J., Bonnemann, A., Chavez, W., Fassbender, H.W., Imbach, A.C. et Martel, I. 1990. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) or poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. *Agroforestry Systems*. 12: 229-249.
- Beer, J., Muschler, R. et Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*. 38: 1139-1164.

- Beer, J., Harvey, C., Ibrahim, M., Harmand, J.M., Somarriba, E. et Jiménez, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas*. 10(37-38): 80-87.
- Boer, G.J., Flato, G. et Ramsden, D. 2000. A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: Projected climate to the twenty-first century. *Climate Dynamics*. 16(6): 427-450.
- Borge, C. et Villalobos, V. 1998. *Talamanca en la encrucijada*. Editorial Universidad Estatal a Distancia (EUNED), San José, Costa Rica, 140 p.
- Brown, S.L., Schroeder, P. et Kern, J.S. 1999. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management*. 123: 81-90.
- Cairns, M.A., Brown, S., Helmer, E.H. et Baumgardner, G.A. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*. 111: 1-11.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 1994. *Laurel (Cordia alliodora), especie de árbol de uso múltiple en América Central*. Colección de Guías Silviculturales No 16, Serie Técnica, Informe Técnico No. 239, Turrialba, Costa Rica, 52 p.
- CCNUCC (Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques). 2005. *Préserver le climat*. Guide de la Convention sur les changements climatiques et du Protocole de Kyoto, Bonn, Allemagne, 41 p.
- Clutter, J., Fortson, J.C., Pienaar, L.V., Brister, G.H. et Bailey, R.L. 1983. *Forest Finance*, Chapter 5. Part 2: Financial aspects of timber management, Dans «Timber management: a quantitative approach», John Wiley & Sons, New York, USA, 333 p.
- De Jong, B.H.J., Tipper, R. et Montoya-Gómez, G. 2000. An economic analysis of the potential for carbon sequestration by forests: evidence from southern Mexico. *Ecological Economics*. 33: 313-327.
- Dixon, R.K. 1995. Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases? *Agroforestry Systems*. 31: 99-116.
- Fearnside, P.M. 1997. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*. 90: 59-87.

- GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2000. *L'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie*. Résumé à l'intention des décideurs. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 30 p.
- GIEC. 2001. *Bilan 2001 des changements climatiques: mesures d'atténuation*. Rapport du groupe de travail III du GIEC. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 93 p.
- Gupta, J., Olsthoorn, X. et Rotenberg, E. 2003. The role of scientific uncertainty in compliance with the Kyoto Protocol to the Climate Change Convention. *Environmental Science & Policy*. 6: 475-486.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-use Change and Forestry (LULUCF)*. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan, s.p.
- Jawson, M.D., Shafer, S.R., Franzluebbers, A.J., Parkin, T.B. et Follett, R.F. 2005. GRACEnet: Greenhouse gas reduction through agricultural carbon enhancement network. *Soil & Tillage Research*. 83: 167-172.
- Kotto-Same, J., Woomer, P.L., Appolinaire, M. et Louis, Z. 1997. Carbon dynamics in slash-and-burn agriculture and land use alternatives of the humid forest zone in Cameroon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 65: 245-256.
- Lal, R. et Bruce, J.P. 1999. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Environmental Science & Policy*. 2: 177-185.
- Lal, R. 2003. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 22(2): 151-184.
- MacDiken, K.G. 1997. *A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*. Forest Carbon Monitoring Program. Winrock International Institute for Agricultural Development, Arlington, USA, 91 p.
- MAE (Ministère des affaires étrangères), CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) et GRET (Groupe de recherche et d'échanges technologiques). 2002. *Mémento de l'agronome*. Paris, France. 1691 p.
- Maréchal, K. et Hecq, W. 2006. Temporary credits: A solution to the potential non-permanence of carbon sequestration in forests? *Ecological Economics*. 58: 699-716.

- Marland, G., Fruit, K. et Sedjo, R. 2001. Accounting for sequestered carbon: the question of permanence. *Environmental Science & Policy*. 4: 259-268.
- Masera, O.R., Garza-Caligaris, J.F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski J., Nabuurs, G.J., Pussinen, A., De Jong, B.H.J. et Mohren, G.M.J. 2003. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling*. 164: 177-199.
- Mathy, S. 2005. Le mécanisme pour un développement propre : à la recherche d'une synergie entre environnement et développement. *Liaison Énergie-Francophonie. Économie de l'environnement et des ressources naturelles*. 66-67: 136-140.
- Michaelowa, A., Stronzik, M., Eckermann, F. et Hunt, A. 2003. Transaction costs of the Kyoto Mechanisms. *Climate Policy*. 3: 261-278.
- Miles, E.L. 2004. *Beyond the Kyoto/Marrakech protocol: options and strategies*. p. 23-35. Dans «Climate change, carbon, and forestry in Northwestern North America: Proceedings of a workshop, November 14-15, 2001, Orcas Island, Washington», United States Department of Agriculture. General Technical Report, s.p.
- Ministère de l'agriculture et de l'agroalimentaire du Canada. 2003a. *Le réchauffement du globe et l'agriculture – Crédits de carbone*. Conseil de conservation des sols, Canada. 2(1):1-2.
- Ministère de l'agriculture et de l'agroalimentaire du Canada. 2003b. *Le réchauffement du globe et l'agriculture – Les meilleures techniques de gestion*. Conseil de conservation des sols, Canada. 2(2):1-2.
- Ministère de l'environnement du Canada. 2005. *Une introduction au changement climatique – Une perspective canadienne*. Toronto, Canada, 55 p.
- Ministère des ressources naturelles du Canada. 2004. *Un temps de changement : Le changement climatique au Québec*. Page consultée le 26 juin 2006. http://adaptation.nrcan.gc.ca/posters/articles/qb_01_fr.asp?Region=qb
- Ministère des ressources naturelles du Québec. 2003. *Contexte, enjeux et orientation sur la mise en œuvre du Protocole de Kyoto au Québec*. Document de référence aux fins des audiences générales de la commission parlementaire sur les transports et l'environnement. Québec, Canada, 36 p.

- Mitchell Aide, T., Zimmerman, J.K., Pascarella, J.B., Rivera, L. et Marcano-Vegas, H. 2000. Forest regeneration in chronosequence of tropical abandoned pastures: implications for restoration ecology. *Restoration Ecology*. 8(4): 328-338.
- Montagnini, F. et Nair, P.K.R. 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*. 61: 281-295.
- Mossu, G. 1990. *Le cacaoyer*. Le technicien d'agriculture tropicale. Volume 14, Éditions Maisonneuve et Larose, Paris, France, 160 p.
- Nair, P.K.R. 1993. *An introduction to agroforestry*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas, 499 p.
- Naughton-Treves, L. 2004. Deforestation and carbon emissions at tropical frontiers: A case study from the Peruvian Amazon. *World Development*. 32(1): 173-190.
- Nelson, D.W. et Sommers, L.E. 1996. *Total carbon, organic carbon and organic matter*. p. 961-1010. Dans «Methods of soil analysis, Part 3. Chemical Methods», Soil Society of America, Books Series no.5, Madison, Wisconsin, USA, s.p.
- Newell, R. et Stavins, R. 2000. Climate change and forest sinks: Factors affecting the costs of carbon sequestration. *Journal of Environmental Economics and Management*. 40(3): 211-235.
- Oelbermann, M., Voroney, R.P. et Gordon, A.M. 2004. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 104: 359-377.
- Olschewski, R. et Benítez, P.C. 2005. Secondary forests as temporary carbon sink? The economic impact of accounting methods on reforestation projects in the tropics. *Ecological Economics*. 55: 380-394.
- Osei-Bonsu, K., Opoku-Ameyaw, K., Amoah, F.M. et Oppong, F.K. 2002. Cacao-coconut intercropping in Ghana: agronomic and economic perspectives. *Agroforestry Systems*. 55: 1-8.
- Otárola, M. 2005. *Estudio de rentabilidad de los sistemas productivos de las pobladores indígenas de los Territorios Indígenas Bribri y Cabécar*. Informe final de consultoría, Turrialba, Costa Rica, 42 p.

- Pallardy, S.G., Gibbins, D.E. et Rhoads, J.L. 2003. Biomass production by two-year-old poplar clones on floodplain sites in the Lower Midwest, USA. *Agroforestry Systems*. 59: 21-26.
- Palm, C.A., Woomer, P.L., Alegre, J., Arevalo, L., Castilla, C., Cordeiro, D.G., Feigl, B., Hairiah, K., Kotto-Same, J., Mendes, A., Moukam, A., Murdiyarso, D., Njomgang, R., Parton, W.J., Ricse, A., Rodrigues, V., Sitompul, S.M. et Van Noordwijk, M. 2000. *Carbon sequestration and trace gas emissions in slash-and-burn and alternative land-uses in the humid tropics*. Final Report, Alternatives to Slash and Burn (ABS). Climate Change Working Group, Phase II. ICRAF, Nairobi, Kenya. 29 p.
- Pandey, D.N. 2002. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Climate Policy*. 2: 367-377.
- Point Carbon. 2005a. *Carbon price forecasts and analysis of greenhouse gas emissions trading markets*. Page consultée le 14 juillet 2006. www.pointcarbon.com/category364.html.
- Point Carbon. 2005b. *Pays assujettis au Protocole de Kyoto*. Page consultée le 9 juin 2006. www.pointcarbon.com/article.php?articleID=6138&categoryID=364
- Proyecto LUCCAM. 2005. Allometric models for biomass estimation in secondary forests, San Carlos municipal district, Nicaragua. Proyecto Cambio de uso de la tierra y flujos de carbono para Centroamérica. CATIE-Universidad de Helsinki (Finlandia), Document en préparation, s.p.
- Roshetko, J.M., Delaney, M., Hairiah, K. et Purnomosidhi, P. 2002. Carbon stocks in Indonesian homegarden systems : Can smallholder systems be targeted for increased carbon storage? *American Journal of Alternative Agriculture*. 17(2): 138-148.
- Saint-Clair, P.M. 1989. *Les cultures importantes de l'espace tropical. Tome I – Les cultures industrielles*. Les entreprises Papyrus, Neufchâtel, France, 137 p.
- Schroeder, P.E., Dixon, R.K. et Winjum, J.K. 1993. Ordenación forestal y agrosilvicultura para reducir el dióxido de carbono atmosférico. *Unasylva*. 173(44): 52-60.
- Schroth, G., Lehmann, J., Rodrigues, M.R.L., Barros, E., et Macedo, J.L.V. 2001. Plant-soil interactions in multistrata agroforestry in the humid tropics. *Agroforestry Systems*. 53(2): 85-102.
- Schroth, G., D'Angelo, S.A., Teixeira, W.G., Haag, D. et Lieberei, R. 2002. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia:

consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. *Forest Ecology and Management*. 163: 131-150.

Segura, M.A. 1999. *Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el área de conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica*. Tesis (M. Sc.), CATIE, Turrialba, Costa Rica, 119 p.

Segura, M. et Kanninen, M. 2002. *Inventarios para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales*. Dans Orozco, L. et Brumér, C. «Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central». Serie Técnica, Manual Técnico No. 50, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 264 p.

Segura, M. et Kanninen, M. 2005. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica* 37(1): 2-8.

Segura, M., Andrade, H., Somarriba, E., et Villalobos, M. 2005a. Modelos alométricos para estimar biomasa arriba del suelo en las especies más dominantes de cacaotales en Talamanca. Document en préparation, s.p.

Segura, M., Kanninen, M. et Suárez, D. 2005b. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee plants in agroforestry systems in Matagalpa, Nicaragua. Submitted to *Agroforestry Systems*, s.p.

Sharrow, S.H. et Ismail, S. 2004. Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA. *Agroforestry Systems*. 60: 123-130.

Shively, G.E., Zelek, C.A., Midmore, D.J. et Nissen, T.M. 2004. Carbon sequestration in a tropical landscape: an economic model to measure its incremental cost. *Agroforestry Systems*. 60: 189-197.

Silver, W.L., Ostertag, R. et Lugo, A.E. 2000. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. *Restoration Ecology*. 8(4): 394-407.

Somarriba, E., Meléndez, L., Campos, W. et Lucas, C. 1995. *Cacao bajo sombra de maderables en Puerto Viejo, Talamanca, Costa Rica: manejo, crecimiento y producción de cacao y madera*. Serie Técnica. Informe Técnico No 249. Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ, Serie Generación y Transferencia de Tecnología No 10. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 73 p.

Somarriba, E., Trivelato, M., Villalobos, M., Suárez, A., Benavides, P., Moran, K., Orozco, L. et López, A. 2003. Diagnóstico agroforestal de pequeñas fincas cacaoteras orgánicas

de indígenas Bribri y Cabécar de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*. 10(37-38): 24-30.

Suárez, A. 2001. *Aprovechamiento sostenible de madera de Cordia alliodora y Cedería odorata de regeneración natural en cacaotales y bananales de indígenas de Talamanca, Costa Rica*. Tesis (M. Sc.), CATIE, Turrialba, Costa Rica, 74 p.

Thurston, H.D. 1994. *Introduction and discussion of workshop objectives*. Dans Thurston, H.D., Smith, M., Abawi, G. et Kearl, S. «Tapado, slash/mulch: how farmers use it and what researchers know about it». CATIE, CIIFAD, New York, USA, 302 p.

Torquebiau, E. 1990. *Introduction aux concepts de l'agroforesterie*. International Center for Research in Agroforestry (ICRAF), Nairobi, Kenya, s.p.

Tosi, J.A. 1969. *República de Costa Rica, Mapa ecológico según la clasificación de Zonas de vida del Mundo de L.R. Holdridge*. Échelle 1:750000. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica, s.p.

Tufekcioglu, A., Raich, J.W., Isenhardt, T.M. et Schultz, R.C. 2003. Biomass, carbon and nitrogen dynamics of multi-species riparian buffers within an agricultural watershed in Iowa, USA. *Agroforestry Systems*. 57: 187-198.

Umaña Rojas, G. 2002. *Manual para el manejo en campo, cosecha y poscosecha de banano orgánico de exportación para pequeños agricultores*. Collaborateurs : Umaña, D.G., Sáenz, M.V.M., Carmona, G.V., Pacheco, I.B, et Bertsch, F.H., San José, Costa Rica, 67 p.

UNEP (United Nation Environment Programme). 2004. *Clean development mechanism - Information and guidebook*. Second Edition. Roskilde, Denmark, 102 p.

UNEP. 2005. *Baseline methodologies for clean development mechanism projects. A Guidebook*. Roskilde, Denmark, 203 p.

University of Texas Libraries. 2006. *CIA world factbook 1999 – Country maps – Costa Rica*. Page consultée le 3 août 2006.
www.lib.utexas.edu/maps/cia99/costa_rica_sm99.jpg

Van Kooten, G.C., Eagle, A.J., Manley, J. et Smolak, T. 2004. How costly are carbon offsets? A meta-analysis of carbon forest sinks. *Environmental Science & Policy*. 7: 239-251.

- Warner, K. 1995. *Agriculteurs itinérants; connaissances techniques locales et gestion des ressources naturelles en zone tropicale humide*. FAO, Rome, Italie, 80 p.
- Winjum, J.K., Dixon, R.K. et Schroeder, P.E. 1992. Estimating the global potential of forest and agroforest management practices to sequester carbon. *Water, Air and Soil Pollution*. 64: 213-227.
- Wood, G.A.R. et Lass, R.A. 1985. *Cocoa*. Fourth Edition. Tropical Agricultures Series. Longman Inc, New York, USA, 620 p.
- Wright, D.G., Mullen, R.W., Thomason, W.E. et Raum, W.R. 2001. Estimated land area increase of agricultural ecosystems to sequester excess atmospheric carbon dioxide. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 32(11-12): 1803-1812.

8 Annexes

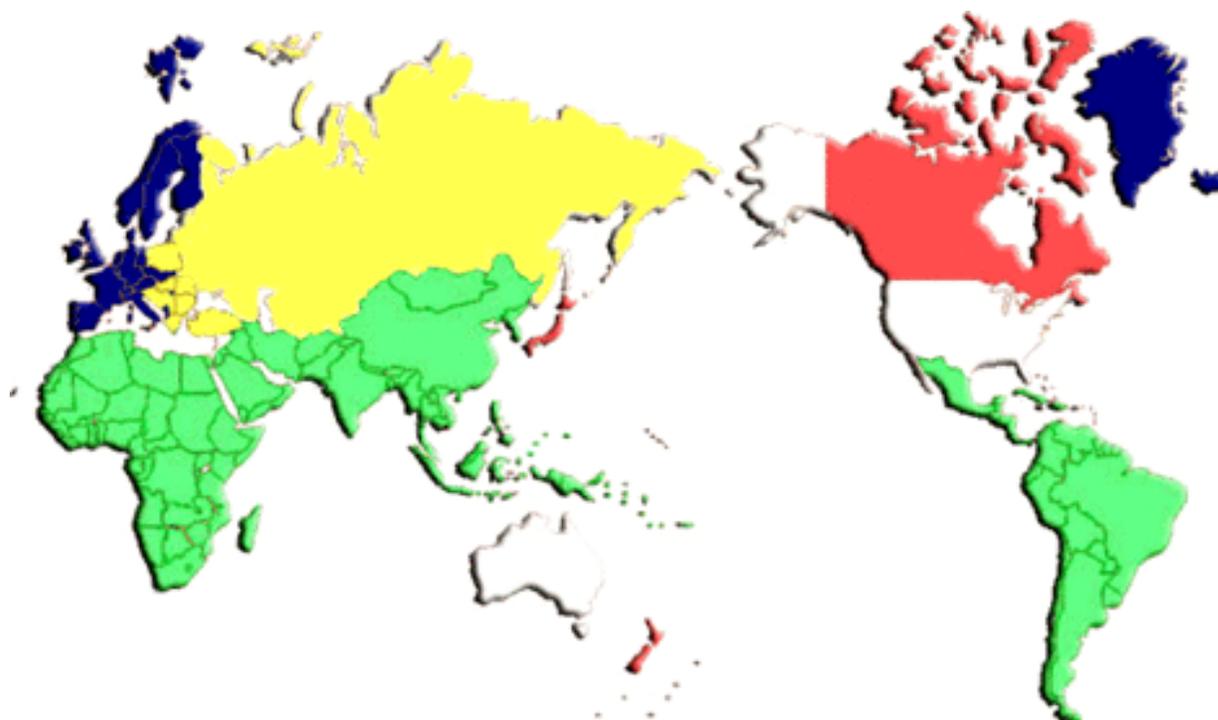
Annexe 1. Grandes étapes du développement de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et du Protocole de Kyoto

1979	<ul style="list-style-type: none">• Première Conférence mondiale sur le climat.
1988	<ul style="list-style-type: none">• Création du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).
1990	<ul style="list-style-type: none">• Demande d'un traité mondial sur les changements climatiques par le GIEC et les participants à la deuxième Conférence mondiale sur le climat.
1991	<ul style="list-style-type: none">• Première session du Comité intergouvernemental de négociation (CIN)
1992	<ul style="list-style-type: none">• Ouverture de la Convention à la signature lors du Sommet de la Terre
1994	<ul style="list-style-type: none">• Entrée en vigueur de la Convention
1995	<ul style="list-style-type: none">• COP1-Conférence des Parties (Berlin, Allemagne)<ul style="list-style-type: none">• Mandat de Berlin
1997	<ul style="list-style-type: none">• COP3 (Kyoto, Japon)<ul style="list-style-type: none">• Adoption du Protocole de Kyoto
1998	<ul style="list-style-type: none">• COP4 (Buenos Aires, Argentine)<ul style="list-style-type: none">• Plan d'action de Buenos Aires
2000	<ul style="list-style-type: none">• COP6 (La Haye, Pays-Bas)<ul style="list-style-type: none">• Rupture des négociations reposant sur le Plan de Buenos Aires
2001	<ul style="list-style-type: none">• Reprise de la COP6 (Bonn, Allemagne)<ul style="list-style-type: none">• Accords de Bonn• COP7 (Marrakech, Maroc)<ul style="list-style-type: none">• Accords de Marrakech
2005	<ul style="list-style-type: none">• Entrée en vigueur du Protocole de Kyoto (février)• COP11 (Montréal, Canada)

Adapté de CCNUCC, 2005

Légende : Les étapes de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques sont présentées en noir et celles du Protocole de Kyoto en rouge.

Annexe 2. Pays assujettis au Protocole de Kyoto



- Annexe 1 : Union européenne.
- Annexe 1: Pays en transition sur le plan économique. Pays potentiellement hôte de projets d'application conjointe.
- Annexe 1: Pays n'ayant pas ratifié le Protocole de Kyoto.
- Annexe 2: Pays de l'Annexe 1 à l'extérieur de l'Union européenne.
- Non-Annexe 1: Pays en développement. Pays potentiellement hôte de projets MDP.

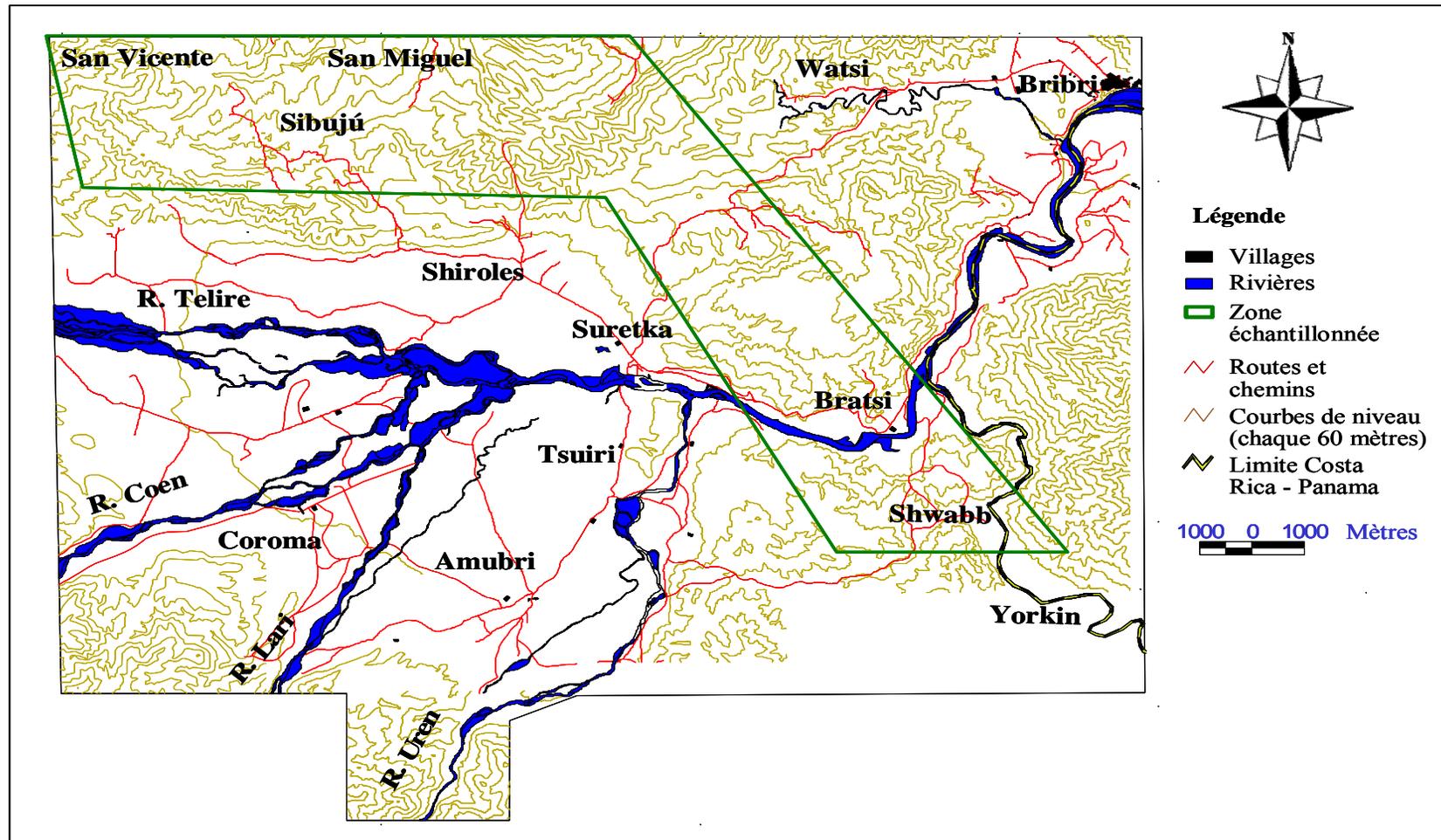
Adapté de Point Carbon, 2005b

Annexe 3. Localisation géographique du site de l'étude



Adapté de University of Texas Libraries, 2006

Annexe 4. Zone d'échantillonnage dans les Territoires Autochtones de Talamanca



Adapté de Suárez, 2001.

Annexe 5. Caractéristiques des parcelles de jachères échantillonnées

Traitements	No répétition	Âge jachère	Culture antérieure	Présence parcelle complémentaire de 125 m ²	
Régression	Jeune	1	Riz	x	
		2	Haricot		
		3	Maïs		
		4	Maïs		
		5	Maïs		
		6	Maïs	x	
		7	Riz	x	
		8	Maïs		
		9	Maïs		
			10	Maïs	
			11	Riz	x
			12	Maïs	x
			13	Riz	x
			14	Cultures vivrières	
			15	Cultures vivrières	
			16	Maïs	x
			17	Riz	x
		Âgée	18	Riz	x
			19	Riz	x
			20	Maïs	
			21	Cultures vivrières	
			22	Maïs	x
			23	Riz	x
			24	Haricot	x
			25	Maïs	x
			26	Riz	

Suite Annexe 6...

2- Petits arbres issus d'une régénération naturelle, souches, végétation herbacée, carbone du sol, humus jeune et arbres tombés au sol

<p>Sub-sub-parcela: 50 m² R- 4 m Arboles >1,5 m de altura y <9.9 cm de dhp</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 20px;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;">Especie</th> <th style="width: 25%;">Dhp (cm)</th> <th style="width: 25%;">D30 (cm)</th> <th style="width: 25%;">Alt total (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> <p>3 marcos de 50 x 50 cm Vegetación menor 1.5 m</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 20px;"> <thead> <tr> <th style="width: 33%;">Peso fresco (g)</th> <th style="width: 33%;">PF submu (g)</th> <th style="width: 33%;">Código muestra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> <p>Medición de hojarasca</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 12.5%;">Marco</th> <th style="width: 12.5%;">Peso fresco (g)</th> <th style="width: 12.5%;">PF submu (g)</th> <th style="width: 12.5%;">Alt hoj (cm)</th> <th style="width: 12.5%;">Código muestr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>2</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>3</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>4</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>5</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>6</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>7</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>8</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>9</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>10</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>	Especie	Dhp (cm)	D30 (cm)	Alt total (m)																					Peso fresco (g)	PF submu (g)	Código muestra							Marco	Peso fresco (g)	PF submu (g)	Alt hoj (cm)	Código muestr	1					2					3					4					5					6					7					8					9					10					<p>Tocones: parcela de 1000 m2</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 20px;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;">Especie</th> <th style="width: 25%;">Altura (m)</th> <th style="width: 25%;">Diam 1</th> <th style="width: 25%;">Diam 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> <p>Muestras de suelo</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 20px;"> <thead> <tr> <th style="width: 33%;"></th> <th style="width: 33%;">Peso (g)</th> <th style="width: 33%;">Código muestra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Barreno</td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>Cilindro</td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> <p>Madera caída: 2 líneas de 50 m cada una</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2" style="width: 12.5%;">Diam</th> <th rowspan="2" style="width: 12.5%;">Especie</th> <th colspan="3" style="width: 75%;">Clase de densidad</th> </tr> <tr> <th style="width: 25%;">Duro</th> <th style="width: 25%;">Medio</th> <th style="width: 25%;">Suave</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>	Especie	Altura (m)	Diam 1	Diam 2																						Peso (g)	Código muestra	Barreno			Cilindro			Diam	Especie	Clase de densidad			Duro	Medio	Suave																																																		
Especie	Dhp (cm)	D30 (cm)	Alt total (m)																																																																																																																																																																																	
Peso fresco (g)	PF submu (g)	Código muestra																																																																																																																																																																																		
Marco	Peso fresco (g)	PF submu (g)	Alt hoj (cm)	Código muestr																																																																																																																																																																																
1																																																																																																																																																																																				
2																																																																																																																																																																																				
3																																																																																																																																																																																				
4																																																																																																																																																																																				
5																																																																																																																																																																																				
6																																																																																																																																																																																				
7																																																																																																																																																																																				
8																																																																																																																																																																																				
9																																																																																																																																																																																				
10																																																																																																																																																																																				
Especie	Altura (m)	Diam 1	Diam 2																																																																																																																																																																																	
	Peso (g)	Código muestra																																																																																																																																																																																		
Barreno																																																																																																																																																																																				
Cilindro																																																																																																																																																																																				
Diam	Especie	Clase de densidad																																																																																																																																																																																		
		Duro	Medio	Suave																																																																																																																																																																																

Annexe 7. Liste des espèces ligneuses rencontrées dans les PPE et formules utilisées pour calculer leur biomasse aérienne

Nom commun	Nom scientifique	Famille	Modèle utilisé ²⁶
Acacia	<i>Acacia mangium</i>	Mimosaceae	7
Achiote, Achotillo	<i>Vismia ferruginea</i>	Clusiaceae	7
Aguacate	<i>Persea americana</i>	Lauraceae	4
Anonillo	<i>Rollinia pittieri</i>	Anonaceae	4
Balsa, Balso	<i>Ochroma pyramidale</i>	Bombacaceae	7
Biribá	<i>Rollinia mucosa</i>	Anonaceae	4
Botijo, Peine mico	<i>Apeiba membranacea</i>	Tiliaceae	6
Burío	<i>Heliocarpus appendiculatus</i>	Tiliaceae	7
Cacao	<i>Theobroma cacao</i>	Esterculiaceae	1
Café	<i>Coffea arabica</i>	Rubiaceae	3
Caimito amarillo	inconnu	inconnue	4
Candelillo	<i>Albizia adinocephala</i>	Mimosaceae	6
Caobilla, Cedro macho	<i>Carapa guianensis</i>	Meliaceae	5
Capulin, Capulin blanco	<i>Trema integerrima</i>	Ulmaceae	6
Cas	<i>Psidium</i> sp.	Mirtaceae	4
Casearia	<i>Casearia</i> sp.	Flacourtiaceae	7
Cashá	<i>Abarema idiopoda</i>	Mimosaceae	6
Castaño	<i>Sterculia apetala</i>	Sterculiaceae	7
Cedro, Cedro amargo	<i>Cedrela odorata</i>	Meliaceae	7
Ceiba	<i>Ceiba pentandra</i>	Bombacaceae	7
Chilamate	<i>Ficus insipida</i>	Moraceae	6
Cletra	<i>Clethra mexicana</i>	Clethraceae	7
Coco	<i>Cocus nucifera</i>	Palmaceae	9
Cocobolo	<i>Vatairea lundellii</i>	Papilionaceae	7
Cocora	<i>Guarea</i> sp.	Meliaceae	7
Cola pavo	<i>Cupania</i> sp.	Sapindaceae	7
Colubrina espinosa	<i>Colubrina espinosa</i>	Rhamnaceae	7
Corteza amarillo	<i>Tabebuia ochracea</i>	Bignoniaceae	6
Cunche, cunchi	<i>Astronium urundeuva</i>	Anacardiaceae	6
Ficus, Higeron	<i>Ficus</i> sp.	Moraceae	6
Fosforillo	<i>Dendropanax arboreum</i>	Araliaceae	7
Frijolon, Frijolillo	<i>Lonchocarpus</i> sp.	Papilionaceae	6

²⁶ Les numéros de modèles réfèrent aux équations du Tableau 4 de la page 37.

Suite Annexe 7...

Nom commun	Nom scientifique	Famille	Modèle utilisé
Garrocho, Garroche	<i>Quararibea asterolepis</i>	Bombacaceae	6
Gavilán	<i>Pentaclethra macroloba</i>	Mimosaceae	5
Guaba, Guabo, Guaba chilillo, Guabillo, Inga	<i>Inga</i> sp.	Papilionaceae	4
Guabo ronron	<i>Inga leiocalycina</i>	Papilionaceae	4
Guácimo, Guácimo blanco, Molinillo	<i>Goethalsia meiantha</i>	Tiliaceae	5 - 6
Guácimo colorado	<i>Luehea seemannii</i>	Tiliaceae	5 - 6
Guarumo	<i>Cecropia</i> sp.	Moraceae	6
Guayaba	<i>Psidium guajaba</i>	Myrtaceae	4
Hule, Hule macho	<i>Castilla elastica</i>	Moraceae	7
Indio pelon, Indio desnudo, Indio, Jiñocuabe	<i>Bursera simarouba</i>	Burseraceae	6
Ira, Ocotea	<i>Ocotea</i> sp.	inconnue	7
Javillo, Jabillo Mata Palo, Jabillo	<i>Hura crepitans</i>	Euphorbiaceae	5 - 6
Jicara, Calabazo	<i>Crescentia cujete</i>	Bignoniaceae	7
Jobo	<i>Spondias mombin</i>	Anacardiaceae	4
Lagarto, Lagartillo	<i>Zanthoxylum</i> sp.	Rutaceae	5
Laurel, Laurel ronron	<i>Cordia alliodora</i>	Boraginaceae	2
Laurel muñeco	<i>Cordia cymosa</i>	Boraginaceae	2
Lengua gallina	<i>Xylopia frutescens</i>	Annonaceae	4 - 6
Lengua vaca	<i>Miconia argentea</i>	Melastomataceae	6
Limón, Naranja	<i>Citrus</i> sp.	Rutaceae	4
Madero negro	<i>Gliricidia sepium</i>	Papilionaceae	7
Mamón chino	<i>Nephelium lappaceum</i>	Sapindaceae	4
Mandarina	<i>Citrus reticulata</i>	Rutaceae	4
Manga larga	<i>Laetia procera</i>	Flacourtiaceae	7
Mango	<i>Mangifera indica</i>	Anacardiaceae	4
Mangostan	<i>Garcinia mangostan</i>	Clusiaceae	7
Manú, Manú blanco	<i>Minquartia guianensis</i>	Olacaceae	7
Manzana de agua, Manzano	<i>Syzigium malacensis</i>	Mirtaceae	4
Matazano	<i>Pouteria</i> sp.	Sapotaceae	7
Mayo blanco	<i>Vochysia guatemalensis</i>	Vochysiaceae	5
Miconia, Melastomatacia	<i>Miconia</i> sp.	Melastomataceae	6 - 7
Muñeco	<i>Cordia collococa</i>	Boraginaceae	2
Nectandra	<i>Nectandra</i> sp.	Lauraceae	6

Suite Annexe 7...

Nom commun	Nom scientifique	Famille	Modèle utilisé
Níspero	<i>Manilkara</i> sp.	Sapotaceae	4
Ojoche, Ojochillo	<i>Brosimum alicastrum</i>	Moraceae	6
Oreja Burro	<i>Elephantopus mollis</i>	Asteraceae	7
Paleta	<i>Pterocarpus hayesii</i>	Papilionaceae	5
Palma dulce, Palmito dulce, Chonta	<i>Iriartea deltoidea</i>	Arecaceae	9
Palma escoba, Escoba	<i>Sabal mexicana</i>	Arecaceae	8
Palma real, Palmito	<i>Attalea butiraceae</i>	inconnue	9
Palmito amargo, Jira, Gira	<i>Socratea exorrhiza</i>	Arecaceae	9
Papaya montaña	<i>Jacaratia spinosa</i>	Caricaceae	7
Papayo	<i>Carica papaya</i>	Caricaceae	7
Pataste	<i>Theobroma bicolor</i>	Esterculiaceae	7
Pejibaye	<i>Bactris gassipaes</i>	Arecaceae	9
Pilón	<i>Hyeronima</i> sp.	Euphorbiaceae	5
Poró, Poró de montaña	<i>Erythrina</i> sp.	Papilionaceae	5
Sangrillo	<i>Dussia macrophyllata</i>	Fabaceae	5
Sotacaballo	<i>Zygia longifolia</i>	Mimosaceae	7
Surá, Guayabón	<i>Terminalia</i> sp.	Combretaceae	5 - 6
Tabacón	<i>Grias cauliflora</i>	Lecythidaceae	7
Trichospermum grewiifolium	<i>Trichospermum grewiifolium</i>	Tiliaceae	5
Tuete	<i>Vermonia patens</i>	inconnue	7
Verbenacea	inconnu	Verbenaceae	7
Vitex	<i>Vitex cooperi</i>	inconnu	7
Yuplón	<i>Spondias cytherea</i>	Anacardiaceae	4
Zapote, Zapote negro	<i>Mammea americana</i>	Clusiaceae	4
Zapote colombiano	<i>Calocarpum mammosun</i>	Sapotaceae	4
Zopilote	<i>Hernandia</i> sp.	Hernandiaceae	5
Zorillo	<i>Thouinidium decandrum</i>	Sapindaceae	6

Note : Lorsque le dhp était en dehors du spectre couvert par le modèle, l'équation no 7 («Bois durs de la forêt tropicale humide») a été utilisée.

Annexe 8. Formulaire de l'enquête socio-économique

Estimado(a) productor(a):

Esta entrevista es parte de un estudio sobre el manejo de las fincas en las Reservas Indígenas Bribri y Cabécar de Talamanca. El estudio lo realizan las Asociaciones Indígenas ADITIBRI, ADITICA, ACOMUITA, ACICAFOC, junto al MINAE y el CATIE, y tiene el objetivo de evaluar los servicios ambientales que brindan los árboles dentro de su finca. Con esta información se espera lograr que en el futuro el Estado/Gobierno les brinde un pago u otro beneficio por estos servicios ambientales. Este pago o beneficio sería recibido por el mismo dueño de la finca, y para ello podría requerir la realización de algunas modificaciones en sus prácticas (modificaciones relacionadas al manejo de árboles de sombra y otras actividades).

1.DEFINICIÓN DE LA FINCA EVALUADA EN EL PROYECTO

- ¿Cuántas fincas tiene Usted? (contestar en el cuadro 1 según nuestra definición de finca y parcela). _____
- El productor tiene que elegir una finca que será evaluada en el proyecto: FINCA No _____
- De la finca seleccionada, ¿cuál es el sistema más importante y por qué? (contestar en el cuadro 1)

Cuadro 1. Identificación de las fincas y de sus actividades productivas

Finca #	Sistemas (o parcelas)	Área (ha)	De la finca seleccionada, ¿cual es el sistema más importante y por que?

2.INFORMACIÓN GENERAL SOBRE LA FINCA

- ¿En qué comunidad vive Usted? _____
- ¿Donde esta ubicada la finca (comunidad)? _____
- ¿Cuál es el area total de la finca? _____ (ha)
- ¿Hace cuántos años tiene la finca? _____
- ¿Cómo adquirió la finca? _____

3. CARACTERÍSTICAS DEL GRUPO FAMILIAR

Cuadro 2. Información del grupo familiar

Nombre de personas que viven en la casa	Parentesco con propietario	Edad (años)	Nivel de educación	¿Trabaja en la finca?	¿Cuánto tiempo?	¿Trabaja fuera de la finca?
	propietario					

Nivel de educación: Ninguno, Primaria incompleta, Primaria completa, Secundaria incompleta, Secundaria completa, Universidad

4. CULTIVOS Y USOS DE LA TIERRA

4.1. CACAO CON SOMBRA

4.1.1. Información general sobre el cacao con sombra

- ¿Cuál es la edad de este cultivo? _____ (años)
- ¿Cuál es el área? _____ (ha)
- ¿Cuál es la distancia de siembra? _____ (m)
- ¿Cuál fue el uso anterior de la parcela donde está el cultivo? _____
- ¿Por cuántos años se utilizó el uso anterior? _____
- ¿Piensa cambiar de uso de la parcela en el futuro? _____
Si dice que sí, ¿a qué uso? _____

4.1.2. Rendimientos y comercialización del sistema de cacao con sombra

- ¿Cada cuánto cosecha y cuánto recoge por cosecha? (llenar el cuadro 3)

Cuadro 3. Rendimientos de las diferentes cosechas del cacao

Meses	¿Cada cuánto cosecha? (quincena, mes, cosecha entera)	¿Cuánto recoge por cosecha? (sacos o kilos)	Peso saco (kg)

Suite Annexe 8...

b) El producto es para:

	Venta	Consumo
Calcular cantidad		

- c) ¿Cómo vende el cacao y a qué precio? (marcar con una X la forma de vender el cacao y anotar el precio)
 MOJADO ____ c/kg FERMENTADO ____ c/kg SECO ____ c/kg
- d) ¿A quiénes vende el cacao? _____
- e) ¿Su finca esta certificada orgánica? NO ____ SI ____ Si, con quien? _____
- f) ¿Tiene problemas al vender su producto? NO ____ SI o A VECES ____
 ¿Cuáles? _____

4.1.3. Manejo del cacao con sombra

a) La mano de obra que utiliza en este cultivo, ¿de qué tipo es? (mencionar cada categoría).

Cuadro 4. Información sobre la mano de obra

Mano de obra	Marcar con X	Cantidad
Familiar		
Contratada		
Junta comunitaria		
Otro		

b) Cuando contrata mano de obra (jornal, peón) ¿cuánto paga el día de trabajo?

c) ¿Cuáles son las actividades de manejo de su parcela? (El productor describe el manejo de su finca mientras el promotor marca con X cada actividad en el cuadro 5).

Cuadro 5. Chequeo de las actividades de manejo de su parcela de cacao

Actividad	Marcar con X	Observaciones
Chapia		
Poda formación		
Poda mantenimiento		
Control sanitario(desmonilia)		
Deschuponar		
Otro		

Suite Annexe 8...

- d) ¿Cuánto tiempo demora el transporte de una cosecha (ida y vuelta)? _____
e) ¿Cómo transporta el producto? Caminando _____ Carro _____ Caballo _____
Bote _____ Otros medios (Especifique) _____

4.1.4. Aprovechamiento forestal dentro del cultivo de cacao con sombra

- a) ¿Hay árboles maderables que se pueden aprovechar (diámetros mayores a 45 cm)?
NO _____ SI _____
b) ¿De cuáles especies y cuántos? _____

4.2. BANANO CON ÁRBOLES

4.2.1. Información general sobre el banano

- a) ¿Cuál es la edad de este cultivo? _____ (años)
b) ¿Cuál es el área? _____ (ha)
c) ¿Cuál es la distancia de siembra? _____ (m)
d) ¿Cuál fue el uso anterior de la parcela donde está el cultivo? _____
e) ¿Por cuántos años se utilizó el uso anterior? _____
f) ¿Cuál será el uso futuro de esa parcela? _____

4.2.2. Rendimientos y comercialización del sistema de banano con árboles

- a) ¿Cada cuánto cosecha? _____
b) ¿Cuánto recoge por cosecha? (Especificar por racimos o kilos. Si es por racimos de cuántos kilos son.) _____
c) El producto es para:

	Venta	Consumo
Calcular cantidad		

- d) ¿A qué precio vende el banano? _____ (colones por unidad de peso)
e) ¿A quiénes lo vende? _____
f) ¿Su finca esta certificada orgánica? NO _____ SI _____ Si, con quien? _____
g) ¿Tiene problemas al vender su producto? NO _____ SI o A VECES _____
¿Cuáles? _____

4.2.3. Manejo del banano con árboles

- a) La mano de obra que utiliza en este cultivo, ¿de qué tipo es? (mencionar cada categoría).

Cuadro 6. Información sobre la mano de obra

Mano de obra	Marcar con X	Cantidad
Familiar		
Contratada		
Junta comunitaria		
Otro		

- b) Cuando contrata mano de obra (jornal, peón) ¿cuánto paga el día de trabajo?

- c) ¿Cuáles son las actividades de manejo de su parcela? (El productor describe el manejo de su finca mientras el promotor marca con X cada actividad en el cuadro siguiente).

Cuadro 7. Chequeo de las actividades de manejo de su parcela de banano

Actividad	Marcar con X	Observaciones
Chapia		
Fertilización (tipo de abono)		
Cal		
Deshija		
Deshoja		
Embolse		
Encinte		
Soporte		
Deschira		
Control sanitario (destallo)		
Resiembra		
Drenajes		
Desmane		
Otro		

- d) ¿Cuánto tiempo demora el transporte de una cosecha (ida y vuelta)? _____
- e) ¿Cómo transporta el producto? Caminando _____ Carro _____ Caballo _____
Bote _____ Otros medios (Especifique) _____

Suite Annexe 8...

4.2.4. Aprovechamiento forestal dentro del cultivo de banano con árboles

- a) ¿Hay árboles maderables que se pueden aprovechar (diámetros mayores a 45 cm)?
NO _____ SI _____
- b) ¿De cuáles especies y cuántos? _____

4.3. CHARRALES Y GRANOS BÁSICOS

4.3.1. Historia de los charrales

Cuadro 8. Cronosequencia de los charrales y los terrenos en producción de granos básicos (del inicio al estado actual-2005)

Número de parcela ¹	Área (ha)	¿Hace cuanto cosechó por última vez (edad de la vegetación del charral en años)?	Uso anterior	
			Vegetación ²	Duración (años)

(1) Cuando el charral está dividido en áreas de diversas edades, clasifíquelas con un número. Evaluar también los terrenos que están dedicados actualmente a la producción de granos básicos (2) Vegetación: bosque, cultivo (arroz, maíz, frijol, banano,...), descanso de la tierra (charral), etc.

4.3.2. Rendimientos y comercialización de los granos básicos

Cuadro 9. Información de los granos básicos existentes dentro de la finca

Tipo de cultivo	Área (ha)	Cantidad que produce por cosecha ¹	Propósito (calcular cantidad)		A quien lo vende	Precio (colones/unidad medida)
			Venta	Consumo		

(1) Especificar la unidad: quintales (qq); sacos (s); o cualquier otra unidad de medida. Si utilizan sacos, indicar su peso.

4.3.3. Costos de granos básicos

- a) La mano de obra que utiliza en este cultivo, ¿de qué tipo es? (mencionar cada categoría).

Cuadro 12. Información sobre la mano de obra

Mano de obra	Marcar con X	Cantidad
Familiar		
Contratada		
Junta comunitaria		
Otro		

- b) Cuando contrata mano de obra (jornal, peón) ¿cuánto paga el día de trabajo?
- c) ¿Cuáles son las actividades de manejo (establecimiento y mantenimiento) de su parcela? (El productor describe el manejo de su finca mientras el promotor marca con X cada actividad en el cuadro siguiente).

Cuadro 13. Chequeo de las actividades de manejo de su parcela de granos básicos

Actividad		Marca con X		
		Arroz	Maíz	Frijol
Establecimiento	Carrillar			
	Chapia/Tumba			
	Motosierra			
	• Alquilada _____			
	• Propia _____			
	Quema			
	Limpia terreno			
	Espeque			
	Siembra			
Regar				
Manten	Deshierba			
	Aporrear			
	Asolear			
	Otro			

- d) ¿Cuánto tiempo demora el transporte de una cosecha (ida y vuelta)?
- e) ¿Cómo transporta el producto? Caminando _____ Carro _____ Caballo _____
Bote _____ Otros medios (Especifique) _____

Annexe 9. Liste des informateurs clefs rencontrés

1- Institutions et organisations rencontrées

	Organisation	Personne rencontrée	Thèmes abordés
ACAPRO	Association de producteurs	José Moore	Production et commercialisation de la banane
APPTA	Association de producteurs	Juan Carlos Barrantes	Production et commercialisation de la banane, du cacao et autres produits agricoles
UCANEHÜ	Association de producteurs	Demetrio Layan, Agustín Jackson, Ricardo Romero	Production et commercialisation de la banane
ADITICA	Association de développement des territoires autochtones Cabécar	Víctor Reyes (Président)	Prix et mécanismes de récolte du bois d'œuvre dans les Territoires Autochtones
ADITIBRI	Association de développement des territoires autochtones Bribri	Abelardo Torres (Présidente)	Prix et mécanismes de récolte du bois d'œuvre dans les Territoires Autochtones
MAG Suretka	Ministère de l'Agriculture	Guillermo Sánchez	Production et commercialisation de produits agricoles. Gestion de projets
COPROCSA	Entreprise de commercialisation de produits agricoles	Nayman Leal	Commercialisation du cacao
PRODOMA-CATIE	Programme de donation pour gestion environnementale	Danny Umaña	Panorama de la production, commercialisation et gestion de projets dans la région
MINAE	Ministère de l'Environnement et de l'Énergie	Marcelo Pacheco	Panorama de la gestion des ressources forestières dans les Territoires Autochtones

Suite Annexe 9...

2- Producteurs rencontrés

	Producteurs	Culture	Communauté
1	Elías Fernández Ríos	Cacao	San Miguel
2	Víctor Reyes	Cacao	Sibujú
3	Demetrio Layan	Banane	Bambú
4	Odilio Reyes Fernández	Banane	Sibujú
5	Adela Obando Obando	Banane	San Vicente
6	Nicolás Uva	Cultures vivrières	San Miguel
7	Porfirio Hidalgo Beita	Cultures vivrières	San Miguel
8	Amancio Uva Villanueva	Cultures vivrières	San Miguel
9	Arnulfo Zúñiga	Cultures vivrières	San Miguel
10	Anselmo Uva Uva	Cultures vivrières	San Miguel
11	Víctor Reyes	Cultures vivrières	Sibujú

Annexe 10. Informations supplémentaires recueillies auprès des informateurs-agriculteurs clefs

Cuadro 1. Información de costos de establecimiento, mantenimiento e insumos en cacao con árboles

	ACTIVIDAD	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (COLONES)
Establecimiento	Tumba/chapia	<i>Jornal</i>		
	Motosierra			
	Alquilada _____	<i>Jornal</i>		
	Propia _____	<i>Jornal</i>		
	Quema	<i>Jornal</i>		
	Estaquillado	<i>Jornal</i>		
	Ahoyado	<i>Jornal</i>		
	Siembra	<i>Jornal</i>		
	Tipo de mano de obra: Familiar _____ Contratada _____	<i>jornal</i> <i>jornal</i>		
			Cantidad	
Mantenimiento	Rodaja	<i>Jornal</i>	Primera vez: _____ Frecuencia normal hasta que edad:	
	Chapia	<i>Jornal</i>	Frecuencia:	
	Poda formación	<i>Jornal</i>	Edad:	
	Poda mantenimiento		Frecuencia:	
	Control sanitario (desmonilia)	<i>Jornal</i>	Frecuencia:	
	Deschuponar	<i>Jornal</i>	Frecuencia:	
	Cosecha	<i>Jornal</i>		
	Secado	<i>Jornal</i>		
	Fermentado	<i>Jornal</i>		
Insumo	Semillas	<i>kg</i>		
	Empaque (sacos)	<i>Unidad</i>		
	Herramientas	<i>Universal</i>		

Cuadro 2. Información de costos de establecimiento, mantenimiento e insumos en banano con árboles

	ACTIVIDAD	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (COLONES)
Establecimiento	Tumba/chapia	<i>Jornal</i>		
	Motosierra			
	Alquilada _____	<i>Jornal</i>		
	Propia _____	<i>Jornal</i>		
	Quema	<i>Jornal</i>		
	Estaquillado	<i>Jornal</i>		
	Ahoyado	<i>Jornal</i>		
	Siembra	<i>Jornal</i>		
	Tipo de mano de obra: Familiar _____ Contratada _____	<i>jornal</i> <i>jornal</i>		
			Cantidad	
Mantenimiento	Chapia	<i>jornal</i>	Primera vez: _____ Frecuencia normal: _____	
	Fertilización:			
	1. _____	<i>Jornal</i>	Frecuencia: _____	
	2. _____	<i>Jornal</i>	Frecuencia: _____	
	3. _____	<i>Jornal</i>	Frecuencia: _____	
	Enmienda:			
	Urea _____	<i>Jornal</i>	Frecuencia: _____	
	Cal _____	<i>Jornal</i>	Frecuencia: _____	
	Deshija	<i>Jornal</i>	Primera vez: _____ Frecuencia normal: _____	
	Deshoja	<i>Jornal</i>	Primera vez: _____ Frecuencia normal: _____	
	Embolse	<i>Jornal</i>		
	Encinte	<i>Jornal</i>		
	Soporte	<i>Jornal</i>		
Deschira	<i>Jornal</i>			
Control sanitario	<i>Jornal</i>			
Drenajes	<i>Jornal</i>			
Cosecha	<i>Jornal</i>			
Desmane	<i>Jornal</i>			
Insumos	Semillas	<i>Cabeza</i>		
	Bolsas blancas sin químicos	<i>Unidad</i>		
	Cintas, mecate	<i>m</i>		
	Empaque (cajas, bolsas)	<i>Unidad</i>		

Suite Annexe 10....

Cuadro 3. Información de costos de establecimiento, mantenimiento e insumos en los granos básicos

Actividad	Unidad	Mes	ARROZ			Mes	MAÍZ		
			Cantid	Precio (col)	Total (col/ha)		Cantid	Precio (col)	Total (col/ha)
Tumba	<i>jornal</i>								
Motosierra Alquilada	<i>Jornal</i>								
Motosierra Propia	<i>Jornal</i>								
Quema	<i>Jornal</i>								
Chalqueado	<i>Jornal</i>								
Siembra	<i>Jornal</i>								
1ºDeshierbe	<i>Jornal</i>								
2ºDeshierbe	<i>Jornal</i>								
Cosecha	<i>Jornal</i>								
Trilla	<i>Jornal</i>								
Transporte	<i>Tarifa</i>								
Pelado	<i>Qq</i>								
Semillas	<i>Kg</i>								

Cuadro 4. Información sobre los usos de la madera (solo si la madera o los árboles vienen de la finca)

Uso de madera	Cada cuánto?	Cantidad de árboles	Observaciones
Poste			
Aserrió			

Cuadro 5. Costos de la actividad de aprovechamiento de árboles dentro de la finca

	ACTIVIDAD	UNIDAD	MES	CANTIDAD	PRECIO (col)	TOTAL (col/ha)
Cosecha	Voltea	<i>jornal</i>				
	Tuqueo	<i>jornal</i>				
	Aserrió	<i>plg</i>				
	Leña	<i>jornal</i>				
	Acarreo	<i>jornal</i>				
Insumos	Semillas	<i>kg</i>				
	Motosierra Alquilada	<i>Jornal</i>				
	Motosierra Propia	<i>jornal</i>				
	Herramientas	<i>universal</i>				
	Gasolina	<i>gal</i>				
	Aceite de cadena	<i>gal</i>				
Aceite de mezcla	<i>gal</i>					

Annexe 11. Résultats obtenus pour la séquestration du carbone dans les traitements étudiés

1) Moyennes de la quantité de carbone emmagasinée dans les diverses composantes retrouvées dans les traitements étudiés (t C/ha)

Systèmes	CAV				CAM				CR	CS	Total
	AOC	AR	VH	Total	AS	S	H	Total			
SAF bananier	9,18	0,22	0,49	9,89	3,89	2,27	2,11	8,27	4,08	54,42	76,66
SAF cacaoyer mono	59,05	0,12	0,39	59,55	3,27	1,87	2,71	7,86	13,08	67,27	147,75
SAF cacaoyer multi	51,16	0,08	0,43	51,67	7,69	2,38	3,18	13,25	12,62	48,67	126,21
Jachère jeune	1,73	1,00	0,26	2,91	6,95	2,55	2,11	9,91	2,97	63,35	79,14
Jachère âgée	31,49	1,09	0,33	32,68	11,68	5,03	2,92	18,52	10,23	62,06	123,49
Moyenne	30,52	0,50	0,38	31,34	6,70	2,82	2,61	11,56	8,6	59,15	110,65

2) Contributions relatives des diverses composantes du carbone retrouvées dans les traitements étudiés (%)

Systèmes	CAV				CAM				CR	CS
	AOC	AR	VH	Total	AS	S	H	Total		
SAF bananier	81,53	3,19	15,27	12,78	39,18	16,32	44,50	10,24	5,22	71,76
SAF cacaoyer mono	99,16	0,18	0,65	40,39	40,50	17,33	42,16	5,67	8,99	44,96
SAF cacaoyer multi	98,81	0,19	1,01	39,33	50,50	18,16	31,34	11,13	9,86	39,67
Jachère jeune	50,45	36,01	13,55	3,53	70,91	12,07	17,02	11,99	3,63	80,85
Jachère âgée	93,54	5,37	1,09	26,32	60,63	24,70	14,67	14,69	8,24	50,76
Moyenne	84,70	8,99	6,31	24,47	52,35	17,72	29,94	10,74	7,19	57,60

Légende : AOC = arbres d'ombrage et cacaoyers, AR = petits arbres issus d'une régénération naturelle, AS = arbres tombés au sol, CAV = carbone aérien mort, CAV = carbone aérien vivant, CR = carbone racinaire, CS = carbone organique du sol, H = humus jeune, S = souches, VH = végétation herbacée

Annexe 12. Valeurs de F calculées pour les analyses statistiques effectuées

1- Modèle humus jeune

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	1	2,32383260	2,32383260	51,05	<,0001
Erreur	10	0,45519114	0,04551911		
Total	11	2,77902375			

2- Carbone 5 traitements : valeurs absolues (t C/ha)

1) Arbres d'ombrage et cacaoyers (transformation racine carrée ou $\sqrt{\quad}$)

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	286,9514744	71,7378686	43,06	<,0001
Erreur	40	66,6438321	1,6660958		
Total	44	353,5953065			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	70,3721164	70,3721164	42,24	<,0001
-Cacao vs banane	1	125,4202975	125,4202975	75,28	<,0001
-Multi vs mono	1	1,8806792	1,8806792	1,13	0,2944
-Jjeune vs Jâgée	1	89,2783813	89,2783813	53,59	<,0001

2) Petits arbres issus d'une régénération naturelle (transformation $\sqrt{\quad}$)

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	5,89210164	1,47302541	9,23	<,0001
Erreur	40	6,38705708	0,15967643		
Total	44	12,27915873			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	5,75522443	5,75522443	36,04	<,0001
-Cacao vs banane	1	0,11411129	0,11411129	0,71	0,4029
-Multi vs mono	1	0,01395685	0,01395685	0,09	0,7690
-Jjeune vs Jâgée	1	0,00880907	0,00880907	0,06	0,8155

3) Végétation herbacée

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	0,21669122	0,05417280	0,81	0,5303
Erreur	31	2,08144817	0,06714349		
Total	35	2,29813939			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	0,11989039	0,11989039	1,79	0,1912
-Cacao vs banane	1	0,04544314	0,04544314	0,68	0,4170
-Multi vs mono	1	0,00879353	0,00879353	0,13	0,7199
-Jjeune vs Jâgée	1	0,00919656	0,00919656	0,14	0,7138

Suite Annexe 12...

4) Arbres tombés au sol (transformation $\sqrt{\quad}$)

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	16,70654057	4,17663514	2,56	0,0528
Erreur	40	65,14024889	1,62850622		
Total	44	81,84678946			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	7,53773294	7,53773294	4,63	0,0375
-Cacao vs banane	1	1,02255988	1,02255988	0,63	0,4328
-Multi vs mono	1	3,63645311	3,63645311	2,23	0,1429
-Jjeune vs Jâgée	1	4,50979465	4,50979465	2,77	0,1039

5) Souches

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	46,6891392	11,6722848	0,95	0,4479
Erreur	32	393,0519005	12,2828719		
Total	36	439,7410397			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	16,73614275	16,73614275	1,36	0,2517
-Cacao vs banane	1	0,13095336	0,13095336	0,01	0,9184
-Multi vs mono	1	1,14963995	1,14963995	0,09	0,7616
-Jjeune vs Jâgée	1	12,87512444	12,87512444	1,05	0,3136

6) Humus jeune

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	8,46212711	2,11553178	4,70	0,0033
Erreur	40	18,00461484	0,45011537		
Total	44	26,46674195			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	0,25049065	0,25049065	0,56	0,4600
-Cacao vs banane	1	4,25931709	4,25931709	9,46	0,0038
-Multi vs mono	1	0,98485683	0,98485683	2,19	0,1469
-Jjeune vs Jâgée	1	2,96746255	2,96746255	6,59	0,0141

7) Carbone aérien vivant (transformation $\sqrt{\quad}$)

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	246,3139183	61,5784796	41,96	<,0001
Erreur	40	58,6951612	1,4673790		
Total	44	305,0090795			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	55,9011355	55,9011355	38,10	<,0001
-Cacao vs banane	1	117,4496021	117,4496021	80,04	<,0001
-Multi vs mono	1	1,8456115	1,8456115	1,26	0,2688
-Jjeune vs Jâgée	1	71,1175692	71,1175692	48,47	<,0001

Suite Annexe 12...

8) Carbone aérien mort

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	706,941267	176,735317	3,16	0,0241
Erreur	40	2240,522261	56,013057		
Total	44	2947,463529			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	211,2283061	211,2283061	3,77	0,0592
-Cacao vs banane	1	31,3921948	31,3921948	0,56	0,4585
-Multi vs mono	1	130,9308328	130,9308328	2,34	0,1342
-Jjeune vs Jâgée	1	333,3899338	333,3899338	5,95	0,0192

9) Carbone racinaire

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	819,347553	204,836888	29,82	<,0001
Erreur	40	274,764985	6,869125		
Total	44	1094,112537			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	119,7888589	119,7888589	17,44	0,0002
-Cacao vs banane	1	461,6927128	461,6927128	67,21	<,0001
-Multi vs mono	1	0,9338767	0,9338767	0,14	0,7143
-Jjeune vs Jâgée	1	236,9321044	236,9321044	34,49	<,0001

10) Carbone du sol (transformation logarithmique ou LOG)

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	0,09486692	0,02371673	2,22	0,0836
Erreur	40	0,42663955	0,01066599		
Total	44	0,52150647			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	0,02365059	0,02365059	2,22	0,1443
-Cacao vs banane	1	0,00212802	0,00212802	0,20	0,6575
-Multi vs mono	1	0,06886907	0,06886907	6,46	0,0150
-Jjeune vs Jâgée	1	0,00021925	0,00021925	0,02	0,8867

11) Carbone total (transformation $\sqrt{\quad}$)

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	83,0574019	20,7643505	14,93	<,0001
Erreur	40	55,6140825	1,3903521		
Total	44	1,3903521			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	5,40110201	5,40110201	3,88	0,0557
-Cacao vs banane	1	51,88068390	51,88068390	37,31	<,0001
-Multi vs mono	1	3,38363251	3,38363251	2,43	0,1266
-Jjeune vs Jâgée	1	22,39198350	22,39198350	16,11	0,0003

Suite Annexe 12...

3- Carbone 5 traitements : contributions relatives (%)

1) Arbres d'ombrage et cacaoyers

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	10969,53544	2742,38386	6,00	0,0011
Erreur	31	14180,47705	457,43474		
Total	35	25150,01249			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	2766,357326	2766,357326	6,05	0,0197
-Cacao vs banane	1	1827,293507	1827,293507	3,99	0,0545
-Multi vs mono	1	0,574213	0,574213	0,00	0,9720
-Jjeune vs Jâgée	1	3714,702262	3714,702262	8,12	0,0077

2) Petits arbres issus d'une régénération naturelle (transformation LOG)

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	6,99694292	1,74923573	11,84	<,0001
Erreur	31	4,57950013	0,14772581		
Total	35	11,57644305			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	3,55014020	3,55014020	24,03	<,0001
-Cacao vs banane	1	0,62159073	0,62159073	4,21	0,0488
-Multi vs mono	1	0,00024079	0,00024079	0,00	0,9681
-Jjeune vs Jâgée	1	1,11405262	1,11405262	7,54	0,0099

3) Végétation herbacée (transformation LOG)

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	4,87546675	1,21886669	13,56	<,0001
Erreur	31	2,78737746	0,08991540		
Total	35	7,66284421			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	0,35211407	0,35211407	3,92	0,0568
-Cacao vs banane	1	2,74296265	2,74296265	30,51	<,0001
-Multi vs mono	1	0,01333383	0,01333383	0,15	0,7028
-Jjeune vs Jâgée	1	1,20413947	1,20413947	13,39	0,0009

4) Arbres tombés au sol

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	3924,75805	981,18951	1,51	0,2229
Erreur	32	20806,05023	650,18907		
Total	36	24730,80828			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	3208,239555	3208,239555	4,93	0,0335
-Cacao vs banane	1	239,722388	239,722388	0,37	0,5480
-Multi vs mono	1	449,633984	449,633984	0,69	0,4118
-Jjeune vs Jâgée	1	222,109246	222,109246	0,34	0,5630

Suite Annexe 12...

5) Souches

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	447,11447	111,77862	0,25	0,9069
Erreur	32	14246,81225	445,21288		
Total	36	14693,92672			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	7,9518931	7,9518931	0,02	0,8945
-Cacao vs banane	1	12,1806744	12,1806744	0,03	0,8697
-Multi vs mono	1	3,1057433	3,1057433	0,01	0,9340
-Jjeune vs Jâgée	1	335,1122780	335,1122780	0,75	0,3921

6) Humus jeune (transformation $\sqrt{\quad}$)

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	42,8991750	10,7247938	3,98	0,0099
Erreur	32	86,2083898	2,6940122		
Total	36	129,1075648			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	33,13045049	33,13045049	12,30	0,0014
-Cacao vs banane	1	1,24403237	1,24403237	0,46	0,5017
-Multi vs mono	1	3,91380313	3,91380313	1,45	0,2369
-Jjeune vs Jâgée	1	0,00000165	0,00000165	0,00	0,9994

7) Carbone aérien vivant (transformation angulaire)

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	1,72654287	0,43163572	39,94	<,0001
Erreur	40	0,43224635	0,01080616		
Total	44	2,15878921			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	0,49003772	0,49003772	45,35	<,0001
-Cacao vs banane	1	0,68462392	0,68462392	63,35	<,0001
-Multi vs mono	1	0,00080606	0,00080606	0,07	0,7862
-Jjeune vs Jâgée	1	0,55107517	0,55107517	51,00	<,0001

8) Carbone aérien mort

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	389,234456	97,308614	1,96	0,1195
Erreur	40	1987,368771	49,684219		
Total	44	2376,603228			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	201,9621583	201,9621583	4,06	0,0505
-Cacao vs banane	1	20,2993207	20,2993207	0,41	0,5263
-Multi vs mono	1	134,2054774	134,2054774	2,70	0,1081
-Jjeune vs Jâgée	1	32,7674999	32,7674999	0,66	0,4215

Suite Annexe 12...

9) Carbone racinaire

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	252,4321183	63,1080296	35,73	<,0001
Erreur	40	70,6538494	1,7663462		
Total	44	323,0859677			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	47,1275046	47,1275046	26,68	<,0001
-Cacao vs banane	1	106,1776715	106,1776715	60,11	<,0001
-Multi vs mono	1	3,4516513	3,4516513	1,95	0,1698
-Jjeune vs Jâgée	1	95,6752909	95,6752909	54,17	<,0001

10) Carbone du sol

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	4	11421,91910	2855,47978	39,38	<,0001
Erreur	40	2900,13508	72,50338		
Total	44	14322,05418			
Contrastes					
-Saf vs jachères	1	2019,070880	2019,070880	27,85	<,0001
-Cacao vs banane	1	5202,822784	5202,822784	71,76	<,0001
-Multi vs mono	1	125,640064	125,640064	1,73	0,1955
-Jjeune vs Jâgée	1	4074,385377	4074,385377	56,20	<,0001

4- Régression du carbone emmagasiné en fonction de l'âge de la jachère (n = 5)

1) Arbres d'ombrage et cacaoyers

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	2	1310,966709	655,483354	410,78	0,0024
Erreur	2	3,191419	1,595710		
Total	4	1314,158128			
Régression					
Âge	1	1161,029066	1161,029066	727,59	0,0014
Âge*âge	1	149,937642	149,937642	93,96	0,0105

2) Petits arbres issus d'une régénération naturelle

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	2	0,06218655	0,03109328	0,21	0,8239
Erreur	2	0,29092299	0,14546150		
Total	4	0,35310955			
Régression					
Âge	1	0,02515880	0,02515880	0,17	0,7179
Âge*âge	1	0,03702775	0,03702775	0,25	0,6640

Suite Annexe 12...

3) Végétation herbacée

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	2	0,01179465	0,00589732	0,43	0,6975
Erreur	2	0,02719574	0,01359787		
Total	4	0,03899039			
Régression					
Âge	1	0,00193133	0,00193133	0,14	0,7425
Âge*âge	1	0,00986332	0,00986332	0,73	0,4841

4) Arbres tombés au sol

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	2	26,67524618	13,33762309	0,81	0,5536
Erreur	2	33,07991175	16,53995588		
Total	4	59,75515793			
Régression					
Âge	1	10,11276306	10,11276306	0,61	0,5161
Âge*âge	1	16,56248312	16,56248312	1,00	0,4224

5) Souches

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	1	2,47106729	2,47106729	96,95	0,0022
Erreur	3	0,07646352	0,02548784		
Total	4	2,54753081			
Régression					
Âge	1	2,47106729	2,47106729	96,95	0,0022

6) Humus jeune

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	1	0,55626169	0,55626169	30,44	0,0117
Erreur	3	0,05482829	0,01827610		
Total	4	0,61108998			
Régression					
Âge	1	0,55626169	0,55626169	30,44	0,0117

7) Carbone aérien vivant

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	2	1295,309674	647,654837	538,37	0,0019
Erreur	2	2,405963	1,202982		
Total	4	1297,715637			
Régression					
Âge	1	1148,795239	1148,795239	954,96	0,0010
Âge*âge	1	146,514435	146,514435	121,79	0,0081

Suite Annexe 12...

8) Carbone aérien mort

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	2	46,73280017	23,36640009	2,09	0,3240
Erreur	2	22,39566618	11,19783309		
Total	4	69,12846635			
Régression					
Âge	1	33,40149508	33,40149508	2,98	0,2263
Âge*âge	1	13,33130510	13,33130510	1,19	0,3891

9) Carbone racinaire

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	2	62,36713190	31,18356595	134,38	0,0074
Erreur	2	0,46409522	0,23204761		
Total	4	62,83122711			
Régression					
Âge	1	54,12478755	54,12478755	233,25	0,0043
Âge*âge	1	8,24234434	8,24234434	35,52	0,0270

10) Carbone du sol

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	2	118,3318205	59,1659103	1,03	0,4938
Erreur	2	115,4333990	57,7166995		
Total	4	233,7652196			
Régression					
Âge	1	10,0677180	10,0677180	0,17	0,7168
Âge*âge	1	108,2641025	108,2641025	1,88	0,3043

11) Carbone total

Source	d.l.	SC	MC	Valeur F	Pr > F
Modèle	2	3363,188353	1681,594177	29,05	0,0333
Erreur	2	115,765065	57,882532		
Total	4	3478,953418			
Régression					
Âge	1	2520,361942	2520,361942	43,54	0,0222
Âge*âge	1	842,826411	842,826411	14,56	0,0623

Légende : Source = source de variation, d.l. = degrés de liberté, SC = somme des carrés, MC = moyennes des carrés, SAF = systèmes agroforestiers (cacaoyers et bananiers), Multi = cacaoyers sous ombrage multi-spécifique, Mono = cacaoyers sous ombrage mono-spécifique, Jjeune = jachère jeune (1-3 ans), Jâgée = jachère âgée (6-10 ans).

Annexe 13. Images de jachères illustrant la difficulté de localiser la composante souche dans les PPE



Jachère jeune (1 à 3 ans)



Jachère âgée (6 à 10 ans)

Source : Grégoire Valentini, 2005

Annexe 14. Détails des coûts et bénéfices associés aux différents systèmes étudiés pour un hectare en culture

1) Cacao

Concepts	Années	Unité	Prix unitaire (\$US)	Quantité	Valeur (\$US)
1. Coûts (A+B+C)					846
A. Main d'œuvre ²⁷				130	541
* Préparer terrain	1	Jour	4,16	10,0	41,6
* Installer piquets	1	Jour	4,16	7,0	29,1
* Creuser trous	1	Jour	4,16	5,0	20,8
* Semer	1	Jour	4,16	7,0	29,1
* Nettoyer plantules	1	Jour	4,16	6,0	25,0
* Désherbage année 1	1	Jour	4,16	20,0	83,2
* Désherbage 2 ans et +	2 et +	Jour	4,16	27,0	112,3
* Taille de formation	1	Jour	4,16	2,5	10,4
* Taille d'entretien année 3	3	Jour	4,16	3,0	12,5
* Taille d'entretien année 4	4	Jour	4,16	8,0	33,3
* Taille d'entretien 5 ans et +	5 et +	Jour	4,16	6,0	25,0
* Éliminer les rejets	2 et +	Jour	4,16	3,5	14,6
* Récolte	3 et +	Jour	4,16	25,0	104,0
B. Matériel					255
* Semences		Unité	0,21	1111	233,3
* Sacs pour la récolte		Unité	0,20	10	2,0
* Machette		Unité	3,60	1	3,6
* Petites machettes		Unité	3,30	2	6,6
* Lime		Unité	7,30	1	7,3
* Pierre		Unité	0,40	1	0,4
* Sécateur		Unité	1,80	1	1,8
C. Transport		Voyage	6,25	8	50,0
2. Production		Kg	0,52	500	260,0
3. Revenus issus de la vente					260

Légende : Jour = journalier travaillant 4 heures par jour, soit généralement de 7h à 11h du matin

²⁷ Le contrôle sanitaire a été inclus dans d'autres activités : taille, élimination des rejets et récolte.

Suite Annexe 14...

2) Banane

Concepts	Années	Unité	Prix unitaire (\$US)	Quantité	Valeur (\$US)
1. Coûts (A+B+C)					1292,9
A. Main d'œuvre				213	886,1
* Préparer terrain	1	Jour	4,16	7	29,1
* Installer piquets	1	Jour	4,16	3	12,5
* Creuser et semer	1	Jour	4,16	16	66,6
* Re-semer	1 et +	Jour	4,16	1	4,2
* Drainage année 1	1	Jour	4,16	5	20,8
* Drainage entretien	2 et +	Jour	4,16	3	12,5
* Désherbage année 1	1	Jour	4,16	30	124,8
* Désherbage 2 ans et +	2 et +	Jour	4,16	24	99,8
* Nettoyer pieds plantes	1 et +	Jour	4,16	2	8,3
* Nettoyer feuillage année 1	1	Jour	4,16	20	83,2
* Nettoyer feuillage 2 ans et +	2 et +	Jour	4,16	24	99,8
* Nettoyer rejets année 1	1	Jour	4,16	4	16,6
* Nettoyer rejets 2 ans et +	2 et +	Jour	4,16	15	62,4
* Installer piquets année 1	1	Jour	4,16	5	20,8
* Installer piquets 2 ans et +	2 et +	Jour	4,16	2	8,3
* Récolte	1 et +	Jour	4,16	52	216,3
B. Matériel					244,3
* Semences		Unité	0,2	1111	222,2
* Machette		Unité	3,6	1	3,6
* Petites machettes		Unité	3,3	2	6,6
* Lime		Unité	7,3	1	7,3
* Pierre		Unité	0,4	1	0,4
* Sécateur pour feuilles		Unité	4,2	1	4,2
C. Transport		Voyage	6,25	26	162,5
2. Production		Kg	0,094	9100	855,4
3. Revenus issus de la vente					855,4

Suite Annexe 14...

3) Riz

Concepts	Unité	Prix unitaire (\$US)	Quantité	Valeur (\$US)
1. Coûts (A+B+C)				472,0
A. Main d'œuvre			106	441,0
* Préparer terrain	Jour	4,16	28	116,5
* Semer	Jour	4,16	20	83,2
* Désherbage d'entretien	c	4,16	26	108,2
* Récolte	Jour	4,16	18	74,9
* Séchage	Jour	4,16	14	58,2
B. Matériel				24,8
* Semences	Kg	0,3	14	4,2
* Sacs	Unité	0,2	30	6,0
* Machette	Unité	3,6	1	3,6
* Petite machette	Unité	3,3	1	3,3
* Lime	Unité	7,3	1	7,3
* Pierre	Unité	0,4	1	0,4
C. Transport	Voyage	6,25	1	6,3
2. Production	Kg	0,3	1200	360,0
3. Revenus issus de la vente				360,0

Suite Annexe 14...

4) Maïs

Concepts	Unité	Prix unitaire (\$US)	Quantité	Valeur (\$US)
1. Coûts (A+B+C)				141,8
A. Main d'œuvre			26	108,2
* Préparer terrain	Jour	4,16	10	41,6
* Récolte	Jour	4,16	12	49,9
* Séchage	Jour	4,16	4	16,6
B. Matériel				27,4
* Semences	Kg	0,4	20	8,0
* Sacs	Unité	0,2	24	4,8
* Machette	Unité	3,6	1	3,6
* Petite machette	Unité	3,3	1	3,3
* Lime	Unité	7,3	1	7,3
* Pierre	Unité	0,4	1	0,4
C. Transport	Voyage	6,25	1	6,3
2. Production	Kg	0,16	960	153,6
3. Revenus issus de la vente				153,6

Annexe 15. Coûts et bénéfices de la production de cacao et de banane échelonnés sur un cycle de 20 ans

1) Cacao

Concepts	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Années 6 à 20
A. Revenus totaux	0,0	0,0	156,0	208,0	260,0	260,0
Production (Kg)	0,0	0,0	300,0	400,0	500,0	500,0
Revenus (\$US)	0,0	0,0	156,0	208,0	260,0	260,0
B. Coûts totaux						
Scénario 1 (\$US)	494,2	126,9	293,4	314,2	305,8	305,8
Scénario 2 (\$US)	81,5	31,7	110,8	116,0	114,0	114,0
C. Bénéfices - coûts (A-B)						
Scénario 1 (\$US)	-494,2	-126,9	-137,4	-106,2	-45,8	-45,8
Scénario 2 (\$US)	-81,5	-31,7	45,2	92,0	146,0	146,0
D. Valeur de la main d'œuvre familiale						Moyenne
75 % de la main d'œuvre familiale (journalier)	43,1	22,9	43,9	47,6	46,1	44,8
Scénario 2 (\$US)	-1,9	-1,4	1,0	1,9	3,2	2,5

Suite Annexe 15...

2) Banane

Concepts	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Années 6 à 20
A. Revenus totaux	855,4	855,4	855,4	855,4	855,4	855,4
Production (Kg)	9100,0	9100,0	9100,0	9100,0	9100,0	9100,0
Revenus (\$US)	855,4	855,4	855,4	855,4	855,4	855,4
B. Coûts totaux						
Scénario 1 (\$US)	1010,0	674,2	674,2	674,2	674,2	674,2
Scénario 2 (\$US)	335,4	290,4	290,4	290,4	290,4	290,4
C. Bénéfices - coûts (A-B)						
Scénario 1 (\$US)	-154,6	181,2	181,2	181,2	181,2	181,2
Scénario 2 (\$US)	520,0	565,0	565,0	565,0	565,0	565,0
D. Valeur de la main d'œuvre familiale						Moyenne
75 % de la main d'œuvre familiale (journalier)	108,8	92,3	92,3	92,3	92,3	93,1
Scénario 2 (\$US)	4,8	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1