



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DEPARTEMENT DES EAUX ET FORETS
PROMOTION « VONA »
(2006 – 2011)

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome
Spécialisation Eaux et Forêts

EMPREINTE CARBONE DE DIFFERENTS TYPES D'EXPLOITATIONS AGRIQUES A BASE DE SYSTEMES AGROFORESTIERS

DISTRICT de FENERIVE-EST

Soutenu par
Joyce Tina Irène RAZAKARATRIMO

Le 07 Octobre 2011

Devant le jury composé de :

Président : Docteur RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostome
Rapporteurs : Docteur RAZAFIMBELO ANDRIAMIFIDY Tantely
Docteur ALBRECHT Alain
Examineurs : Professeur RAZAFINDRAKOTO Marie – Antoinette
Docteur RAZAKAMANARIVO Ramarson Herintsitohaina



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DEPARTEMENT DES EAUX ET FORETS
PROMOTION « VONA »
(2006 - 2011)

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome
Spécialisation Eaux et Forêts



EMPREINTE CARBONE
DE DIFFERENTS TYPES D'EXPLOITATIONS AGRICOLES
A BASE DE SYSTEMES AGROFORESTIERS
DISTRICT de FENERIVE-EST

Soutenu par Joyce Tina Irène RAZAKARATRIMO
Le 07 Octobre 2011

Devant le jury composé de :

Président : Docteur RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostome
Rapporteurs : Docteur RAZAFIMBELO ANDRIAMIFIDY Tantely
Docteur ALBRECHT Alain
Examineurs : Professeur RAZAFINDRAKOTO Marie – Antoinette
Docteur RAZAKAMANARIVO Ramarson Herintsitohaina



Présentation du partenaire



Le CTHT ou Centre Technique Horticole de Tamatave a vu le jour en 2001, sous tutelle du Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche. Cette association interprofessionnelle a été créée afin de pérenniser les actions entreprises dans le cadre du projet de l'Union européenne pour redynamiser le secteur horticole. Ses objectifs principaux sont d'accroître la compétitivité des productions horticoles de la Côte Est et de mettre en place des structures professionnelles de gestion de la qualité.

S'intéressant de près à la culture d'exportation girofle, le CTHT a déjà mis en œuvre le projet « Appui à l'amélioration de la qualité et à la commercialisation du girofle dans le District de Fénérive Est » et continue à exploiter cette filière. Une analyse des systèmes agroforestiers à base de girofliers de cette région ayant été récemment réalisée, la détermination du potentiel de ces systèmes pour entrer dans le marché du carbone constitue une seconde étape. Le potentiel de séquestration de carbone des girofliers a déjà fait l'objet d'une étude antérieure. Cette recherche se focalise sur une approche plus globale au niveau des exploitations basées sur ces systèmes agroforestiers. La présente étude portant sur les empreintes carbone des exploitations agricoles basées sur les systèmes agroforestiers a bénéficié du soutien logistique et financier de cet organisme.

Remerciements

Je remercie le Seigneur tout puissant d'avoir guidé chacun de mes pas pour la réalisation de ce mémoire et sans Qui ce mémoire n'aurait pu être réalisé.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire et qui par leurs aide, soutien et conseils ont « laissé leur empreinte » dans ce mémoire.

J'exprime toute ma gratitude à :

Monsieur RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostome, Professeur à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), qui a fait l'honneur de présider cette soutenance.

Madame RAZAFIMBELO ANDRIAMIFIDY Tantely, Docteur en Sciences du Sol, Responsable de l'UR Sols et Changements Climatiques au Laboratoire des RadioIsotopes. Son dévouement inconditionnel à l'encadrement de cette recherche, sa disponibilité permanente et ses encouragements continus m'ont donné la force d'aller jusqu'au bout.

Monsieur Alain ALBRECHT, Directeur de Recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement, UMR Eco&Sols. Son aide précieuse, sa disponibilité et ses remarques pertinentes ont rendu cette recherche captivante.

Madame RAZAFINDRAKOTO Marie-Antoinette qui a accepté d'examiner ce travail. Ses encouragements m'ont beaucoup aidée.

Madame RAZAKAMANARIVO Herintsitohaina, Docteur en Sciences du Sol et Foresterie, qui a bien voulu siéger en tant que membre du jury. Ses conseils et les échanges m'ont été d'une grande utilité.

Je remercie Monsieur RAMAMONJISOA Bruno Salomon, Professeur d'Enseignement Supérieur et de Recherche à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Chef de Département des Eaux et Forêts à l'ESSA, pour m'avoir prodigué de précieux conseils et directives lors de la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier Monsieur Michel JAHIEL, Responsable du CTHT. Je lui adresse mes plus vifs remerciements pour son accueil au sein du CTHT et pour m'avoir octroyé les moyens nécessaires afin de mener à bien les travaux de terrain.

Je ne saurais oublier de remercier Madame RABEHARISOA Lilia pour m'avoir accueilli au sein du Laboratoire des Radioisotopes.

Un grand merci à toute l'équipe du CTHT Tamatave, qui a grandement facilité les descentes sur terrain et à toute l'équipe de l'antenne CTHT à Fénérive Est (Messieurs Ronald, Fano, Clark, Christian, Abel et sa famille), pour leur aide inestimable et les échanges très enrichissants.

Merci également à toute l'équipe de l'IRD, à la fois pour le soutien financier et pour l'aide lors des prélèvements de sols. A toute l'équipe du LRI, enseignants, techniciens, collègues et amis : merci pour l'ambiance à la fois chaleureuse et studieuse.

Je remercie aussi tout le personnel enseignant et administratif de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques et du Département des Eaux et Forêts pour l'éducation et les connaissances que j'ai pu acquérir au sein de cet établissement au cours de ces cinq dernières années.

Mes plus vifs remerciements sont également destinés à toutes les familles étudiées qui m'ont accueilli sans aucune hésitation et ont participé activement à cette étude. Je remercie par la même occasion les Maires des Communes Ambodimanga II et Ampasimbe Manantsatrana et les Chefs Fokontany d'Antanetilava II, de Mahavanona, de Marovovonana, de Vohibahiny et d'Ambanja.

Je remercie particulièrement toutes les personnes qui ont facilité mon séjour sur la Côte Est :

- ☞ Monsieur Tantely et sa famille,
- ☞ Madame Kalovahiny Marizety et sa famille
- ☞ La famille Ma-Hong pour son hospitalité
- ☞ Monsieur Mamy Ramparany
- ☞ Monsieur Petera Gervais et sa famille
- ☞ Mes voisins et amis à Fénérive Est

Je ne saurais terminer sans remercier :

- ☞ Monsieur et Madame Herizo Andriamose pour leur aide matérielle
- ☞ Mes amis et spécialement ceux de la promotion Vona-Forêts
- ☞ Michel, Ando et Vola
- ☞ Narindra, pour son aide précieuse
- ☞ Mes parents, qui n'ont jamais cessé de m'encourager et qui m'ont soutenu sans faille, ma grand-mère et ma sœur pour leurs encouragements
- ☞ Fenitra pour son soutien sans faille.

Merci à ceux qui m'ont apporté une quelconque aide et à qui je demande leur indulgence de n'avoir pu tous les citer.

Résumé

Cette présente étude s'est fixée pour objectif de déterminer l'empreinte carbone des exploitations agricoles à base de systèmes agroforestiers dans le District de Fénérive Est. L'empreinte carbone étant l'impact en Equivalents CO₂ des activités au sein de chaque exploitation. La problématique posée a été de déterminer de quelle manière est-ce que les activités de l'exploitation influençaient l'empreinte carbone. Pour cela, une carte des flux des ressources et un inventaire des puits et des sources ont été réalisés pour chacune des huit exploitations issues d'une typologie élaborée antérieurement. Un tableur Excel a été conçu pour calculer l'empreinte carbone à partir de facteurs d'émissions obtenus dans la littérature. La recherche a été menée en prenant en compte les conséquences découlant de la diversification des activités agricoles et de la plantation d'espèces ligneuses agroforestières sur la valeur de l'empreinte carbone. La moyenne de l'empreinte carbone pour ces exploitations s'élève à 7,69 Mg de CO₂ Eq/ha avec des valeurs allant de -0,63 Mg de CO₂ Eq/ha pour les exploitations qui équilibrent les sources et les puits de GES à 21,92 Mg de CO₂ Eq/ha pour celles dont les émissions sont dominantes. La double riziculture traditionnelle est la principale source d'émissions avec 65%. La contribution des systèmes agroforestiers en tant que fonction puits se chiffre entre 15 et 51% de l'empreinte carbone. La nature de chaque activité et de chaque pratique est fortement déterminante pour l'empreinte carbone. Des études approfondies basées sur une typologie liée aux pratiques et menées à une plus grande échelle à la fois spatiale et temporelle méritent toutefois attention.

Mots-clés : Emissions, gaz à effet de serre, agroforesterie, carbone, changement climatique, giroflier, Fénérive Est, Analanjirifo

Abstract

The present study has set the objective to determine the carbon footprint of farm-based agroforestry systems in the District of Fénérive-Est. The carbon footprint is the equivalent CO₂ impact of the activities within each farm. The problem posed was to determine how the activities of the operation influence the carbon footprint. For this, a resources flow map and an inventory of wells and springs were made for each of the eight farms from a typology developed earlier. An Excel spreadsheet was developed to calculate the carbon footprint from emissions factors obtained in the literature. The research was conducted by taking into account the consequences arising from the diversification of agricultural activities and the planting of agroforestry woody species on the value of the carbon footprint. The average carbon footprint for these operations amounted to 7.69 Mg CO₂ eq / ha with values ranging from -0.63 Mg CO₂ eq / ha for farms that balance the sources and sinks of GHG to 21.92 Mg CO₂ eq / ha for those whose emissions are dominant. The traditional twice-a-year rice plantations is the main source of emissions with 65%. The contribution of agroforestry systems as well allows for a level between 15 and 51% of the carbon footprint. The nature of each activity and each practice is highly critical to the carbon footprint. However, extensive studies based on a classification-related practices and implemented more widely in both space and time, however, deserve attention.

Keywords : Emissions, greenhouse gases, agroforestry, carbon, climate change, clove tree, Fénérive Est, Analanjirifo

Famintinana

Tanjona napetraka tamin'ity asa ity ny fikarohana ny « dia karbonina » avy amin'ny toeram-piompiana sy fambolena izay misy voly hazo mivady amin'ny fambolena sy fiompiana any amin'ny Fivondronana Feniarivo Atsinanana. Ny « dia karbonina » dia vokatra azo avy amin'ny fikajiana ny taha- CO₂ amin' ireo entona miditra sy mivoaka amin'ny lahasa atao ao amin'ny toeram-pambolena sy fiompiana. Fanontaniana mipetraka ary ny hoe : Inona no fiantraikan'ny fampiasana fomba famokarana samihafa eo amin'ny « dia karbonina » eo amin'ny toeram-pamokarana iray ? Nosoritana an-tsary ny fikorianan'akora rehetra mivezivezy eo anivon'ny toeram-pamokarana tsirairay izay miisa valo ; nosinganina tsirairay ireo fomba enti-mamokatra isaky ny toeram-pamokarana ka nosokajina ho fomba famokarana mpamoaka na mpitroka entona mampafana ny tany, anisan'izany ny karbonina. Mahatratra 7,69 Mg na CO₂ Eq/ha ny sahalanisan'ny “dia karbonina” teo amin'ireo toeram-pamokarana ireo ka eo amin'ny -0,63 Mg na CO₂ Eq/ha ny an'ny famokarana mampifandrindra ny mpamoaka sy mpitroka entona mampafana ny tany ka hatramin'ny 21,92 Mg de CO₂ Eq/ha ho an'ireo izay bebe kokoa ny famoahana. Ny fambolem-bary nentim-paharazana indroa isan-taona no tena mamokaka entona be indrindra ary mahatratra 65%. Ny fomba fambolena misy voly hazo mivady amin'ny fambolena sy fiompiana dia eo amin'ny 15 et 51% ny “dia karbonina”. Hita soritra fa tena manan-danja sy misy fiantraikany lehibe eo amin'ny “dia karbonina” ny lahasa atao sy ny fomba fambolena. Saingy ilaina ihany na izany aza no manao fikarohana lalindalina kokoa miompana amin'ny famaritana ireo fomba fambolena isan-tsokajiny sy mahasahana toerana sy fotoana bebe kokoa.

Teny manan-danja : Entona mampafana ny tany , voly hazo mivady amin'ny fambolena sy fiompiana , karbonina, fiovan'ny toetr'andro, jirofo, Feniarivo Atsinanana, Analanjirofo

Table des matières

Liste des acronymes.....	i
Unités et symboles chimiques	ii
Liste des équations.....	ii
Liste des cartes	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	v
Liste des annexes	vi
Glossaire	vii
I. INTRODUCTION.....	1
II. PROBLEMATIQUE, HYPOTHESES et OBJECTIFS.....	3
II.1 Problématique.....	3
II.2 Hypothèses	4
II.3 Objectifs de recherche	4
III. MATERIELS ET METHODES.....	5
III.1 Présentation du milieu d'études.....	5
III.1.1 Milieu physique	5
III.1.2 Milieu biologique	6
III.1.3 Milieu humain	7
III.2 Caractéristiques des exploitations agricoles étudiées.....	7
III.2.1 La typologie CTHT	7
III.2.2 Localisation des exploitations agricoles	8
III.3 Travaux de terrain	9
III.3.1 Enquêtes	9
III.3.2 Relevés GPS	10
III.3.3 Inventaire des espèces ligneuses et mesures dendrométriques.....	10
III.3.4 Prélèvement de sols	10
III.3.5 Prélèvement des résidus de distillation.....	11
III.4 Travaux de laboratoire.....	11

III.4.1	Préparation des échantillons de sols	11
III.4.2	Dosage du carbone du sol.....	11
III.4.3	Densité apparente	12
III.5	Traitement et analyse des données	12
III.5.1	Carte des Flux des Ressources	12
III.5.2	Calcul de l’empreinte carbone.....	13
III.5.3	Détermination des stocks de carbone	19
III.5.4	Cadre opératoire	20
IV.	RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	22
IV.1	Empreinte carbone par type d’exploitation agricole.....	22
IV.1.1	Type « Avec moyens - jeune exploitation / à dominance AFS »	22
IV.1.2	Type « Avec moyens_ jeune exploitation_ à dominance AFC »	24
IV.1.3	Type « Avec moyens_ exploitation âgée_ à dominance AFS »	26
IV.1.4	Type « Avec moyens_ exploitation âgée_ à dominance AFC ».....	28
IV.1.5	Type « Sans moyens_ jeune exploitation_ à dominance AFS ».....	30
IV.1.6	Type « Sans moyens_ jeune exploitation_ à dominance AFC »	32
IV.1.7	Type « Sans moyens_ exploitation âgée_ à dominance AFS »	34
IV.1.8	Type « Sans moyens_ exploitation âgée_ à dominance AFC ».....	36
IV.2	Stocks de carbone des exploitations agricoles.....	38
IV.2.1	Stock de carbone du sol.....	38
IV.2.2	Stock de carbone de la biomasse ligneuse.....	40
V.	DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS	41
V.1	Discussions	41
V.1.1	Sur la méthodologie.....	41
V.1.2	Sur les résultats.....	42
V.2	Recommandations	50
V.2.1	Apports et intérêts de la recherche	50
V.2.2	Recommandations méthodologiques.....	50
V.2.3	Recommandations pratiques.....	52
VI.	CONCLUSION.....	54
	Références bibliographiques.....	55
	Annexes	I

Liste des acronymes

ACCA :	Adaptation au Changement Climatique en Afrique
AFC :	Agroforesterie Complexe
AFS :	Agroforesterie Simple
AMA :	Accroissement Moyen Annuel
ASECNA :	Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
CCNUCC :	Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CIRAD :	Centre de coopération Internationale en recherche Agronomique pour le Développement
CTHT :	Centre Technique Horticole de Tamatave
DHP :	Diamètre à Hauteur de Poitrine
Emp C :	Empreinte carbone
GES :	Gaz à effet de serre
GIEC :	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GPS :	Global Positioning System
ICRAF :	International Council for Research in Agroforestry
IOV :	Indicateur Objectivement Vérifiable
IPCC :	Intergouvernemental Panel on Climat Change
LCA :	Life Cycle Analysis
MDP :	Mécanisme pour le Développement Propre
MS :	Matière Sèche
ONE :	Office National pour l'Environnement
PANA :	Programme d'Actions National d'Adaptation au changement climatique

PLAR :	Participatory Learning and Action Research
PRG :	Pouvoir de Réchauffement Global
SRA :	Système de Riziculture Amélioré
SRI :	Système de Riziculture Intensif
SRT :	Système de Riziculture Traditionnel

Unités et symboles chimiques

C éq :	C équivalent
C :	Carbone
CH₄ :	Méthane
CO₂ éq :	CO ₂ équivalents
CO₂ :	Dioxyde de carbone
gal :	gallon
Mg :	Mégagrammes
N₂O :	Oxyde nitreux
tep :	Tonne Equivalent Pétrole
K₂Cr₂O₇ :	Dichromate de potassium
H₂PO₄ :	Acide Phosphorique

Liste des équations

ÉQUATION 1: CALCUL DE LA DENSITE APPARENTE DU SOL.....	12
ÉQUATION 2: CALCUL DES EMISSIONS DE GES.....	16
ÉQUATION 3: CALCUL DU STOCK DE CARBONE ORGANIQUE DU SOL.....	19

Liste des cartes

CARTE 1 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....	5
CARTE 2: LOCALISATION DES EXPLOITATIONS AGRICOLES.....	9

Liste des figures

FIGURE 1: TYPOLOGIE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES CONSIDEREE	8
FIGURE 2: PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS DE SOLS.....	11
FIGURE 3: PRINCIPALES SOURCES ET PROCESSUS D'EMISSIONS/ABSORPTIONS DE GES DANS LES ECOSYSTEMES GERES	13
FIGURE 4: CARTE DES FLUX DES RESSOURCES DU TYPE "AVEC MOYENS_ EXPLOITATION JEUNE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE SIMPLE.....	23
FIGURE 5: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION DU TYPE "AVEC MOYENS_ EXPLOITATION JEUNE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE SIMPLE.....	24
FIGURE 6: CARTE DES FLUX DES RESSOURCES DU TYPE "AVEC MOYENS_ EXPLOITATION JEUNE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE COMPLEXE.....	25
FIGURE 7: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION DU TYPE "AVEC MOYENS_ EXPLOITATION JEUNE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE COMPLEXE.....	26
FIGURE 8: CARTE DES FLUX DES RESSOURCES DU TYPE « AVEC MOYENS_ EXPLOITATION AGEE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE SIMPLE ».....	27
FIGURE 9: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION DU TYPE « AVEC MOYENS_ EXPLOITATION AGEE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE SIMPLE ».....	28
FIGURE 10: CARTE DES FLUX DES RESSOURCES DU TYPE « AVEC MOYENS_ EXPLOITATION AGEE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE COMPLEXE ».....	29
FIGURE 11: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION DU TYPE « AVEC MOYENS_ EXPLOITATION AGEE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE COMPLEXE ».....	30
FIGURE 12: CARTE DES FLUX DES RESSOURCES DU TYPE « SANS MOYENS_ EXPLOITATION JEUNE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE SIMPLE ».....	31
FIGURE 13: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION DU TYPE "SANS MOYENS_ EXPLOITATION JEUNE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE SIMPLE.....	32
FIGURE 14: CARTE DES FLUX DES RESSOURCES DU TYPE « SANS MOYENS_ EXPLOITATION JEUNE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE COMPLEXE ».....	33
FIGURE 15: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION DU TYPE "SANS MOYENS_ EXPLOITATION JEUNE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE COMPLEXE ».....	34
FIGURE 16: CARTE DES FLUX DES RESSOURCES DU TYPE « SANS MOYENS_ EXPLOITATION AGEE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE SIMPLE ».....	35
FIGURE 17: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION DU TYPE « SANS MOYENS_ EXPLOITATION AGEE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE SIMPLE ».....	36
FIGURE 18: CARTE DES FLUX DES RESSOURCES DU TYPE « SANS MOYENS_ EXPLOITATION AGEE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE COMPLEXE ».....	37
FIGURE 19: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION DU TYPE « SANS MOYENS_ EXPLOITATION AGEE_ A DOMINANCE D'AGROFORESTERIE COMPLEXE ».....	38

FIGURE 20: STOCKS DE CARBONE DES SOLS DES EXPLOITATIONS.....	39
FIGURE 21: COMPARAISON DES STOCKS DE CARBONE DES SOLS PAR MODE D'OCCUPATION	39
FIGURE 22: STOCK DE CARBONE DE LA BIOMASSE LIGNEUSE POUR LES EXPLOITATIONS ETUDIEES	40
FIGURE 23: EMPREINTE CARBONE PAR HECTARE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES	43
FIGURE 24: DISTRIBUTION DES EMISSIONS MOYENNES ISSUES DES DIFFERENTS POSTES (EN %).....	43
FIGURE 25: DISTRIBUTION DES ABSORPTIONS MOYENNES ISSUES DES DIFFERENTS POSTES (EN %).....	44
FIGURE 26: EMISSIONS DE GES EN FONCTION DES SYSTEMES DE RIZICULTURE	45
FIGURE 27: COMPARAISON DES EMPREINTES CARBONE EN FONCTION DE LA PRESENCE OU NON DE PRATIQUES AGROFORESTIERES	47
FIGURE 28: RELATION ACTIVITES AGRICOLES- EMPREINTE CARBONE- STOCKS C.....	49
FIGURE 29: NOUVELLE TYPOLOGIE PROPOSEE	51

Liste des tableaux

TABLEAU 1: FACTEURS D'EMISSIONS POUR LES PARCELLES DE CULTURE	15
TABLEAU 2: FACTEUR D'EMISSION POUR LES ANIMAUX D'ELEVAGE.....	15
TABLEAU 3: FACTEURS D'EMISSION LIES AUX EFFLUENTS D'ELEVAGE.....	16
TABLEAU 4: FACTEURS D'EMISSIONS LIES AUX CONSOMMATIONS DOMESTIQUES.....	16
TABLEAU 5: DONNEES LIES A L'ACCROISSEMENT MOYEN ANNUEL DE LA BIOMASSE LIGNEUSE	17
TABLEAU 6: ACCUMULATION ANNUELLE DE CARBONE DES ARBRES FRUITIERS	18
TABLEAU 7: POURCENTAGE DE CARBONE RESTITUE AU SOL SUIVANT LE TYPE DE FERTILISANT ORGANIQUE...	19
TABLEAU 8: EQUATIONS ALLOMETRIQUES UTILISEES POUR LE CALCUL DU STOCK DE LA BIOMASSE LIGNEUSE	20
TABLEAU 9: CADRE OPERATOIRE DE LA RECHERCHE	5
TABLEAU 10: QUELQUES VALEURS DE L'EMPREINTE CARBONE D'EXPLOITATIONS AGRICOLES D'ETUDES ANTERIEURES	48
TABLEAU 11 : CADRE LOGIQUE DE STRATEGIES	53

Liste des annexes

ANNEXE 1: COURBE OMBROTHERMIQUE DE LA REGION ANALANJIROFO.....	I
ANNEXE 2: QUESTIONNAIRE D'ENQUETE	II
ANNEXE 3: PRELEVEMENT DE SOLS	VII
ANNEXE 4: PROTOCOLE WALKLEY ET BLACK VERSION JEAN DE LA RIVIERE 2011	VIII
ANNEXE 5: TABLEUR EXCEL.....	XI
ANNEXE 6: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION TYPE « AVEC MOYENS_ JEUNE EXPLOITATION_ A DOMINANCE AFS »	XVIII
ANNEXE 7: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION TYPE « AVEC MOYENS_ JEUNE EXPLOITATION_ A DOMINANCE AFC »	XVIII
ANNEXE 8: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION TYPE « AVEC MOYENS_ EXPLOITATION AGEE_ A DOMINANCE AFS »	XIX
ANNEXE 9: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION TYPE « AVEC MOYENS_ EXPLOITATION AGEE_ A DOMINANCE AFC »	XIX
ANNEXE 10: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION TYPE « SANS MOYENS_ JEUNE EXPLOITATION_ A DOMINANCE AFS	XX
ANNEXE 11: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION TYPE « SANS MOYENS_ JEUNE EXPLOITATION_ A DOMINANCE AFC »	XX
ANNEXE 12: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION TYPE « SANS MOYENS_ EXPLOITATION AGEE_ A DOMINANCE AFS »	XXI
ANNEXE 13: EMPREINTE CARBONE DE L'EXPLOITATION TYPE « SANS MOYENS_ EXPLOITATION AGEE_ A DOMINANCE AFC »	XXI
ANNEXE 14 : CARTES DU CARBONE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES.....	XXII

Glossaire

Changement climatique : Variation de l'état du climat, que l'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. (GIEC, 2007).

Gaz à effet de serre : Gaz qui absorbent une partie des rayons solaires en les redistribuant sous la forme de radiations qui rencontrent d'autres molécules de gaz, répétant ainsi le processus et créant l'effet de serre, d'où augmentation de la chaleur. (GIEC, 2007).

Puits : Tout processus, activité ou mécanisme qui élimine de l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol, ou un précurseur d'un gaz à effet de serre. Indiqué dans les étapes finales de la notification par le signe moins (-). (GIEC, 2007).

Source : Tout procédé, activité ou mécanisme qui libère dans l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre. Indiqué dans les étapes finales de la notification par le signe plus (+). (GIEC, 2007).

Stock de carbone : Quantité de carbone dans un bassin. (GIEC, 2007).

Facteur d'émissions : Coefficient qui associe les données sur les activités au volume du composé chimique qui est la source d'émissions ultérieures. Les facteurs d'émission sont souvent basés sur un échantillon de données de mesures, moyennées pour établir un taux d'émission représentatif pour un niveau d'activités donné dans des conditions de service données. (GIEC, 2007).

Equivalent dioxyde de carbone : Mesure utilisée pour comparer différents gaz à effet de serre et basée sur leur Potentiels de Réchauffement Global (PRG). Les PRG sont calculés comme le rapport entre le forçage radiatif d'un kilogramme de gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère et celui d'un kilogramme de CO₂ sur une période donnée (en général 100 ans). (GIEC, 2007).

Biomasse : Matière organique aérienne et souterraine, vivante et morte, par exemple, arbres, cultures, graminées, litière, racines, etc. (GIEC, 2007).

Flux : Le taux du flux de tout liquide ou gaz, dans un lieu donné ; la quantité de celui-ci qui traverse un lieu donné à un temps donné. Ex. : « Le flux de CO₂ absorbé par les forêts ». (GIEC, 2007).

Système agroforestier ou agroforesterie : L'agroforesterie désigne l'ensemble des systèmes et des techniques d'utilisation des terres où des plantes ligneuses vivaces sont délibérément associées aux cultures ou à la production animale sous forme d'un arrangement spatial ou d'une séquence temporelle prenant place sur une même unité de gestion de la terre. Les systèmes agroforestiers sont caractérisés par des interactions écologiques et économiques entre leurs diverses composantes (ICRAF).

Compartiment : Division effectuée au niveau d'une exploitation agricole.



INTRODUCTION



I. INTRODUCTION

Le réchauffement du système climatique est indéniable. Il se manifeste par une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, une fonte massive de la neige et de la glace et, une élévation du niveau moyen de la mer. L'augmentation de la concentration des Gaz à Effet de Serre (GES) dans l'atmosphère est aujourd'hui reconnue comme responsable de cette hausse des températures. La concentration atmosphérique du dioxyde de carbone (CO₂), principal GES, est passée de 280 ppm durant l'ère préindustrielle à 379 ppm en 2005 (GIEC, 2007). La déforestation contribue à 18% des émissions de GES tandis que 14% des émissions sont imputées à l'Agriculture (Global Canopy Program, 2009). Pour le secteur AFAT ou Agriculture, Foresterie et autres affectations des terres, les émissions sont attribuées principalement aux gaz suivants : le CO₂, le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O). Le CO₂ provient en majorité des combustibles fossiles (56,6%) mais aussi du déboisement et de la décomposition de la biomasse (17,3%). Le CH₄ et le N₂O contribuent respectivement à 14,3% et 7,9% des émissions (GIEC, 2007).

A cet effet, des résolutions et des actions au niveau mondial ont été entreprises pour faire face aux sérieuses menaces écologiques et économiques qui pourraient résulter des changements climatiques, en concordance avec les recommandations du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC). La Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC), au Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, s'est distinguée par la réglementation des niveaux de concentration atmosphérique des GES suivant deux procédés. D'un côté, il y a l'adaptation aux changements, et d'un autre côté, l'atténuation de ces changements. Le premier cas concerne l'adaptation des systèmes naturels et humains aux stimuli climatiques, soit pour en atténuer les inconvénients, soit pour en tirer profit des avantages. Le second se matérialise par des interventions anthropiques en vue de diminuer les GES des sources et d'augmenter ceux des puits (GIEC, 2001). La signature du Protocole de Kyoto en 1997 marque la naissance du marché du carbone en proposant des mécanismes de flexibilité pour la réduction des émissions de GES. Deux options s'offrent alors : d'une part, la réduction des émissions anthropiques de carbone, d'autre part, la création ou l'accroissement des puits de carbone. Un de ces mécanismes, le Mécanisme de Développement Propre ou MDP vise à permettre à des institutions ou des pays émetteurs de financer des réductions d'émissions dans des pays en développement par le biais de projets ou de programmes d'activités.

Madagascar a ratifié la CCNUCC en 1998 et le Protocole de Kyoto en 2003. Sa participation active à la mise en œuvre de la CCNUCC à travers la stratégie d'adaptation se manifeste par l'élaboration du Programme d'Action National d'Adaptation au Changement Climatique (PANA) en 2005. Par ces engagements, elle peut accéder aux projets MDP. Selon la CCNUCC, l'agroforesterie figure parmi les activités de boisement/reboisement éligibles dans le cadre des mécanismes considérés. Elle constitue également une opportunité économique pour les paysans des pays en développement par

la vente du carbone issu des activités de l'agroforesterie (Smith et Scherr, 2002). De plus, son rôle pour faire face aux problèmes d'utilisation des terres et au réchauffement climatique induit par la concentration des gaz à effet de serre a déjà été démontré (Albrecht et Kandji, 2003). Madagascar peut exploiter ce mode d'utilisation des terres pour aborder le marché du carbone. La Côte Est de Madagascar est caractérisée par une abondance de systèmes agroforestiers composés de cultures de rente telles que le giroflier et le litchi et d'autres arbres fruitiers (Randevoson, 2009). De précédentes recherches menées par Ramiandrisoa (2011) sur ces systèmes agroforestiers de la Région Atsinanana et Analanjirofo ont déjà été axées sur le potentiel de stockage de carbone de ces systèmes, en vue d'accéder au marché du carbone.

Cette étude, quant à elle, est focalisée sur la détermination des empreintes carbone des exploitations agricoles du District de Fénérive Est dont le système agraire est dominé par les cultures de rente plus ou moins associés aux cultures vivrières annuelles (Projet ACCA Madagascar, 2010). Le terme *empreinte carbone* a vu le jour suite aux préoccupations liées au changement climatique et englobe d'une manière globale les émissions de CO₂ ou des autres GES, exprimés en équivalents CO₂ (Wiedmann et Minx, 2008). Faisant suite aux recherches menées par le Centre Technique Horticole de Tamatave CTHT et le CIRAD sur les systèmes agroforestiers de girofliers de cette zone, ce présent mémoire entend donner des estimations de l'empreinte carbone de ces exploitations, classées selon une typologie définie antérieurement par ces deux institutions.

Après cette partie introductive, la deuxième partie de cet ouvrage traitera de la problématique de cette étude et des hypothèses de recherche. Les matériels et méthodes seront détaillés en partie trois. Les résultats et leurs interprétations suivront par la suite et feront l'objet de discussions. La dernière partie présentera les conclusions de l'étude.

II. PROBLEMATIQUE, HYPOTHESES et OBJECTIFS

II.1 Problématique

L'affectation et la gestion des terres ont des conséquences sur différents processus de l'écosystème qui affectent les flux des GES (GIEC, 2003). Une revue de la littérature a montré une recrudescence des travaux de quantification des émissions de GES pour agir face au changement climatique. Le concept d'empreinte carbone ou « carbon footprint » est une approche en plein essor pour quantifier ces gaz (Pandey, 2010). C'est la contribution aux émissions de GES des activités humaines, émissions quantifiées en Equivalents Carbone en fonction de leur Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) (Wiedmann et Minx, 2008).

Au niveau international, de nombreuses études centrées sur l'empreinte carbone ont déjà été menées à ce jour. Elles ont porté sur les cultures (Hillier et al., 2009 ; Gan et al., 2011 ; Cheng et al., 2011) mais sur les fermes également (Topp et Rees, 2008). Pour le cas de Madagascar, l'empreinte carbone est un nouveau concept. De nombreux travaux sur les GES ont pourtant déjà été conduits, pour le cas de la riziculture (Albrecht et Razafimbelo, 2010), le semis direct (Razafimbelo, 2005), la reforestation (Razafindramanana, 2006 ; Razafimahatratra, 2006 ; Razakamanarivo, 2009) et l'agroforesterie (Ramiandrisoa, 2011). Une étude récente a étudié l'empreinte carbone au niveau des exploitations agricoles (Rakotovao, 2011). L'évaluation des émissions de GES au niveau de l'exploitation constitue ainsi une suite et un moyen pour agir à l'échelle même de l'ensemble des composantes de l'exploitation afin de contribuer à la réduction des émissions de GES.

L'agroforesterie est, d'après l'ICRAF, un système de gestion des ressources dynamique, écologique et naturel et qui, par l'intégration des arbres dans le paysage, permet une production durable et diversifiée, procurant au paysan des bénéfices sociaux, économiques et environnementaux accrus. Les systèmes agroforestiers sont des puits de GES, à la fois par la diversification des espèces ligneuses et les sols en tenant compte de l'aménagement de ces systèmes et de leur mode de gestion (Montagnini et Nair, 2004). Dans le cas spécifique du District de Fénérive – Est, où les cultures de rente (girofle, litchi et café) sont fortement mélangées avec les cultures annuelles et la riziculture sur brûlis (Soamazava, 2008 et Randevoson, 2009), le mode de gestion des ligneux et des autres cultures, sans omettre les animaux d'élevage prend toute son importance. Les systèmes agroforestiers sont entièrement intégrés dans les exploitations agricoles.

Ainsi, face à ces constatations, la présente étude vise à répondre à la question suivante : **Comment les activités agricoles influent-elles sur l'empreinte carbone des exploitations agricoles à base de systèmes agroforestiers?**

II.2 Hypothèses

Cette question de départ nous à amené à émettre les hypothèses de recherche suivantes :

Hypothèse 1 : *la diversification des activités et pratiques agricoles au sein d'une exploitation augmente son empreinte carbone*

Hypothèse 2 : *la plantation d'espèces ligneuses réduit l'empreinte carbone des exploitations agricoles*

II.3 Objectifs de recherche

L'objectif général de cette étude est de déterminer l'empreinte carbone des exploitations agricoles sélectionnées en fonction de la typologie avancée par le CTHT dans la région de Fénériver Est.

Les objectifs spécifiques sont :

- Etablir pour chaque exploitation une carte des flux de ressources.
- Déterminer les postes sources et puits de GES au niveau de chaque exploitation agricole.
- Evaluer les stocks de carbone du sol et de la biomasse ligneuse au niveau de chaque exploitation agricole.
- Déduire le type d'exploitation à base d'agroforesterie le plus rentable d'un point de vue agronomique et environnemental.

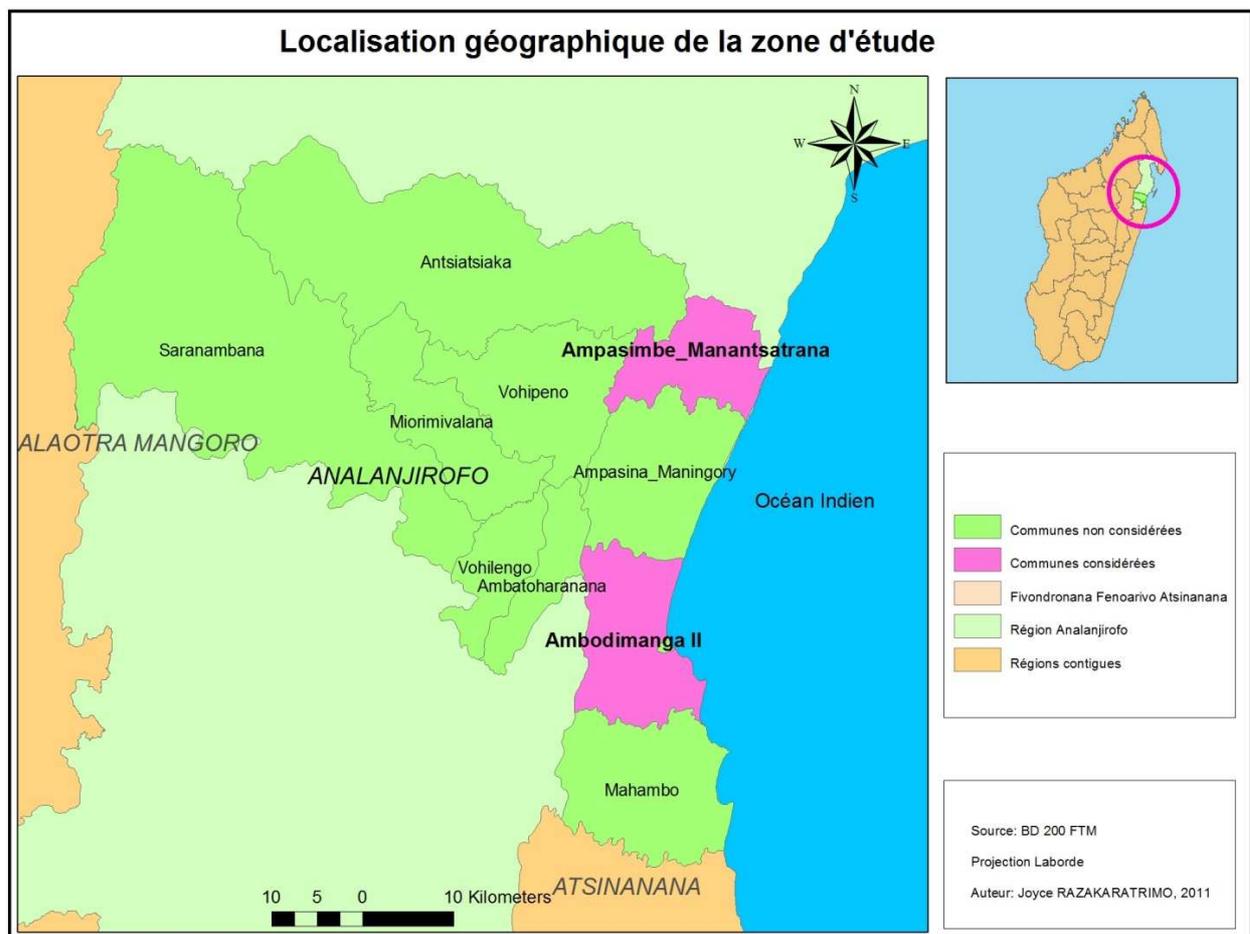


MATERIELS ET METHODES

III. MATERIELS ET METHODES

III.1 Présentation du milieu d'études

Située sur le littoral centre-est de Madagascar, la zone d'étude se trouve au sein de la Région Analanjirofo. Elle concerne le District de Fenoarivo-Atsinanana, compris entre 17°46' et 16°60' de latitude Sud et 48°42' et 50°05' de longitude Est. La ville de Fenoarivo-Atsinanana, Chef-Lieu du District est établie à 100 km de Toamasina, en longeant la RN5. Etendue sur une superficie de 2510 Km², le District de Fénérive Est compte 12 Communes dont quatre ayant fait l'objet d'actions par le CTHT : Ambodimanga II, Ampasimbe Manantsatrana, Vohipeno et Vohilengo (Cf. **Carte 1**).



Carte 1 : Localisation géographique de la zone d'étude

III.1.1 Milieu physique

III.1.1.1 Climat

La Région Analanjirofo fait partie du domaine climatique chaud et humide de l'Est de Madagascar qui est soumis au régime d'Alizé (Donque, 1975 in Ranaivonasy *et al.*, 2003). Elle est caractérisée par l'abondance de précipitations, l'absence de saison sèche marquée et la fréquence des cyclones

(Soamazava, 2008). Les données climatiques recueillies auprès de la Station de l'ASECNA Toamasina, pendant l'intervalle 1995-2007, ont été utilisées pour réaliser la courbe ombrothermique de cette région (Cf. **Annexe 1**).

La pluviosité moyenne annuelle oscille autour de 2500 mm. Le nombre de jours de pluie varie entre 180 et 300 jours par an (Soamazava, 2008). Les mois les plus pluvieux s'étalent de décembre à mars tandis que la période allant du mois d'août au mois de novembre est considérée comme la moins arrosée (RANDEVOSON, 2009). Il n'existe pas de mois éco-secs dans la zone d'étude. La température moyenne annuelle est de 24°C. Les mois les plus chauds sont ceux de décembre à mars et les températures les plus basses sont enregistrées entre le mois de mai et le mois d'août (Randevoison, 2009).

Les perturbations cycloniques sont les cataclysmes naturels les plus redoutés dans la zone d'étude (Ranaivonasy *et al.*, 2003). La région d'Analanjirifo constitue une des trajectoires les plus fréquentées par les cyclones qui sévissent généralement durant la saison des pluies. Entre 1988 et 2008, 13 cyclones ont touché la Région. Les vents violents et les fortes pluies provoquent d'importantes inondations et de nombreux dégâts sur les cultures (Randevoison, 2009).

III.1.1.2 Pédologie

Les sols ferrallitiques dominent la région et sont localisés sur les sommets et les flancs de collines. Des types de sols peu évolués à tendance hydromorphe se sont particulièrement développés à l'aval des cours d'eau et dans les grandes plaines et les marécages près de Fénériver Est, entre autres. Ils sont particulièrement alimentés par les dépôts provenant des sols dégradés en amont. Les sols d'apport fluvial se situent sur les bas-fonds en bordure des cours d'eau (Ranaivonasy *et al.*, 2003).

III.1.1.3 Hydrologie

Le réseau hydrographique de cette zone est particulièrement abondant en conséquence de la forte pluviosité annuelle. Les principaux fleuves, rivières et lacs dans ce District sont: Maningory, Sahavaviana, Saranindona, Mananoka, Sahavatoina (ONE, 2009). La navigation fluviale est un moyen de déplacement courant dans la région (Ranaivonasy *et al.*, 2003).

III.1.2 Milieu biologique

III.1.2.1 Flore et végétation

La végétation originelle d'Analanjirifo se décline en forêts denses humides sempervirentes et en forêts littorales (ONE, 2009). La région Analanjirifo comprend un important réseau de forêts règlementées par divers statuts de protection (Ranaivonasy *et al.*, 2003). Pour le District de Fénériver Est, la forêt de Tampolo, à 10 km de la ville de Fénériver-Est est un vestige de la forêt littorale orientale et possède le statut de Nouvelle Aire Protégée de catégorie 5. Elle regorge à elle seule d'une forêt littorale, d'une

forêt des marécages et d'une forêt temporairement inondée. Une mutation paysagère de la zone a été constatée, les forêts naturelles se transformant peu à peu en savoka et forêts de plantation (RATOVOSON, 2011)

III.1.2.2 Faune

La disparition des habitats naturels dans la région d'étude est à l'origine de l'appauvrissement de sa faune. 185 espèces endémiques ont été recensées dont 50 d'entre elles sont menacées. Les Amphibiens et les Reptiles sont représentés dans cette zone avec respectivement 75 et 70 espèces. Les Oiseaux, avec 98 espèces, se rencontrent majoritairement dans les forêts de basse altitude. Les Mammifères sont répartis de manière égale dans les forêts de basse altitude et celles de moyenne altitude avec 50 espèces pour chaque type de forêt (Ranaivonasy *et al.*, 2003).

III.1.3 Milieu humain

La population de la Région Analanjirofo a été évaluée à 1 042 152 habitants en 2006. Des études moins récentes ont avancé le nombre de 185 547 habitants pour le District de Fénérive-Est, avec une densité de 72 habitants/km², la plus élevée de la Région. Fénérive-Est est donc la zone la plus peuplée mais composée en majorité de ruraux (63%) qui s'accroissent à un rythme de 3,6% par an. Le secteur primaire occupe 92,82% des activités des ménages de la Région Analanjirofo (ONE, 2009). A part les cultures vivrières (riz, manioc, maïs), les cultures de rente (girofle, café, vanille et litchi) occupent une place prépondérante dans les secteurs d'activités.

III.2 Caractéristiques des exploitations agricoles étudiées

III.2.1 La typologie CTHT

Les contraintes temps et moyens n'ont pas permis une analyse exhaustive de toutes les exploitations de la zone d'étude. Les exploitations considérées pour cette étude ont été alors sélectionnées à partir de la typologie établie conjointement par le CTHT et le CIRAD en 2010, relative à leur analyse des exploitations à base de girofliers de la côte est de Madagascar.

La typologie réalisée sur 48 exploitations a été élaborée à partir des critères suivants ;

- le type de ferme selon deux sous-critères : moyens à disposition et âge de l'exploitation,
- le type de système agroforestier dominant.

Le premier critère concerne le capital de chaque ferme, il considère la combinaison du capital foncier, du capital humain (main-d'œuvre) et des ressources financières de chaque exploitation issues à la fois des activités agricoles et non agricoles. Il en ressort ainsi des exploitations avec des moyens et des exploitations sans moyens. A cela s'ajoute l'âge de l'exploitation et donc sa position dans le cycle de vie d'une ferme. Il en découle des exploitations jeunes et des exploitations âgées.

Le critère basé sur l'agroforesterie comporte à la fois les modes de gestion de ces systèmes ainsi que leur structure. Les systèmes agroforestiers de la zone d'étude se différencient par leur organisation spatiale, leur structure (composition en espèces agroforestières et cultures annuelles) et par l'objectif de production des girofliers (production de clous de girofles ou production d'essence de girofle). Les principales formes sont la dominance d'agroforesterie simple (AFS) et la dominance d'agroforesterie complexe (AFC).

Après revue des documents du CTHT concernant la typologie et les caractéristiques des exploitations, huit exploitations, ont été retenues pour l'étude de l'empreinte carbone (Cf. **Figure 1**).

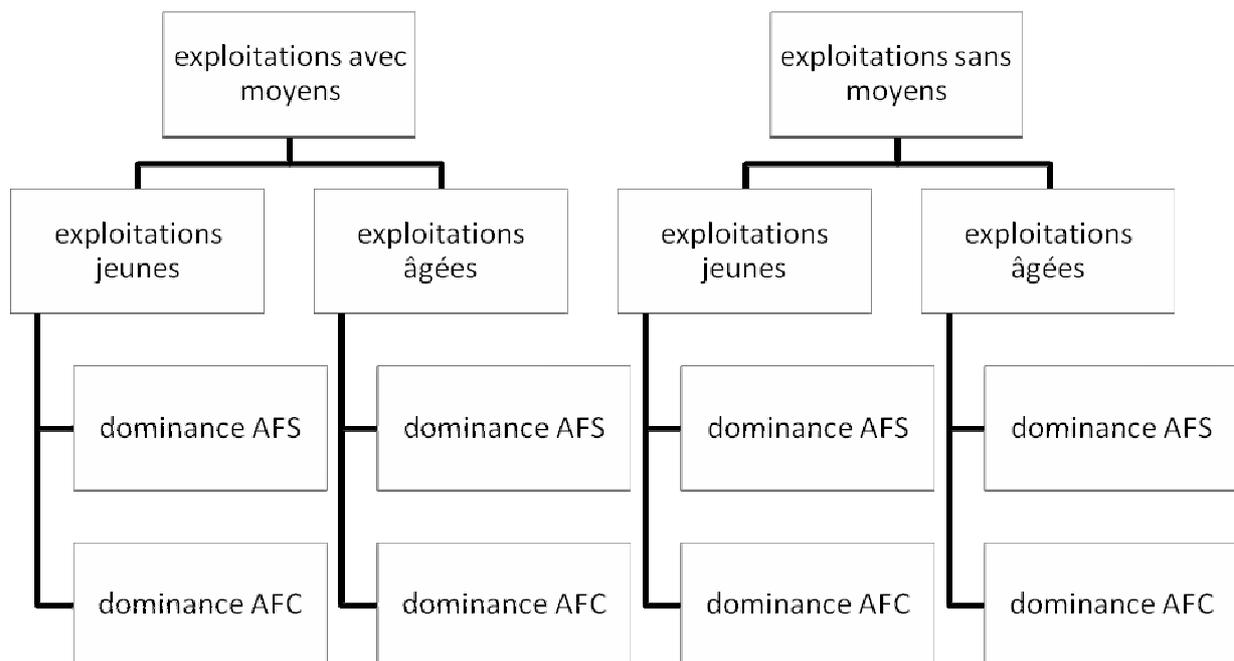


Figure 1: Typologie des exploitations agricoles considérée

III.2.2 Localisation des exploitations agricoles

Les investigations réalisées par le CTHT ont été menées auprès de 48 exploitations réparties sur quatre communes du District de Fénérive-Est : Ampasimbe Manantsatrana, Ambodimanga II, Vohilengo et Vohipeno. Huit exploitations situées dans les Communes Ampasimbe Manantsatrana et Ambodimanga II ont été sélectionnées pour la présente étude à partir de cette typologie, ce qui donne un taux d'échantillonnage de 16,66%. Les exploitations se répartissent comme suit : une dans le village d'Ambanja, trois dans le village de Vohibahiny, deux à Marovovonana. Pour la Commune d'Ambodimanga II, il y a une exploitation pour chacun des villages : Mahavanona et Antanetilava II (Cf. **Carte 2**).

fertilité des sols en Afrique sub-saharienne (Defoer, 2000) et les systèmes de production des exploitations agricoles paysannes de l'Ouganda (Esilaba, 2005).

Elément clé pour établir un diagnostic, la carte des flux des ressources entend donner une image simplifiée et synthétique du fonctionnement de la ferme en représentant de façon schématique les éléments importants. Cette carte permet à l'exploitant de comprendre ce qui se produit à l'intérieur de sa ferme en termes d'utilisation des ressources et son élaboration requiert ainsi sa participation active.

III.3.2 Relevés GPS

Pour chaque exploitation, les parcelles ainsi que leurs limites ont été localisées géographiquement à l'aide d'un GPS afin de faciliter leur cartographie mais aussi dans le but de relever leur superficie.

III.3.3 Inventaire des espèces ligneuses et mesures dendrométriques

Pour quantifier la biomasse ligneuse au niveau de chaque exploitation, un inventaire des espèces ligneuses a été effectué au sein de chaque parcelle. Les caractéristiques des essences agroforestières présentes ont été déterminées, notamment le nombre de pieds, la densité et l'âge. Des mesures du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et des estimations de la hauteur ont été réalisées sur quelques arbres de différents âges.

III.3.4 Prélèvement de sols

Chaque parcelle étudiée a fait l'objet de prélèvement d'échantillons de sols afin d'obtenir au final la quantité de carbone organique du sol. Deux types de prélèvement ont été effectués : d'une part, des prélèvements au cylindre pour la détermination de la densité apparente (Da), et, d'autre part, des prélèvements à la tarière destinés à l'analyse chimique pour le calcul de la teneur en carbone organique du sol. Dans les deux cas, les prélèvements ont été réalisés sur trois horizons : 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm (Cf **Figure 2**).

Un cylindre métallique de volume connu a été utilisé pour prélever en un seul point de la parcelle les échantillons voués à la densité apparente. La mise en sachet des échantillons prélevés au cylindre a été effectuée avec précaution afin d'éviter les pertes de terre pouvant fausser les calculs. Les échantillons pour l'analyse chimique ont été prélevés à la tarière suivant quatre points d'une diagonale pour chaque parcelle. Après mélange des échantillons d'un même horizon, les échantillons composites obtenus ont été également mis en sachet en vue de leur analyse en laboratoire (Cf. **Annexe 3**).

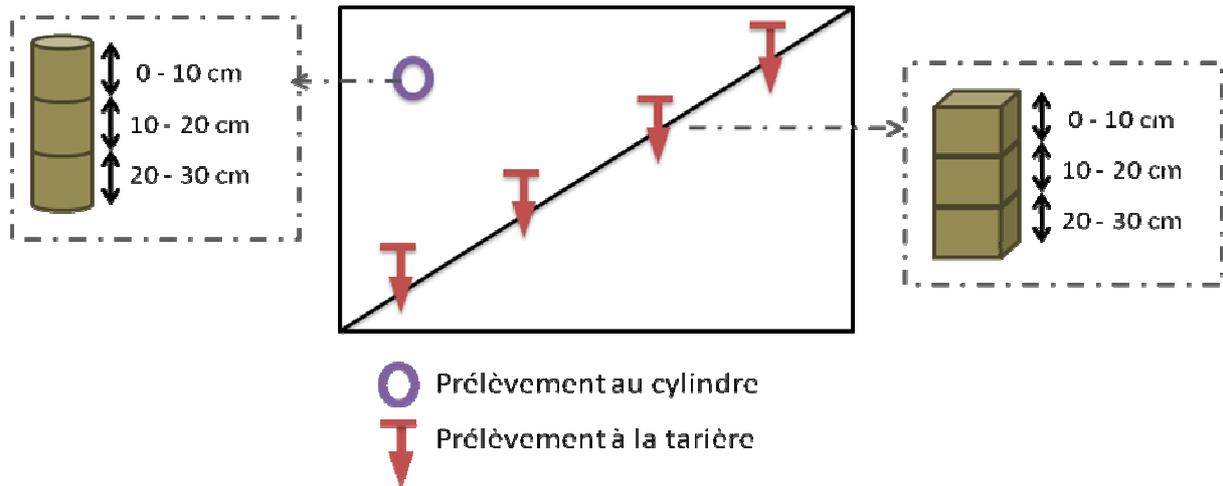


Figure 2: Prélèvement des échantillons de sols

III.3.5 Prélèvement des résidus de distillation

Les résidus provenant des alambics (feuilles de girofliers) ont aussi fait l'objet de prélèvements à la tarière sur une épaisseur de 0 à 70 cm. Les prélèvements ont été réalisés tous les 10 cm, soit un total de 6 échantillons.

III.4 Travaux de laboratoire

III.4.1 Préparation des échantillons de sols

Après un séchage à l'air libre des échantillons (152 échantillons), ces derniers sont tamisés à 2 mm pour éliminer les racines grossières et les fractions minérales > 2mm (graviers, cailloux, etc...). Une aliquote d'environ 20 g a été prélevée, broyée à 0,2 mm pour le dosage du carbone organique. Les résidus d'alambic ont également été séchés à l'air durant 21 jours et passés au broyeur mécanique avant d'être broyé à 0,2 mm.

III.4.2 Dosage du carbone du sol

Le dosage du carbone du sol a été réalisé en appliquant la méthode de combustion par voie humide de Walkley and Black (1934) (Cf. **Annexe 4**). Par cette méthode, la matière organique est oxydée par un oxydant puissant qui est le dichromate de potassium $K_2Cr_2O_7$ en milieu sulfurique. Le sel de Mohr sert ensuite à titrer le dichromate en excès.

Cette méthode se distingue de l'originale par l'utilisation d'un titrateur automatique (Cf. **Photo 1**). L'électrode du titrateur et la burette versant la solution de Sel de Mohr sont plongés dans la fiole contenant l'échantillon à doser (Cf. **Photo 2**). Par rapport à la méthode originale qui se base sur le virage de couleur de l'échantillon et donc sur l'observation du manipulateur, cette méthode repose sur une variation de potentiel de la solution. Quand l'électrode détecte une brusque différence de potentiel de la solution, la burette s'arrête automatiquement de verser le Sel de Mohr, rendant la méthode plus

fiable. Le volume de Sel de Mohr versé dans la fiole s'affiche sur l'écran du titrateur. C'est ce volume qui est utilisé pour le calcul de la teneur en carbone. Le virage de couleur est toujours remarqué en plus de la différence de potentiel.

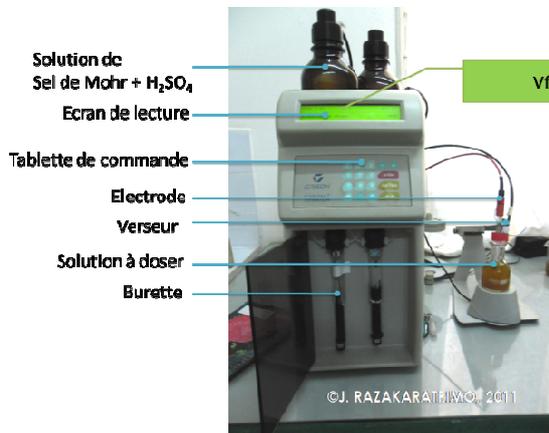


Photo 1: Titrateur

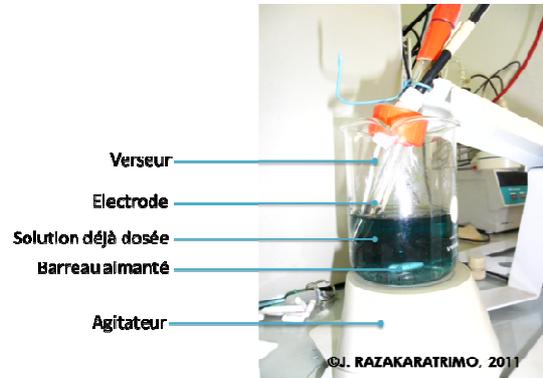


Photo 2 : Eléments du titrateur

III.4.3 Densité apparente

Les 152 échantillons de la deuxième catégorie ont été utilisés pour le calcul de la densité apparente, paramètre permettant de calculer le stock de carbone. La densité apparente (D_a) est le rapport entre la masse volumique sèche de l'échantillon et son volume à l'état humide. Elle a été calculée à partir de la formule suivante :

$$D_a = \frac{\text{Masse sèche de l'échantillon}}{\text{Volume de l'échantillon à l'état humide}}$$

Équation 1: Calcul de la densité apparente du sol

Avec :

D_a : densité apparente ($g.cm^{-3}$)

La masse sèche de l'échantillon en g et le volume de l'échantillon à l'état humide en cm^3

III.5 Traitement et analyse des données

III.5.1 Carte des Flux des Ressources

III.5.1.1 Traitement des données

Les données recueillies sur terrain grâce au questionnaire et lors des entretiens semi-dirigés ont été classées et organisées. Un recoupement des informations avec les données déjà existantes sur les localités étudiées a également été réalisé pour vérifier les informations sur l'ébauche de la carte des flux des ressources réalisée avec le chef d'exploitation lors des entretiens.

III.5.1.2 Caractérisation des compartiments et des flux

Déjà lors de la réalisation de l'ébauche de la carte des flux des ressources avec le chef d'exploitation, les différentes composantes de l'exploitation et des différents flux reliant ces composantes ont été définies. Cette carte a été réalisée pour donner une représentation schématique du fonctionnement de l'exploitation et pour déduire les activités agricoles. Ainsi, les parcelles de culture, les animaux d'élevage, l'habitation du chef d'exploitation, l'unité de distillation (alambic) sont considérés comme des compartiments ou unités fonctionnelles et sont matérialisés par des figures géométriques. A l'intérieur de ces compartiments, chaque type de ressource (cultures produites, espèces ligneuses, animaux d'élevage, fertilisants, combustibles...) est identifié et quantifié annuellement. Les mouvements de ces ressources (consommables) entre les unités fonctionnelles sont représentés par des flèches chiffrées. Les superficies des parcelles, la taille du cheptel sont des données mentionnées obligatoirement dans la carte. Les icônes pour représenter les ressources ont été créés avec le logiciel Paint et la schématisation sous forme numérique de tout l'ensemble a été matérialisé avec le logiciel Powerpoint qui assure une certaine souplesse pour la manipulation des images.

III.5.2 Calcul de l'empreinte carbone

Les diverses activités d'une exploitation agricole sont sources d'émissions de GES (Lal, 2004). En effet, l'affectation et la gestion des terres ont des conséquences sur différents processus de l'écosystème qui affectent les flux de gaz à effet de serre, comme la photosynthèse, la respiration, la décomposition, la nitrification/dénitrification, la fermentation entérique et la combustion (IPCC, 2006) (Cf. **Figure 3**).

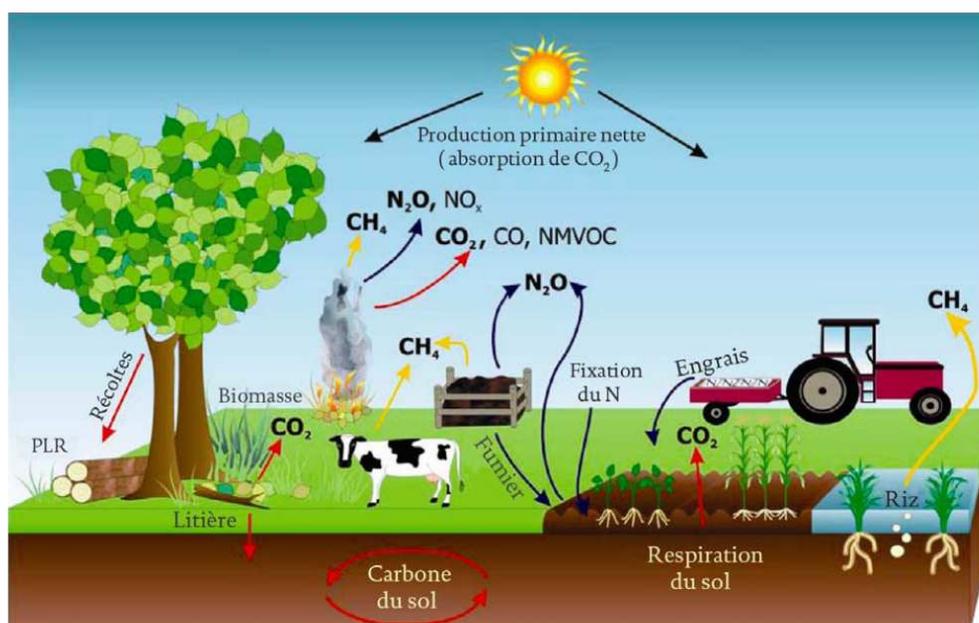


Figure 3: Principales sources et processus d'émissions/absorptions de GES dans les écosystèmes gérés

III.5.2.1 Elaboration du tableur de calcul de l'empreinte carbone

De nombreux calculateurs d'empreinte carbone sont disponibles sur internet, néanmoins, ils présentent le défaut de ne pas exposer en détail la méthodologie adoptée pour les calculs (Padgett et al., 2007). Conçus en majorité dans les pays occidentaux, les facteurs d'émissions qu'ils appliquent ne sont pas forcément adaptés au contexte malgache. D'où la conception d'un nouveau calculateur sous forme d'un tableur Excel pour le calcul de l'empreinte carbone des exploitations de cette étude (Cf. **Annexe 5**).

Une revue de la littérature a été réalisée pour recueillir les « facteurs d'émission » pour les « sources » et les « données liées à l'absorption » pour les « puits ». Les facteurs obtenus par des études nationales ont été priorisés mais les données issues d'études internationales ont été prises en compte si les valeurs recherchées n'existent pas encore pour Madagascar en tenant compte des conditions du milieu où les études ont été réalisées. Le cas échéant, les valeurs par défaut d'IPCC (2006) ont été utilisées.

L'empreinte carbone s'obtient au final par la soustraction du total des émissions par le total des absorptions.

III.5.2.2 Les sources de GES

- Inventaire des sources d'émissions

Les sources des GES inventoriées pour cette étude, en se basant sur la méthodologie de l'IPCC sont :

- les compartiments : rizière et tanety, en tenant compte des processus qui se déroulent sur ces parcelles
- les postes émetteurs : la combustion de la paille, la fermentation entérique, la gestion des effluents d'élevage, les consommations en énergie domestique. L'unité de distillation pour la production d'huile essentielle de girofle est considérée comme un poste émetteur.

Les fertilisants organiques et les pesticides sont parmi les plus importantes sources d'émissions secondaires pour le secteur agricole (Lal, 2004). Cependant, le faible taux d'utilisation de ces intrants dans la zone d'étude (0,4%) (ONE, 2009) n'a pu permettre un approfondissement des émissions liées à leur utilisation, les exploitations étudiées n'utilisant pas ces intrants.

- Facteurs d'émissions utilisés pour les « sources »

Les facteurs d'émissions ont été répertoriés en fonction de chaque source et classés suivant les parcelles de culture (cf. **Tableau 1**), les animaux d'élevage (cf. **Tableau 2**), les effluents d'élevage (cf. **Tableau 3**), l'habitation (cf. **Tableau 4**).

Tableau 1: Facteurs d'émissions pour les parcelles de culture

Sources	Facteurs d'émission	Références bibliographiques
Emissions de CH ₄ par les rizières	- SRI+compost : 0,84kg/Ha/jour - SRA : 3,92 kg/Ha/jour - SRT : 7,45 kg/ Ha/jour	ExAct, 2010
Emissions de N ₂ O par différents systèmes	- SRI+compost : 1kg/Ha/an - SRA : 0,003 kg de N ₂ O-N/kg d'N - Tanety labouré : 0,84 kg de N ₂ O/ha	- IPCC, 2006 - IPCC, 2006 - Lardy, 2009
Minéralisation au champ de différents fertilisants organiques	- résidus de récolte : 89% du C - fumier de bovin : 43,18% du C - fumier de porc : 17% du C - fumier de volaille : 64,13 du C - compost : 15% du C - fiente : 0,155 kg CO ₂ Eq/t	-Razafimbelo,2005, Rabenarivo, 2011 - Andrianaivonirina, 2011 - Falinirina, 2010
Combustion de la paille	- N ₂ O : 13,5 kg EqC/tep - CH ₄ : 78,4 kg EqC/tep - CO ₂ : C de la biomasse brûlée (50%MS)	GLOBAL CHANCE, 2002

Les bovins et les volailles constituent les principaux animaux d'élevage dans la région d'étude. L'élevage de porcs est assez répandu mais les exploitations étudiées n'en possédaient pas. Les émissions issues des volailles sont considérées comme négligeables (IPCC, 2006).

Tableau 2: Facteur d'émission pour les animaux d'élevage

Sources	Facteurs d'émission	Référence
Fermentation entérique	- Bovins : 31 kg de CH ₄ /tête/an	IPCC, 2006

Les émissions attribuées aux effluents d'élevage sont dues à la fabrication et à l'épandage de fertilisants organiques

Tableau 3: Facteurs d'émission liés aux effluents d'élevage

Sources	Facteurs d'émission	Références bibliographiques
Fumier en tas	- CO ₂ : 0,802 kg EqC/t - CH ₄ : 0,057 kg EqC/t - N ₂ O : 0,005 kg EqC/t	ADEME, 2006
Fiente	-CH ₄ : 0,02 kg de CH ₄ /tête/an	IPCC, 2006
Compostage	- CO ₂ : 340,06 g CO ₂ /kg MS - CH ₄ : 0,14 g CH ₄ /kg MS - N ₂ O : 0,162 g N ₂ O/kg MS	Pattey, 2005

Les consommations énergétiques des habitations sont d'origine renouvelable et non renouvelable. A part les consommations propres au foyer, les consommations de carburants pour les activités externes, telles que le décorticage du riz a été intégré dans les consommations domestiques.

Tableau 4: Facteurs d'émissions liés aux consommations domestiques

Sources	Facteurs d'émission	Références bibliographiques
Bois de chauffe	0,01 tCO ₂ Eq/m ³	ExAct, 2010
Pétrole	1,01 kg EqC/kg de fuel	Lal, 2004
Biodiesel	4,2 kg CO ₂ /gal	Mobile combustion Sources, 2004
Gasoil	2,6 tCO ₂ Eq/m ³	ExAct, 2010

- Calcul des émissions

Selon les lignes directrices de l'IPCC pour les inventaires nationaux de GES, le mode de calcul des émissions suit l'équation de base :

$$\text{Émissions de GES} = \text{données sur les activités} * \text{facteur d'émission}$$

Équation 2: Calcul des émissions de GES

Les gaz quantifiés sont le CO₂, le CH₄ et le N₂O. Pour ramener les valeurs des émissions en CO₂ équivalents, les émissions de CH₄ et de N₂O sont multipliées par un coefficient, qui est leur Pouvoir de Réchauffement Global PRG. Les valeurs appliquées dans cette étude sont les valeurs d'IPCC en 2006. Le CH₄ a un PRG égal à 25 et le N₂O un PRG égal à 298.

III.5.2.3 Les puits de GES

- Inventaire des puits de GES

En raisonnant en termes de flux pour les émissions comme pour les absorptions, ce sont les variations de stocks de carbone pendant une année qui sont prises en compte. Ainsi, les puits inventoriés pour cette section sont : les ligneux par leur accroissement moyen annuel et la restitution au sol de la matière organique. Le calcul de l'accroissement moyen annuel des ligneux plantés avec des cultures annuelles a été séparé de celui des ligneux en agroforesterie complexe (plusieurs espèces de ligneux) en rapport avec la typologie.

La biomasse des plantes (souterraine et aérienne) est la principale voie d'absorption du CO₂ depuis l'atmosphère par le phénomène de photosynthèse. Les cultures annuelles sont récoltées chaque année, et il n'y a donc pas de stockage à long terme du carbone dans la biomasse. Par contre, la végétation ligneuse vivace des systèmes forestiers et agroforestiers peut stocker des quantités importantes de carbone dans la biomasse durable, selon l'espèce, la densité, les taux de croissance, et les modes de récolte (IPCC, 2006).

- Calculs des absorptions de la biomasse ligneuse

Pour la biomasse ligneuse, les données utilisées sont soit des facteurs provenant d'équations utilisées pour le calcul de l'accroissement moyen annuel AMA, soit des facteurs calculés à partir des stocks de la biomasse d'une espèce ligneuse donnée rapportés à l'année (Cf. **Tableau 5**). Par ailleurs, en fonction de la forme de l'équation, la densité du bois et le nombre de pieds à l'hectare sont pris en compte.

Les girofliers de cette zone se distinguent par leur tronc fourchu à une hauteur inférieure au DHP, dû aux traitements qu'on leur inflige pour leur exploitation. Que ce soit pour le calcul de l'accroissement ou le calcul des stocks, la présence de ces fourches pour les girofliers a conduit à comptabiliser le nombre de fourches de chaque arbre comme un arbre à part entière (www.fao.org).

Tableau 5: Données liés à l'accroissement moyen annuel de la biomasse ligneuse

Espèce ligneuse	Données sur l'accroissement annuel de la biomasse	Référence
<i>Eucalyptus sp.</i>	14 à 15 m ³ /ha/an	FAO, 2005
<i>Acacia sp.</i>	15 m ³ /ha/an	FAO, 2005
<i>Eugenia cariophyllus</i>	4.44 kg/pied/an	Ramiandrisoa, 2011
<i>Litchi sinensis</i>	9.44 kg/pied/an	Ramiandrisoa, 2011
<i>Glyricidia sp.</i>	4.87 kg/pied/an	Ramiandrisoa, 2011

Pour le calcul de la biomasse des arbres tuteurs de vanilliers ainsi que celle des espèces utilisées comme bois de chauffe telles que *Grevillia banksii* (Fam Proteaceae), l'accroissement annuel utilisé est celui de *Glyricidia sp.*

Pour cette étude, les arbres fruitiers inventoriés dans les parcelles sont : le fruit du jacquier *Artocarpus heterophyllus* (Fam. Moraceae), le fruit à pain *Artocarpus altilis* (Fam. Moraceae), la pomme d'eau *Syzygium malaccense* (Fam. Myrtaceae), le manguier *Mangifera indica* (Fam. Anacardiaceae), le cocotier *Cocos nucifera* (Fam. Palmaceae), le ramboutan *Nephelium Lappaceum* (Fam. Sapindaceae), et les agrumes *Citrus sp.* (Fam Rutaceae). Une estimation globale de l'accumulation de carbone pour les arbres fruitiers a été prise car cette étude demeure une évaluation (Cf. **Tableau 6**). Cette quantification de l'accumulation de carbone a été considérée pour cette étude car les espèces répertoriées par Zemek (2009) (*Artocarpus heterophyllus spp.* (Fam. Moraceae),, *Tamarindus ssp.*, *Dimocarpus longan* et *Mangifera indica*) se rapprochent le plus des espèces trouvées sur le terrain, les deux espèces d'*Artocarpus* étant majoritaires.

Tableau 6: Accumulation annuelle de carbone des arbres fruitiers

Espèces ligneuses	Accumulation en carbone	Référence
Arbres fruitiers mélangés (caféier)	0,51 kg de C/ha/an	Zemek(2009)
Arbres fruitiers	13 kg de C/ha/an	Zemek(2009)

- Calcul du carbone restitué au sol

Les restitutions de matière organique au sol concernent les résidus de culture, les fertilisants organiques. Les résidus de distillation d'huile essentielle de girofliers sont quelquefois utilisés par les paysans pour fertiliser leurs parcelles et ont été également pris en compte (Cf. **Tableau 7**).

Tableau 7: Pourcentage de carbone restitué au sol suivant le type de fertilisant organique

Fertilisants organiques	Pourcentage de carbone restitué	Références
Résidus de récolte	11% du carbone des résidus (carbone de la biomasse=41,1% de la biomasse)	Rabenarivo, 2011 Razafimbelo, 2005
Fumier	51,82% du carbone du fumier (avec carbone du fumier=29,64%)	Andrianaivonirina, 2011
Lisier	83% du carbone du lisier (avec carbone du lisier= 20,11%)	Andrianaivonirina, 2011
Fiente	35,87% du carbone de la fiente (avec carbone de la fiente= 22,3%)	Andrianaivonirina, 2011
Compost	85% du carbone du compost (avec carbone du compost=19,69%)	Pattey, 2005 Andrianaivonirina, 2011

La teneur en carbone des résidus de distillation, après analyse est de 44,5% de la biomasse. Cette valeur a été de suite utilisée pour le calcul de l’empreinte carbone.

III.5.3 Détermination des stocks de carbone

III.5.3.1 Stock de carbone du sol

- **Calcul du stock de carbone**

Après obtention de la teneur en carbone des échantillons de sol pour chaque épaisseur par le dosage du carbone, la formule suivante a été appliquée pour calculer le stock de carbone du sol.

$$SCO = TC * Da * e * 0,1$$

Équation 3: Calcul du stock de carbone organique du sol

Avec : **SCO** : stock de carbone du sol (MgC.ha⁻¹)

TC : teneur en carbone (gC.ha⁻¹)

Da : densité apparente du sol (g.cm⁻³)

e : épaisseur de l’horizon (cm)

Le stock de carbone pour une épaisseur de 0 à 30cm a été obtenu en faisant la somme des stocks calculés pour chaque épaisseur (0 à 10cm, 10 à 20 cm et 20 à 30 cm dans cet ordre) (Grinand et al., 2009). Le stock de carbone pour chaque exploitation est ensuite calculé en additionnant les stocks de toutes les parcelles.

- **Elaboration des cartes du carbone**

Par la suite, une cartographie du stock de carbone du sol pour chaque exploitation a été élaborée grâce au logiciel Arc GIS. Cette étape a pour but de procurer une base de données sur les stocks de carbone des exploitations agricoles de la zone d'étude afin d'avoir des ordres de grandeur sur la distribution du SOC dans la région étudiée. Ces cartes pourront servir d'outils d'aide à la décision et de support pour les futures études sur les inventaires des GES (Batjes, 2008).

III.5.3.2 Stock de carbone de la biomasse ligneuse

Des équations allométriques spécifiques à chaque espèce ligneuse ont été utilisées pour le calcul du stock de la biomasse ligneuse. Le stock de carbone a ensuite été converti en CO₂ équivalents en multipliant par 3.66.

A part le giroflier et le litchi, auxquels des équations allométriques ont été affectées, la quantification de la biomasse a été effectuée grâce à l'équation allométrique de Chave pour les forêts humides pour toutes les autres espèces (Cf. **Tableau 8**).

Tableau 8: Equations allométriques utilisées pour le calcul du stock de la biomasse ligneuse

Espèces ligneuses	Equations allométriques	Références
<i>Eugenia caryophyllus</i>	$Y = 2,923X - 55,42$ avec X= circonférence en cm à 1,30 m	Ramiandrisoa, 2011
<i>Litchi sinensis</i>	$Y = 3,394 X - 60,30$ avec X= circonférence en cm à 1,30 m	Ramiandrisoa, 2011
Autres espèces	$0,0509*d*D^2*H$ Avec d=densité du bois, D= diamètre à 1,30m, H=hauteur	Chave, 2005

III.5.4 Cadre opératoire

Le cadre méthodologique de cette étude est résumé dans le tableau suivant :

Tableau 9: Cadre opératoire de la recherche

Problématique	Hypothèses	Indicateurs	Méthodes
<p>Comment est-ce que les activités agricoles influent-t-elles sur l’empreinte carbone des exploitations agricoles à base de systèmes agroforestiers?</p>	<p><i>H1 : la diversification des activités et pratiques agricoles au sein d’une exploitation augmente son empreinte carbone</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre et nature des activités et pratiques agricoles de l’exploitation • Valeurs des flux au niveau de sources et puits de GES en équivalents CO₂ • Valeur de l’empreinte carbone pour chaque type d’exploitation 	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboration de la Carte des Flux des ressources • Inventaire des sources et des puits de GES • Calcul des émissions et des absorptions • Calcul de l’empreinte carbone
	<p><i>H2 : la plantation d’espèces ligneuses réduit l’empreinte carbone des exploitations agricoles</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Densité et nature des espèces ligneuses • Valeurs des absorptions au niveau des compartiments puits : espèces ligneuses 	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation de la contribution des espèces ligneuses à l’empreinte carbone



RESULTATS ET INTERPRETATION

S

IV. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1 Empreinte carbone par type d'exploitation agricole

Les observations sur terrain ont fait ressortir que d'une manière générale, les exploitations étudiées sont caractérisées par la riziculture (traditionnelle, améliorée ou intensive), la culture sur tanety, et l'élevage (bovins et volailles). Les ménages recourent à la fabrication d'huile essentielle de girofle pour avoir des revenus supplémentaires. Les habitations et l'unité de distillation (alambic) ont été également prises en compte en tant que compartiments.

Les systèmes agroforestiers à base de girofliers se situent sur les tanety avec des associations variables. La culture du riz pluvial sur tanety est également pratiquée dans cette zone. La production d'essence de girofle occupe une place importante en termes de revenus financiers, la production des clous de girofle est fortement dépendante des conditions climatiques. La production de clous et la production d'essence sont difficilement compatibles, les jeunes feuilles étant les plus prisées pour l'essence or les boutons floraux se trouvant sur les mêmes rameaux.

L'utilisation de fertilisants inorganiques et de pesticides est faible pour les exploitations de cette région (443ha de terres fertilisées aux engrais minéraux pour une superficie de terres cultivées de 112449ha pour toute la Région Analanjifofo) (ONE, 2009). Les cas considérés n'utilisent pas de fertilisants inorganiques.

Pour chaque exploitation agricole étudiée : une carte des flux des ressources décrivant le fonctionnement de l'exploitation et un résumé de l'empreinte carbone seront présentés.

IV.1.1 Type « Avec moyens - jeune exploitation / à dominance AFS »

IV.1.1.1 Description de l'exploitation

Cette exploitation est caractérisée par la grande superficie de terres cultivées en monoculture de girofliers (1,16Ha) et le nombre de pieds de girofliers atteignant presque 600 pieds, un chiffre élevé pour la région (Cf. **Figure 4**). La vente du litchi lui rapporte également beaucoup. Le chef d'exploitation fertilise ses rizières avec du compost issu de la stabulation de ses bœufs et des déchets ménagers. Il pratique également la pisciculture. Il peut produire une quantité importante de clous de girofle car il peut se permettre d'effectuer des rotations pour la taille des girofliers.

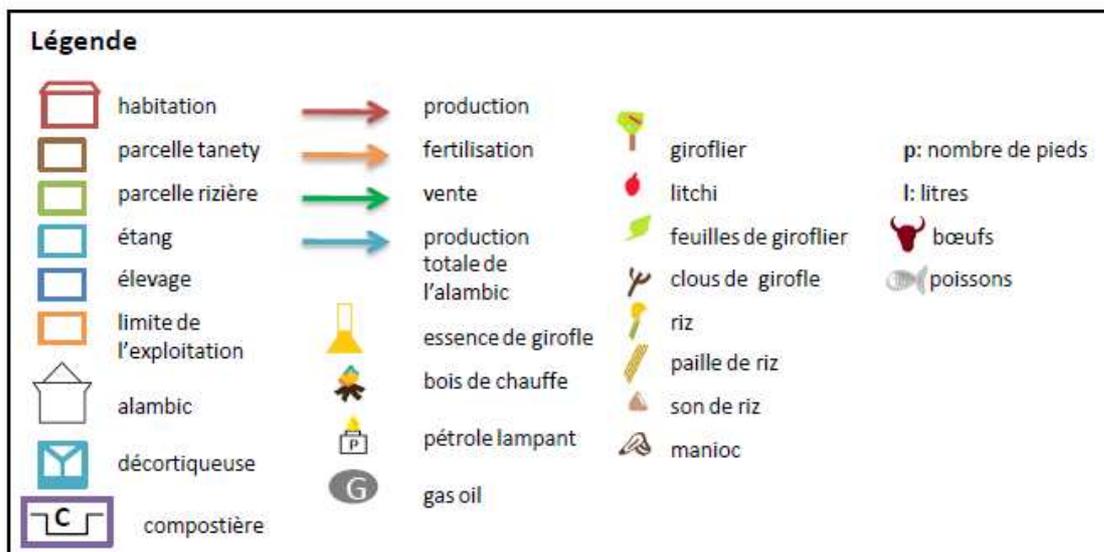
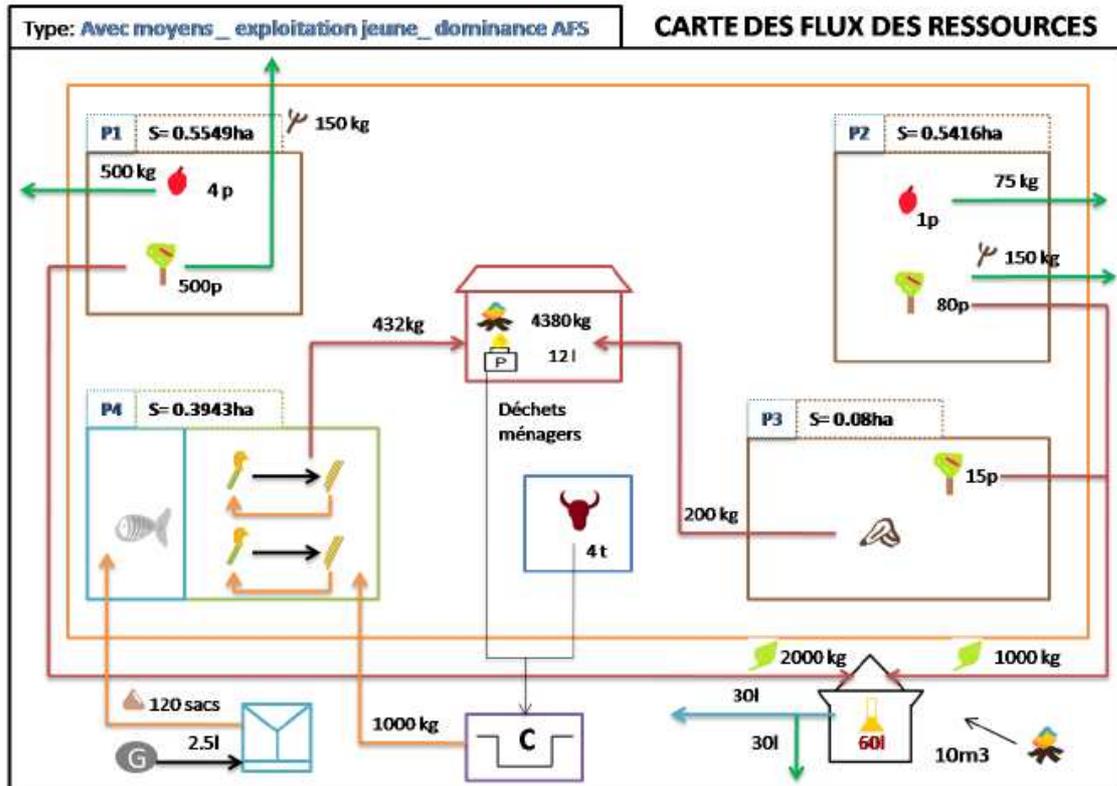


Figure 4: Carte des flux des ressources du type "avec moyens_ exploitation jeune_ à dominance d'agroforesterie simple

IV.1.1.2 Empreinte carbone

L'empreinte carbone de cette exploitation s'élève à 22,09 Mg de CO₂ Eq (Cf. **Figure 5**), elle est donc une exploitation « émettrice ». Le compartiment rizière est le plus émetteur pour cette exploitation avec 22,03 Mg de CO₂ Eq avec deux cycles annuels en riziculture traditionnelle (Cf. **Annexe 6**). L'accroissement annuel des espèces ligneuses équivaut à peu près à la somme des émissions de GES issues des autres compartiments, mis à part les rizières. L'exploitant fertilise ses rizières par du compost.

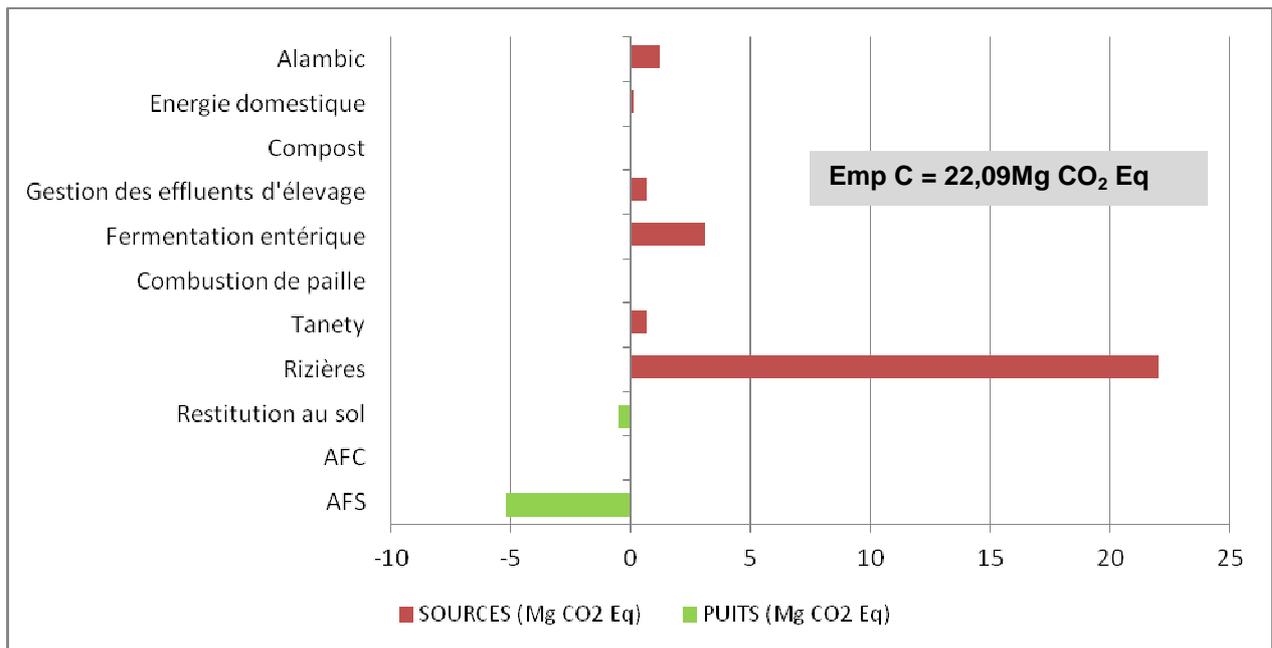


Figure 5: Empreinte carbone de l'exploitation du type "avec moyens_ exploitation jeune_ à dominance d'agroforesterie simple

IV.1.2 Type « Avec moyens_ jeune exploitation_ à dominance AFC »

IV.1.2.1 Description de l'exploitation

Cette exploitation se démarque par l'adoption de diverses pratiques agroécologiques comme la pratique du SRI et la fabrication du compost. Le chef d'exploitation étant membre d'une coopérative œuvrant pour la promotion des cultures maraichères, un jardin potager est également cultivé. L'emplacement des rizières bénéficiant d'un bon réseau hydro-agricole, la culture du riz en SRI s'effectue sur deux saisons en une année. Les rizières profitent d'un apport de compost et le jardin potager est fertilisé à la fois par du compost et des résidus de distillation de feuilles de girofliers. La production annuelle d'huile essentielle est moyenne (40 litres) (Cf. **Figure 6**).

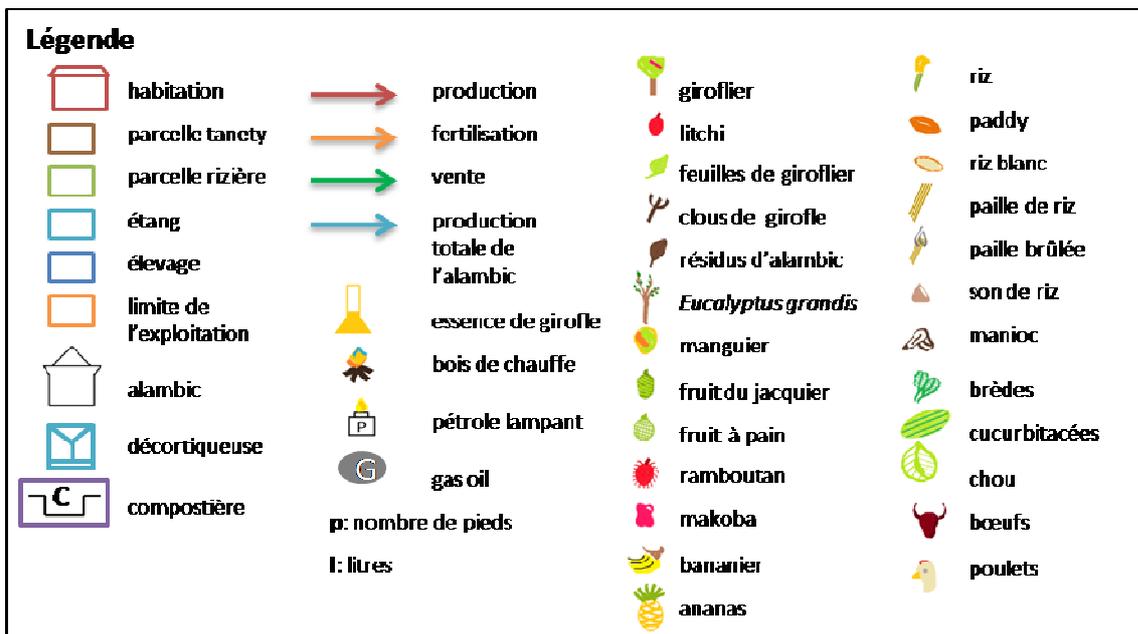
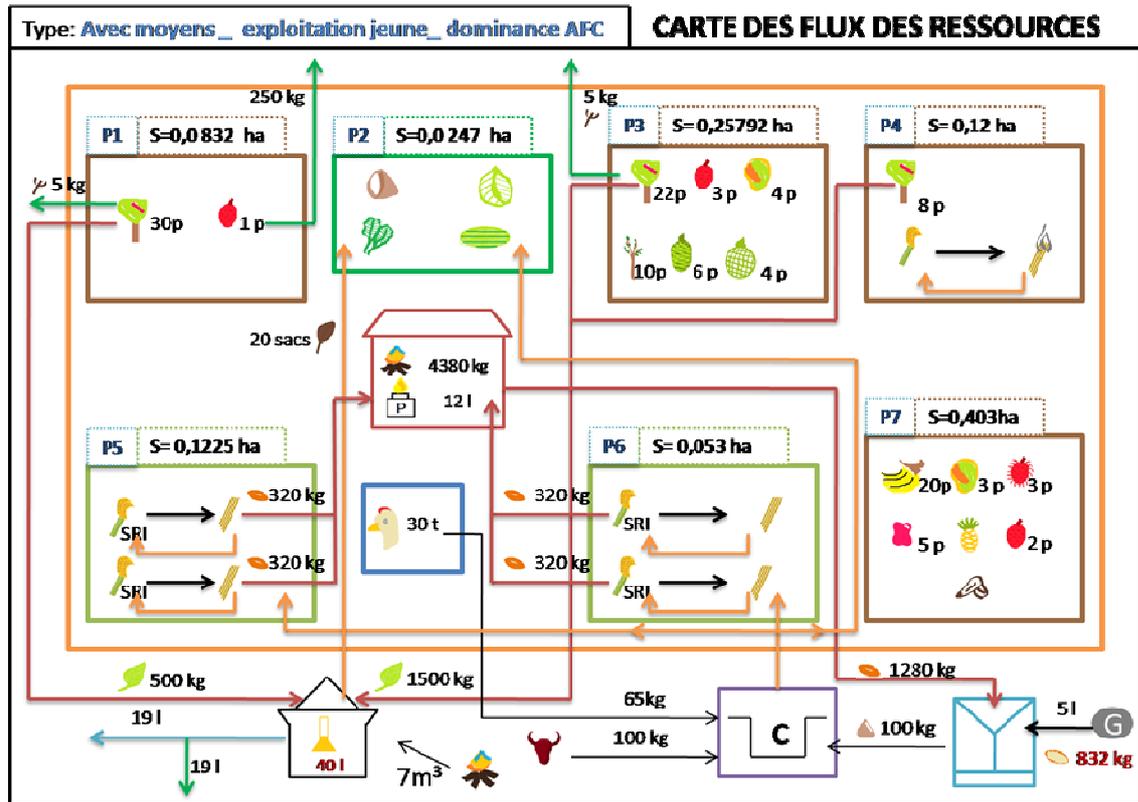


Figure 6: Carte des flux des ressources du type "avec moyens_ exploitation jeune_ à dominance d'agroforesterie complexe

IV.1.2.2 Empreinte carbone

L'empreinte carbone de l'exploitation est négative (-0,65Mg de CO₂ Eq), cette exploitation est à tendance puits (Cf. Figure 7). Les compartiments les plus émetteurs sont les rizières, l'alambic et les tanety avec respectivement 1,15 Mg de CO₂ Eq, 0,89 Mg de CO₂ Eq et 0,74 Mg de CO₂ Eq. La

restitution au sol, les accroissements des ligneux en agroforesterie simple mais surtout en agroforesterie complexe (2,5 Mg de CO₂ Eq) annulent les émissions et conduisent à une ferme « puits » (Cf. **Annexe 7**).

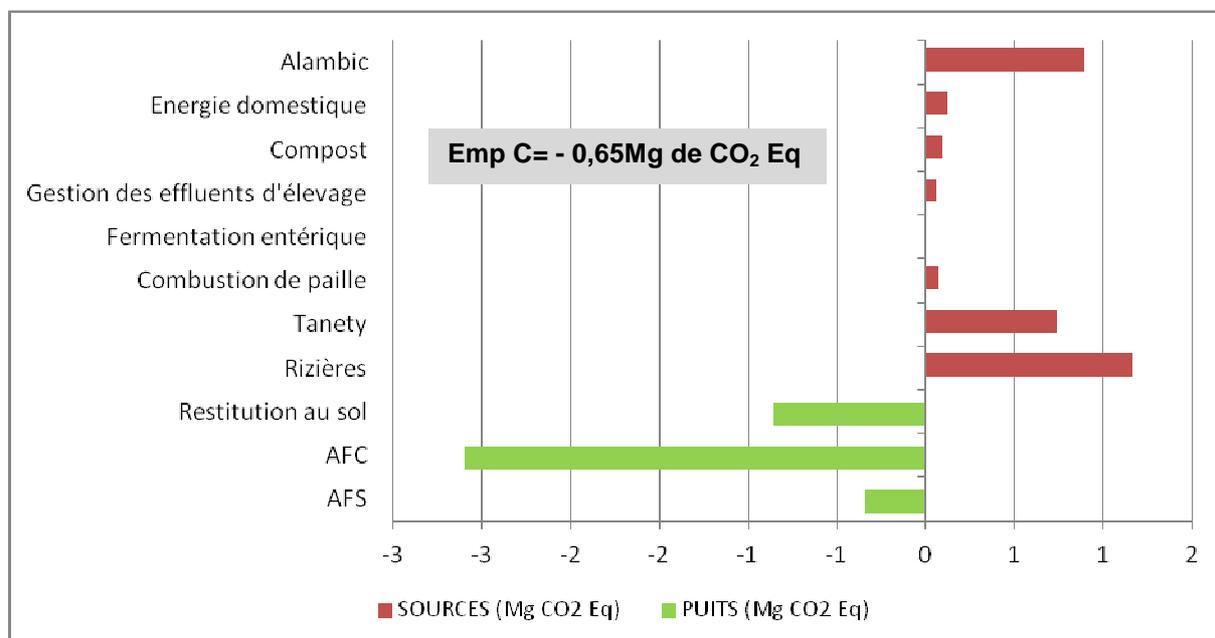
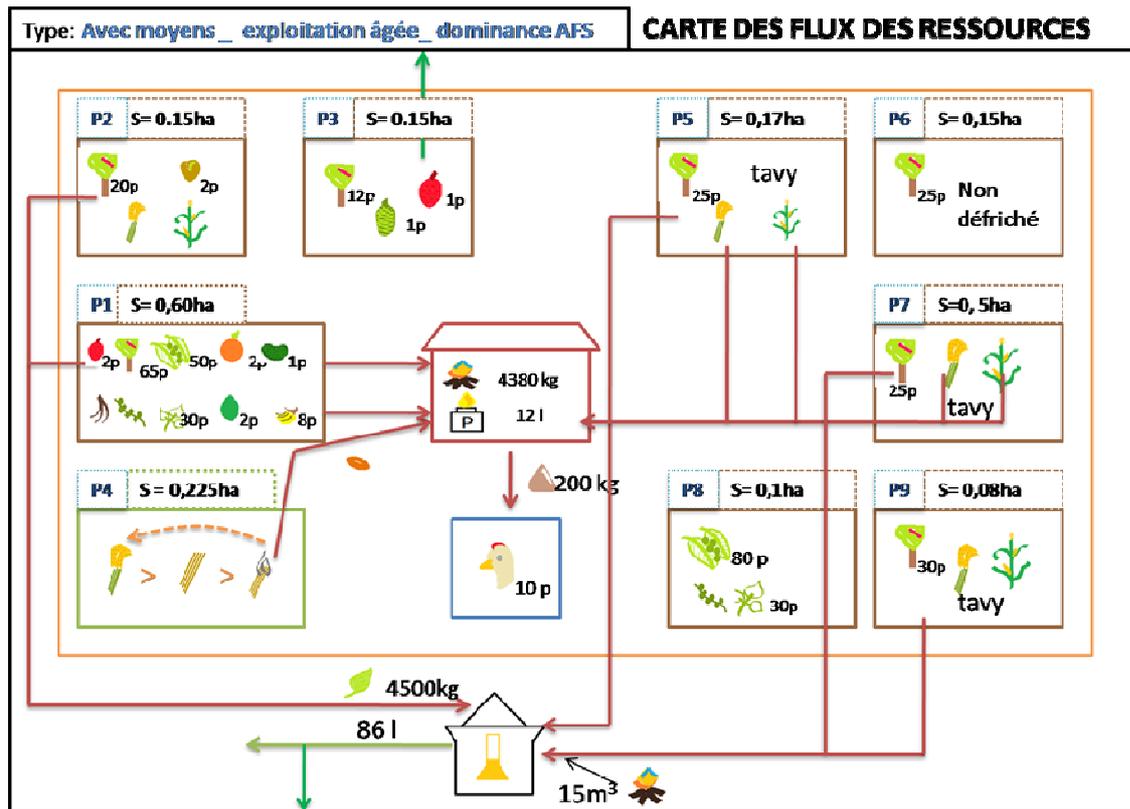


Figure 7: Empreinte carbone de l'exploitation du type "avec moyens_ exploitation jeune_ à dominance d'agroforesterie complexe

IV.1.3 Type « Avec moyens_ exploitation âgée_ à dominance AFS »

IV.1.3.1 Description de l'exploitation

La riziculture pluviale sur tanety est dominante pour cette exploitation avec une superficie allouée avoisinant 1 ha. Elle est associée avec les girofliers et le maïs. Sur ces parcelles, les résidus de cultures sont mis en tas et brûlés sur place. L'exploitant produit du café (130 pieds) qu'il commercialise si la saison est bonne. Il s'est également initié à la culture du poivrier avec Glyricidia comme tuteur (60 pieds). Les girofliers sont exploités intensivement pour la production d'essence de girofle qui atteint les 86 litres annuellement (Cf. **Figure 8**).



Légende



Figure 8: Carte des flux des ressources du type « avec moyens_ exploitation âgée_ à dominance d'agroforesterie simple »

IV.1.3.2 Empreinte carbone

Cette exploitation a une empreinte carbone de 1,42 Mg de CO₂ Eq (Cf. **Figure 9**). Comme les deux exploitations précédentes, la riziculture émet le plus avec 6,28 Mg de CO₂ Eq. Les tanety, bien que superficiellement travaillés, émettent 2,14 Mg par le brûlis des résidus de culture. La quantité considérable d'essence produite annuellement place l'alambic à la troisième place en termes

d'émission, dû à la consommation de 15 m³ de bois de chauffe. Le bois du giroflier est aussi utilisé pour alimenter l'alambic. Le carbone restitué au sol et la biomasse ligneuse produite par année totalisent 8,92 Mg de CO₂ Eq (Cf. **Annexe 8**).

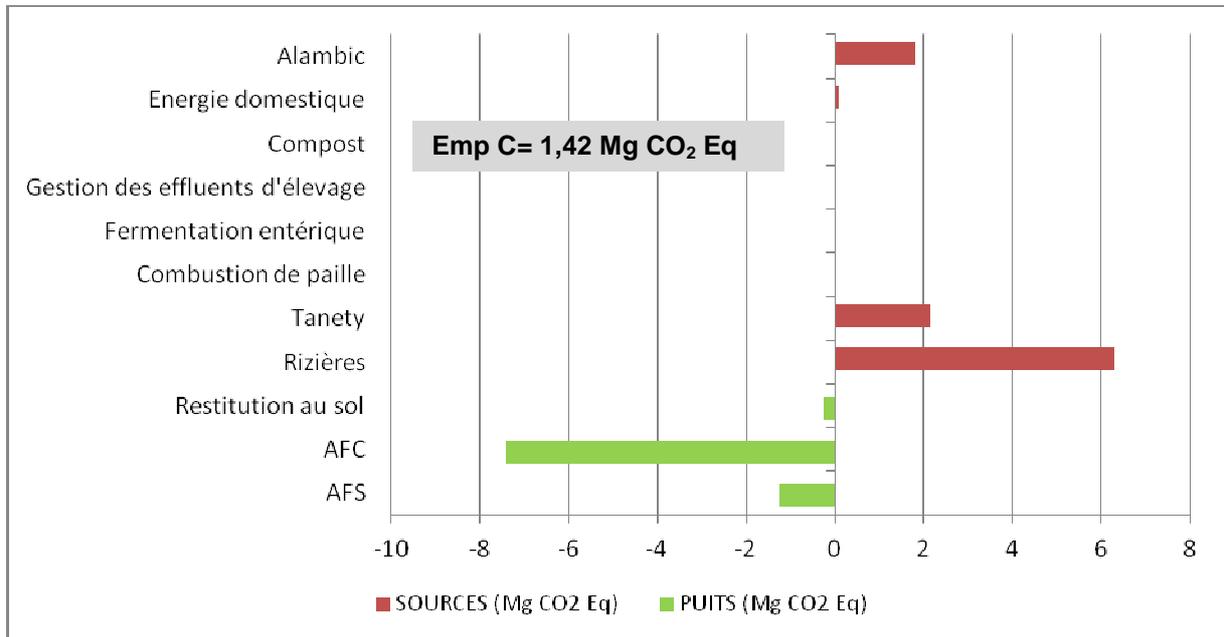


Figure 9: Empreinte carbone de l'exploitation du type « avec moyens_ exploitation âgée_ à dominance d'agroforesterie simple »

IV.1.4 Type « Avec moyens_ exploitation âgée_ à dominance AFC »

IV.1.4.1 Description de l'exploitation

Cette exploitation arrive à produire dans une même année de l'essence et des clous, car l'exploitant alterne la taille des arbres. Il produit aussi du café mais en quantité encore insuffisante pour être commercialisée. Ses 4 bœufs sont utilisés pour les travaux rizicoles et la fertilisation des rizières (Cf. **Figure 10**).

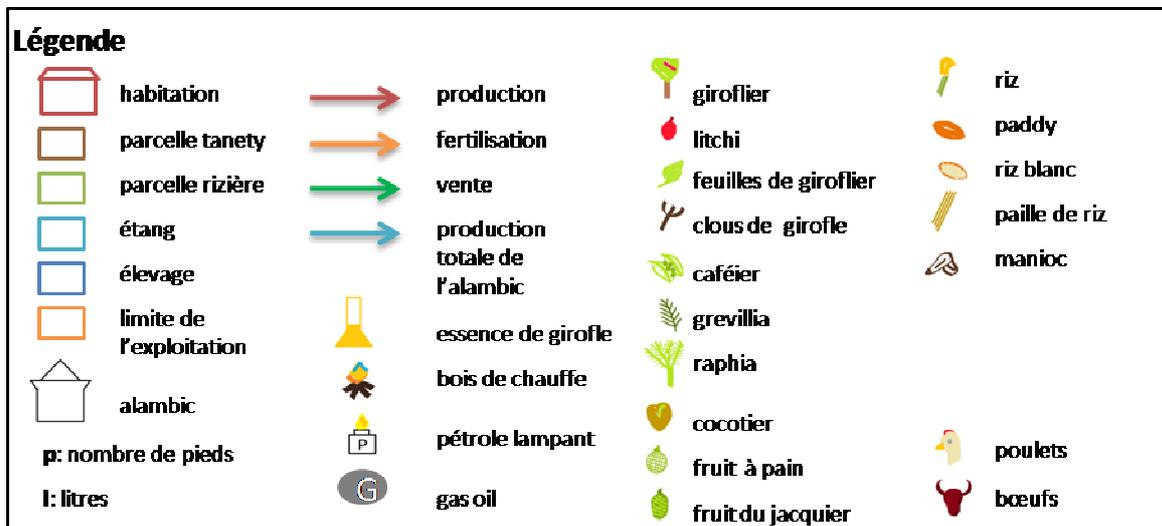
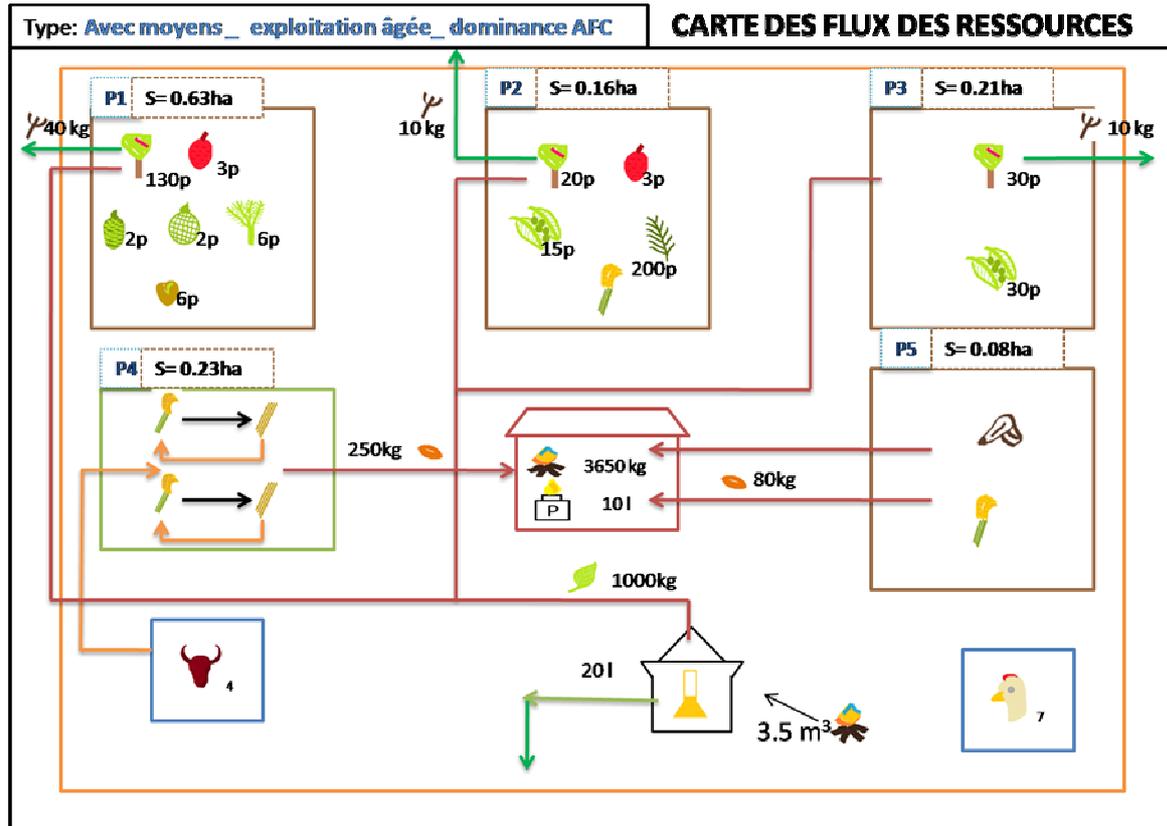


Figure 10: Carte des flux des ressources du type « avec moyens_ exploitation âgée_ à dominance d'agroforesterie complexe »

IV.1.4.2 Empreinte carbone

L’empreinte carbone de cette exploitation se chiffre à 3,77 Mg de CO₂ Eq (Cf. **Figure 11**). Les rizières sont les plus émettrices avec 6,76 Mg de CO₂ Eq. La fermentation entérique issue des 4 zébus s’élève à 3,1 Mg de CO₂ Eq. Les systèmes agroforestiers complexes arrivent à absorber annuellement 7,28 Mg de CO₂ Eq (Cf. **Annexe 9**).

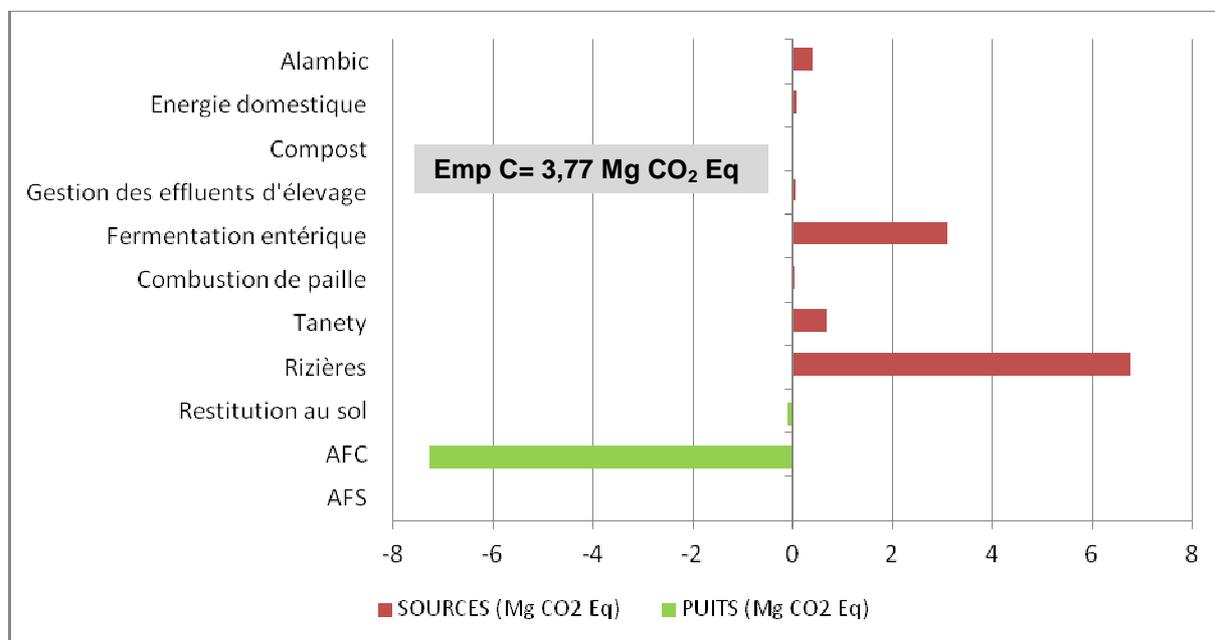


Figure 11: Empreinte carbone de l'exploitation du type « avec moyens_ exploitation âgée_ à dominance d'agroforesterie complexe »

IV.1.5 Type « Sans moyens_ jeune exploitation_ à dominance AFS »

IV.1.5.1 Description de l'exploitation

Cette exploitation est encore en phase de développement. Les deux rizières sont en location, les tanety sont encore en friche avec une faible proportion cultivée. Il y a peu de girofliers exploitables (18 pieds) mais l’exploitant est en train de planter des jeunes plants. A part l’élevage de volailles, l’exploitant offre ses services pour le gardiennage de bœufs d’une autre exploitation (Cf. **Figure 12**).

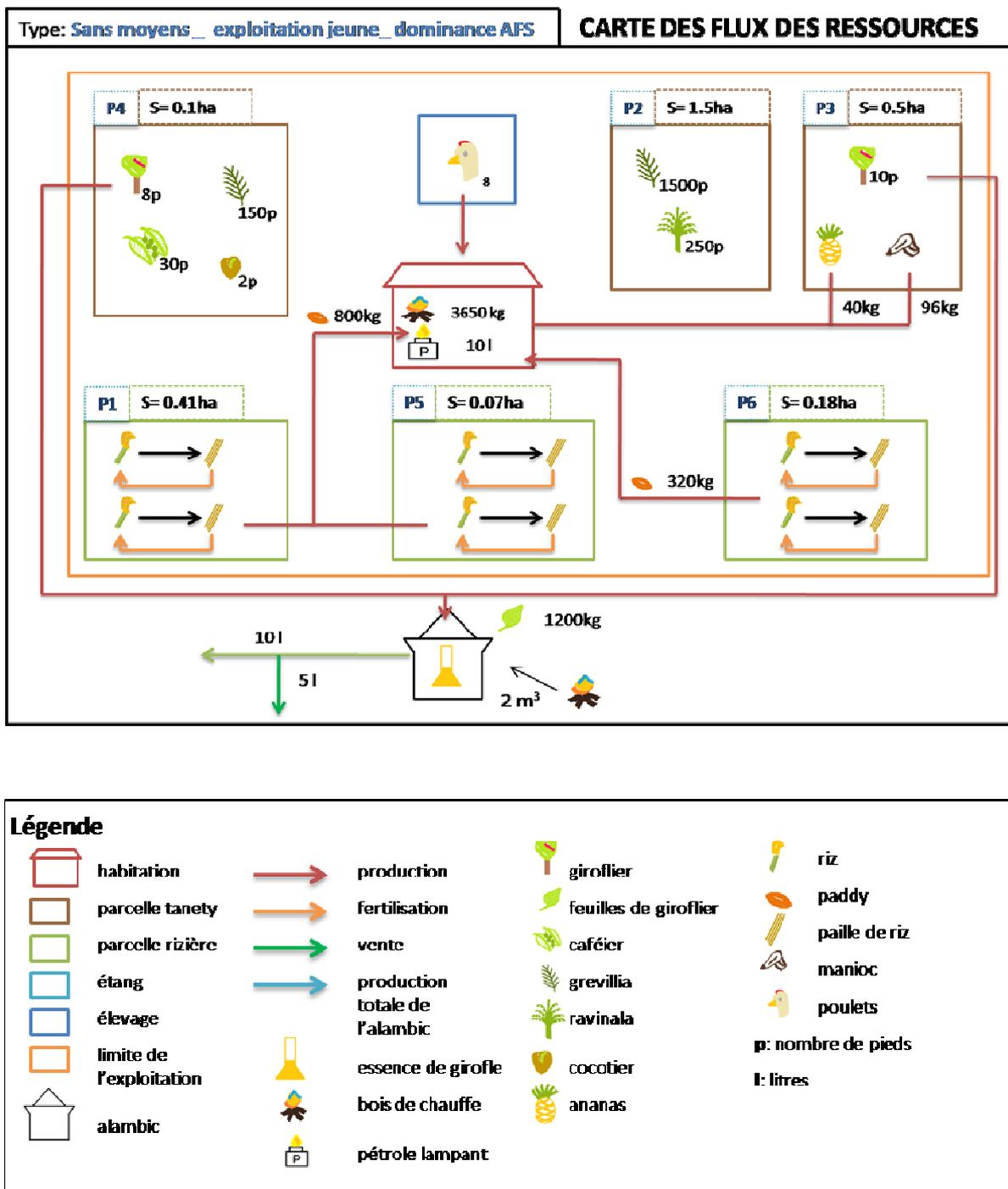


Figure 12: Carte des flux des ressources du type « sans moyens_ exploitation jeune_ à dominance d'agroforesterie simple »

IV.1.5.2 Empreinte carbone

Il s'agit d'une exploitation puits avec une empreinte carbone de -1,76 Mg de CO₂ Eq par an (Cf. **Figure 13**) Les activités limitées au sein de l'exploitation ne font ressortir que deux grandes tendances : des émissions de 37,43 Mg de CO₂ Eq provenant principalement de la riziculture et des absorptions de 40,47 Mg de CO₂ Eq par les ligneux en agroforesterie simple (Cf. **Annexe 10**).

L'espèce dominante est *Grevillia banksii*, à très forte densité (2000 pieds/ha) et à propagation et croissance rapides.

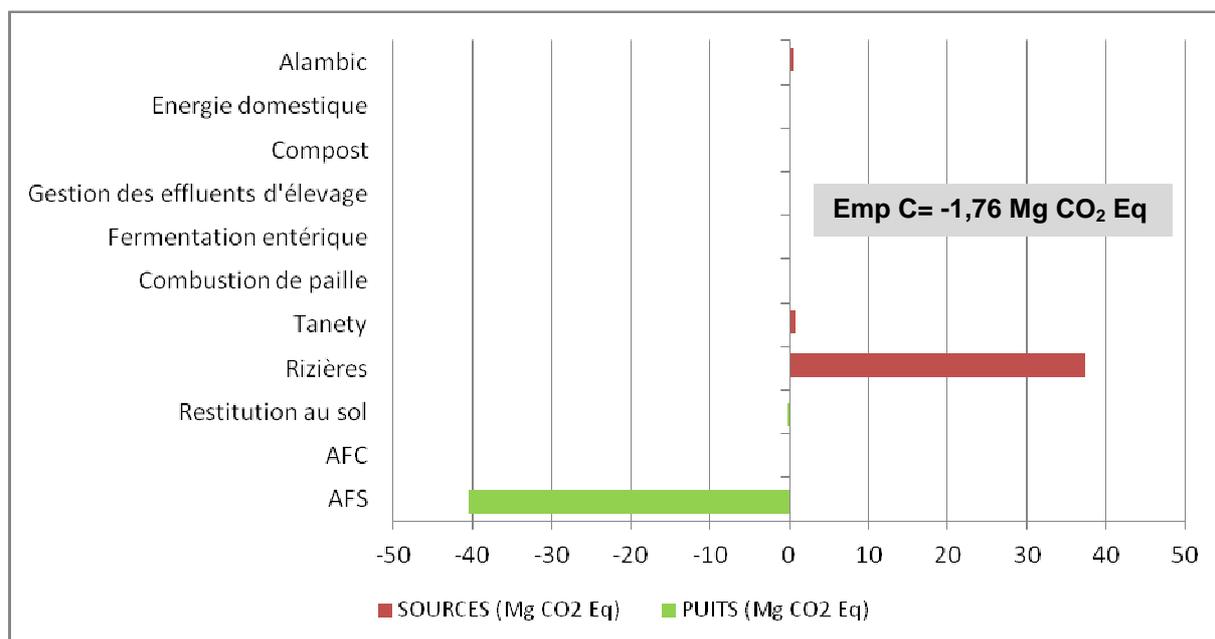


Figure 13: Empreinte carbone de l'exploitation du type "sans moyens_ exploitation jeune_ à dominance d'agroforesterie simple

IV.1.6 Type « Sans moyens_ jeune exploitation_ à dominance AFC »

IV.1.6.1 Description de l'exploitation

Cette exploitation ne dispose pas d'assez de main d'œuvre et a adopté le système de métayage pour la riziculture. Sur 0,22 ha de rizières, l'exploitant a opté pour deux cycles durant l'année en riziculture traditionnelle contre 0,04 ha pour un seul cycle. En fonction de ses disponibilités, il fertilise ses rizières avec les résidus d'alambic. La production rizicole est autoconsommée mais les produits d'élevage et la canne à sucre est vendue. La production totale d'essence de girofle est faible (11 litres) (Cf. **Figure 14**).

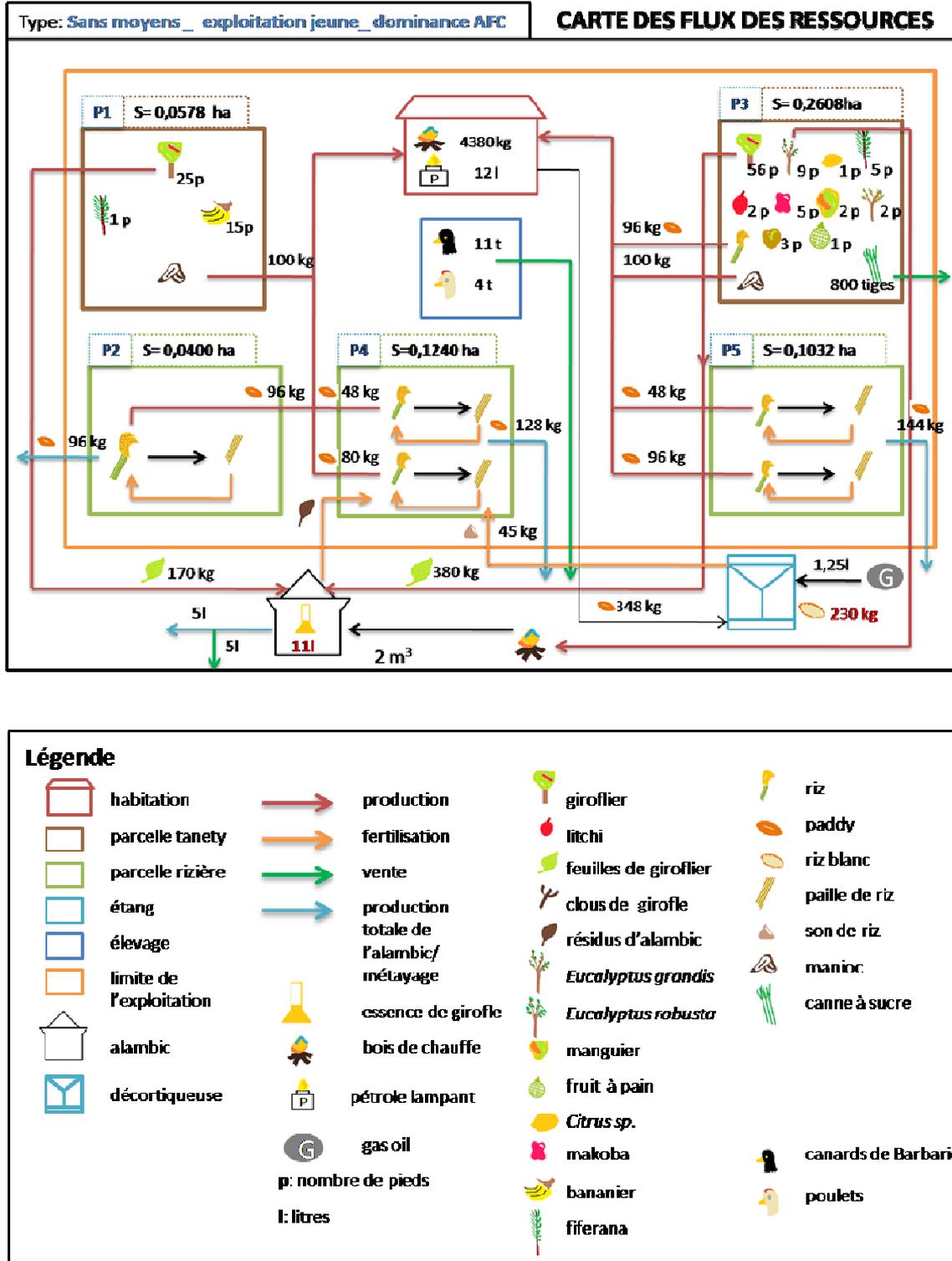


Figure 14: Carte des flux des ressources du type « sans moyens_ exploitation jeune_ à dominance d'agroforesterie complexe »

IV.1.6.2 Empreinte carbone

L’empreinte carbone est de 12,68 Mg de CO₂ Eq (Cf. **Figure 15**). Les autres puits et sources sont quasi négligeables par rapport aux émissions issues de la riziculture traditionnelle qui engendre presque 15 Mg de CO₂ Eq annuellement. La restitution au sol et l’agroforesterie n’absorbent que 1 Mg de CO₂ Eq. Cette exploitation est fortement émettrice (Cf. **Annexe 11**).

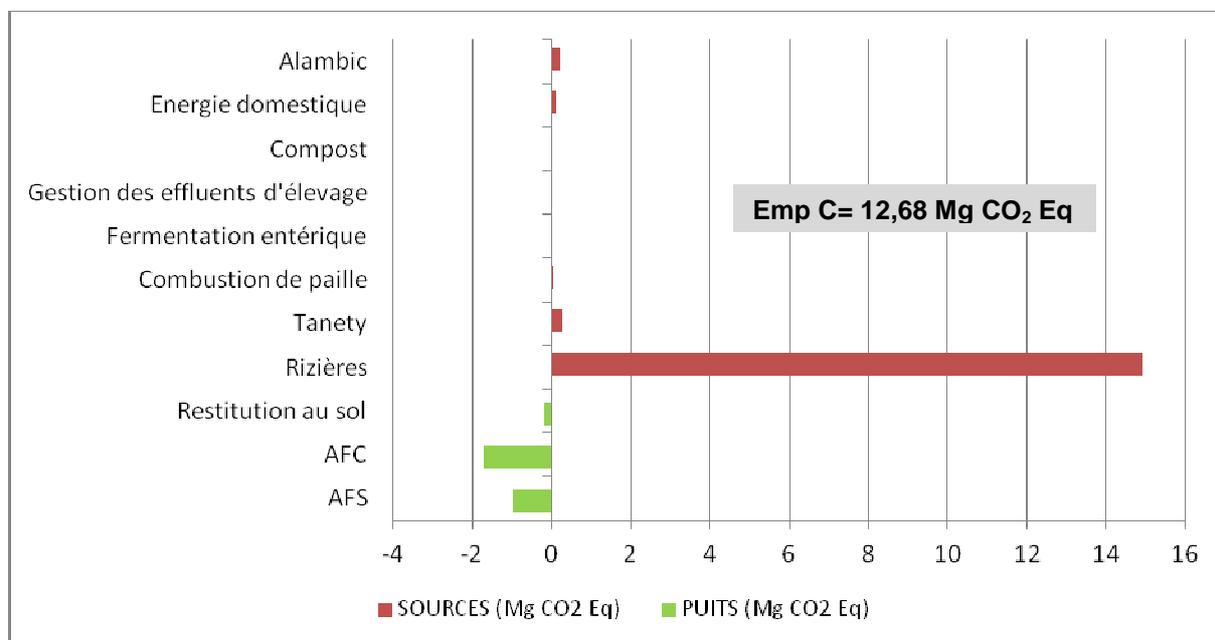


Figure 15: Empreinte carbone de l’exploitation du type "sans moyens_ exploitation jeune_ à dominance d'agroforesterie complexe »

IV.1.7 Type « Sans moyens_ exploitation âgée_ à dominance AFS »

IV.1.7.1 Description de l’exploitation

Cette exploitation ne possède pas de rizières. Le riz est essentiellement pluvial. Les bœufs sont loués pour des travaux rizicoles, le fumier n’étant pas recueilli pour la fertilisation. L’exploitant cultive de la vanille avec comme tuteurs les espèces *Glyricidia sp.* et *Pachyra aquatica* (Cf. **Figure 16**).

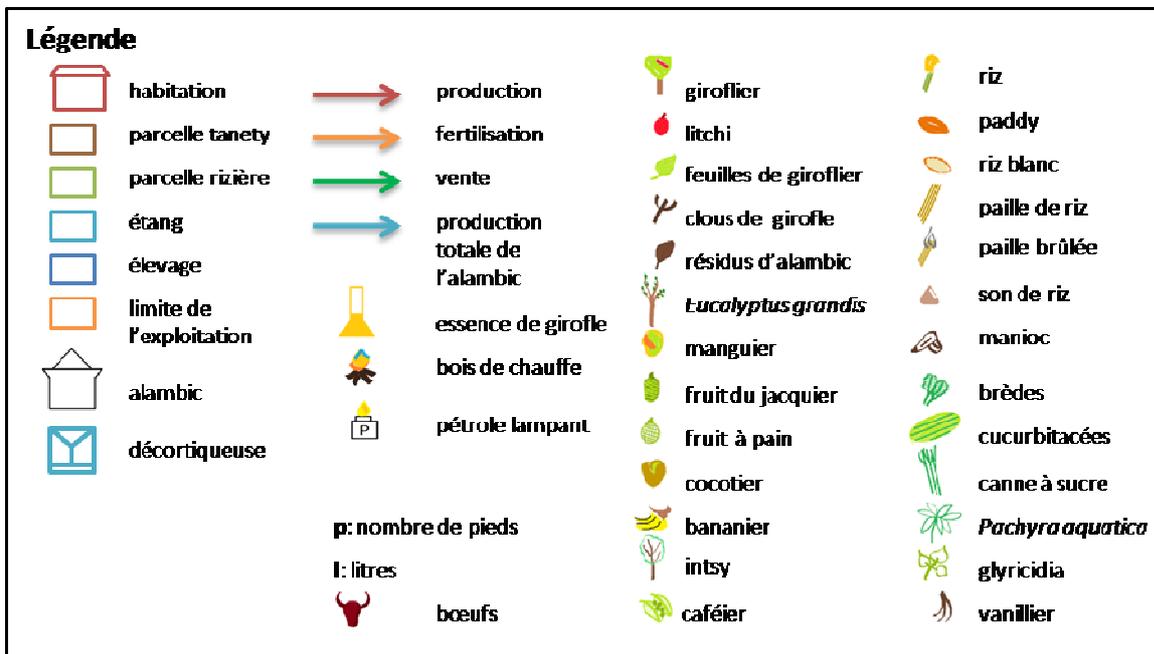
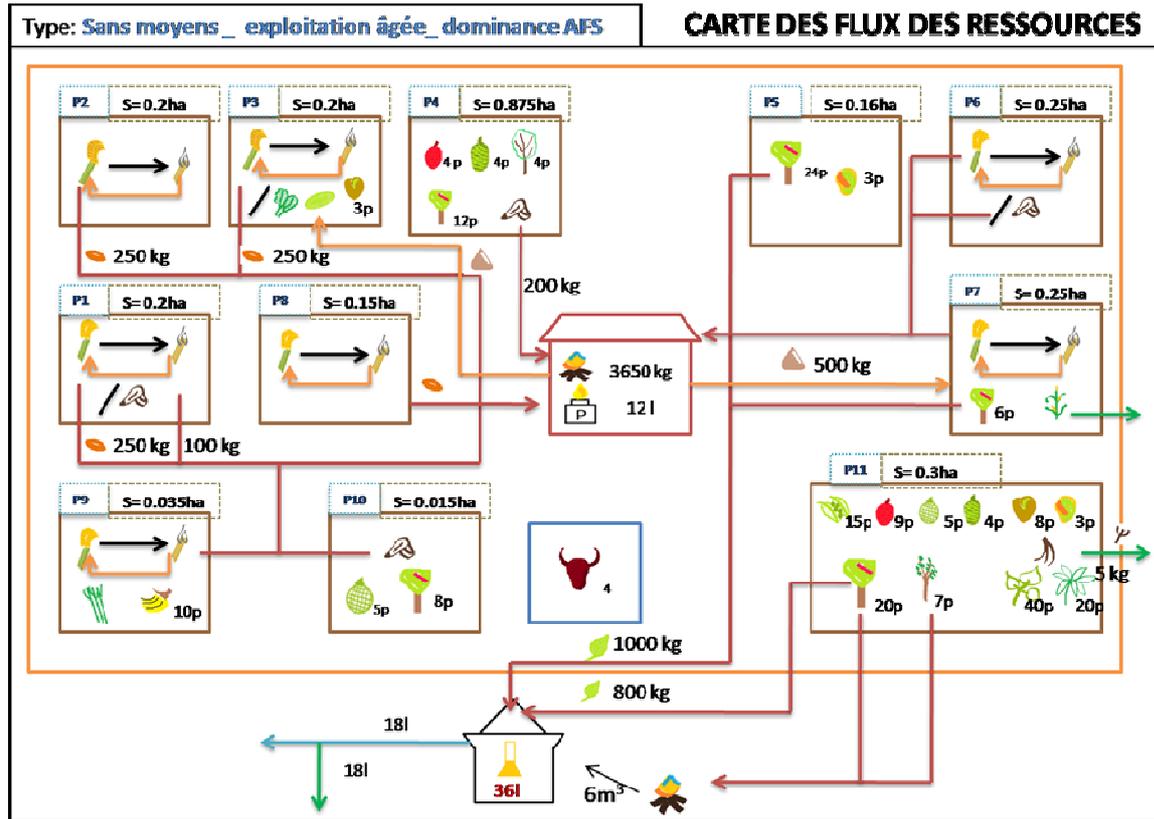


Figure 16: Carte des flux des ressources du type « sans moyens_ exploitation âgée_ à dominance d'agroforesterie simple »

IV.1.7.2 Empreinte carbone

Cette ferme totalise une empreinte carbone de 2,84 Mg de CO₂ Eq (Cf. **Figure 17**). Etant donné l'absence de rizières, c'est la fermentation entérique qui contribue le plus aux émissions avec 3,1 Mg de CO₂ Eq. Les émissions issues des tanety et de la combustion de la paille sont de l'ordre de 1,38 et 0,72 Mg de CO₂ Eq. L'agroforesterie complexe, étendue sur une surface inférieure par rapport à l'agroforesterie simple mais avec un plus grand nombre de pieds plantés absorbe une quantité de 2,31Mg de CO₂ Eq (Cf. **Annexe 12**).

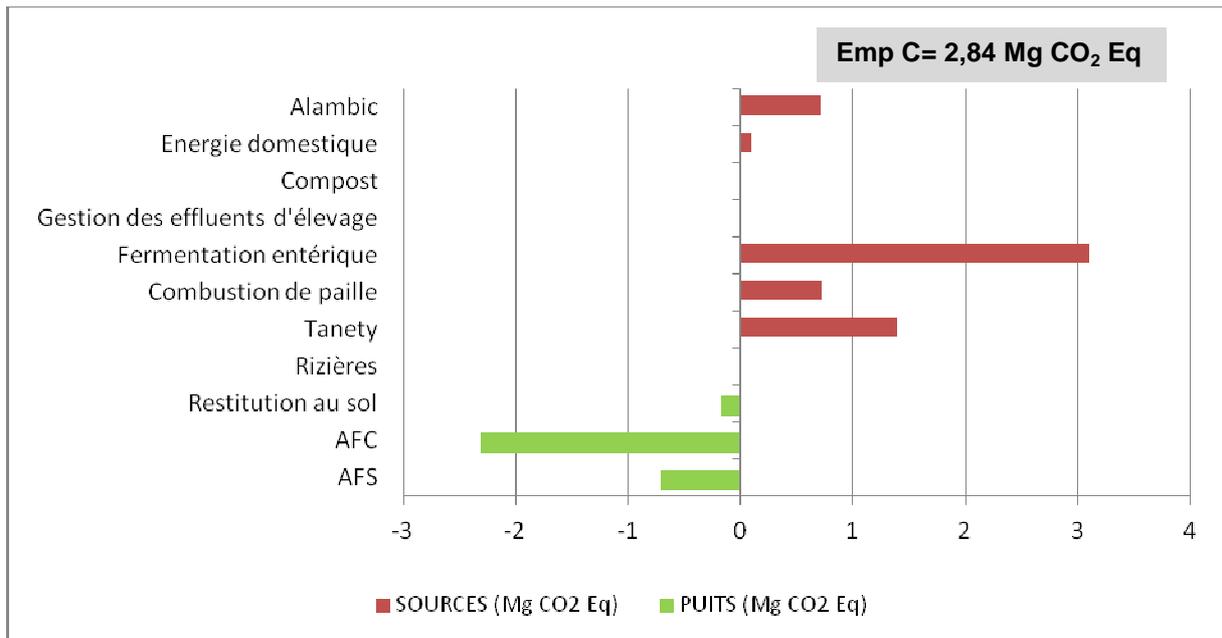


Figure 17: Empreinte carbone de l'exploitation du type « sans moyens_ exploitation âgée_ à dominance d'agroforesterie simple »

IV.1.8 Type « Sans moyens_ exploitation âgée_ à dominance AFC »

IV.1.8.1 Description de l'exploitation

La main-d'œuvre de cette exploitation est limitée. Les pieds de litchi et de girofliers sont âgés. L'exploitant réalise deux cycles de riziculture en une année (Cf. **Figure 18**).

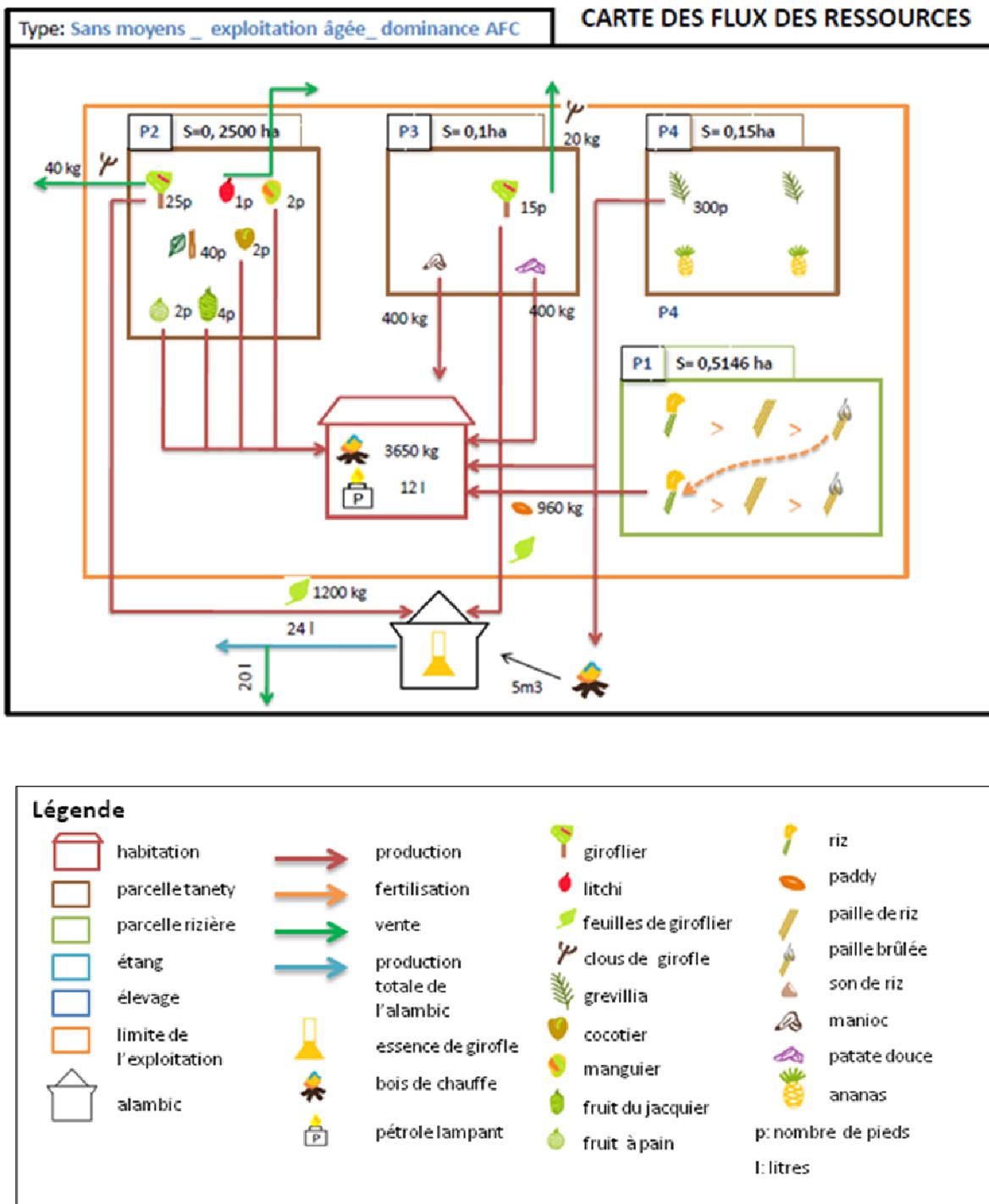


Figure 18: Carte des flux des ressources du type « sans moyens_ exploitation âgée_ à dominance d'agroforesterie complexe »

IV.1.8.2 Empreinte carbone

L'empreinte carbone de cette exploitation s'élève à 22,24 Mg de CO₂ Eq (Cf. **Figure 19**). Les rizières sont les principales sources d'émissions avec 28 Mg de CO₂ Eq. Les cultures ligneuses arrivent à absorber 7,79 Mg de CO₂ Eq annuellement (Cf. **Annexe 13**).

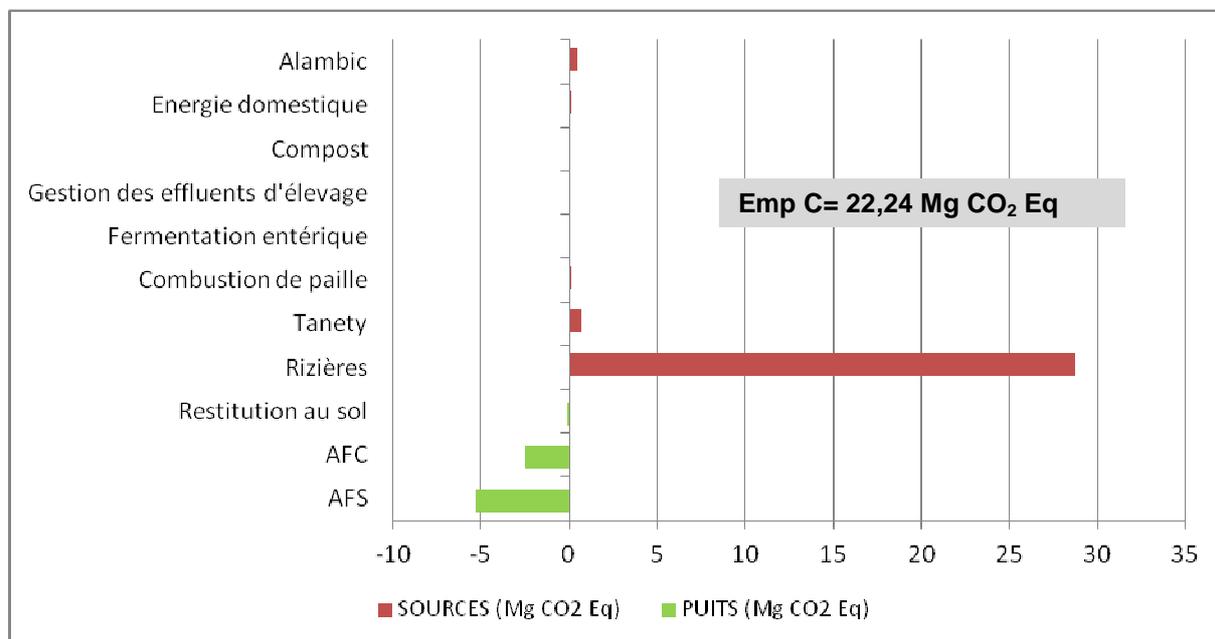


Figure 19: Empreinte carbone de l'exploitation du type « sans moyens_ exploitation âgée_ à dominance d'agroforesterie complexe »

IV.2 Stocks de carbone des exploitations agricoles

IV.2.1 Stock de carbone du sol

IV.2.1.1 Stock par exploitation

En moyenne, les stocks de carbone du sol par exploitation pour l'ensemble des parcelles s'élèvent à 163,20 Mg pour des superficies totales variant de 0,58ha à 2,76ha (Cf. **Figure 20**). Les cartes du carbone du sol pour les exploitations sont présentées en **Annexe 14**.

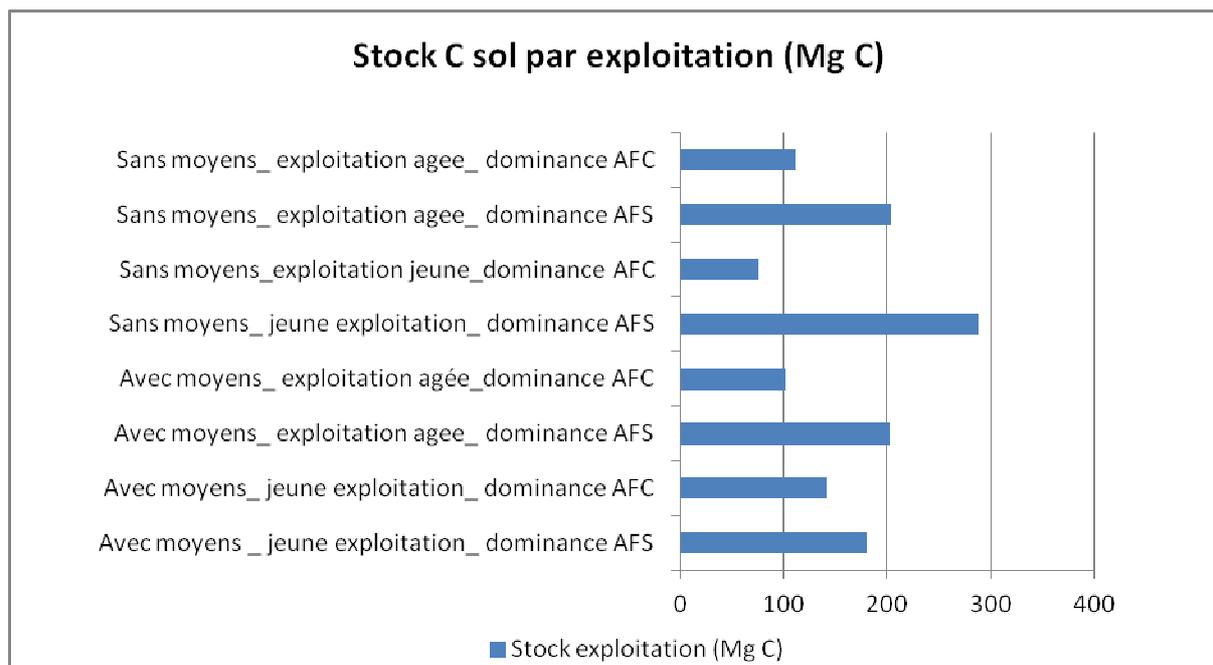


Figure 20: Stocks de carbone des sols des exploitations

IV.2.1.2 Comparaison des stocks en fonction du mode d'occupation

Les stocks de carbone du sol ont été distribués en fonction de l'existence ou non d'agroforesterie. Pour les exploitations avec moyens, ce sont les stocks dans les parcelles agroforestières qui dominent. Alors que pour les exploitations sans moyens, les parcelles qui ne sont pas utilisées pour l'agroforesterie ont des stocks supérieurs (Cf. **Figure 21**).

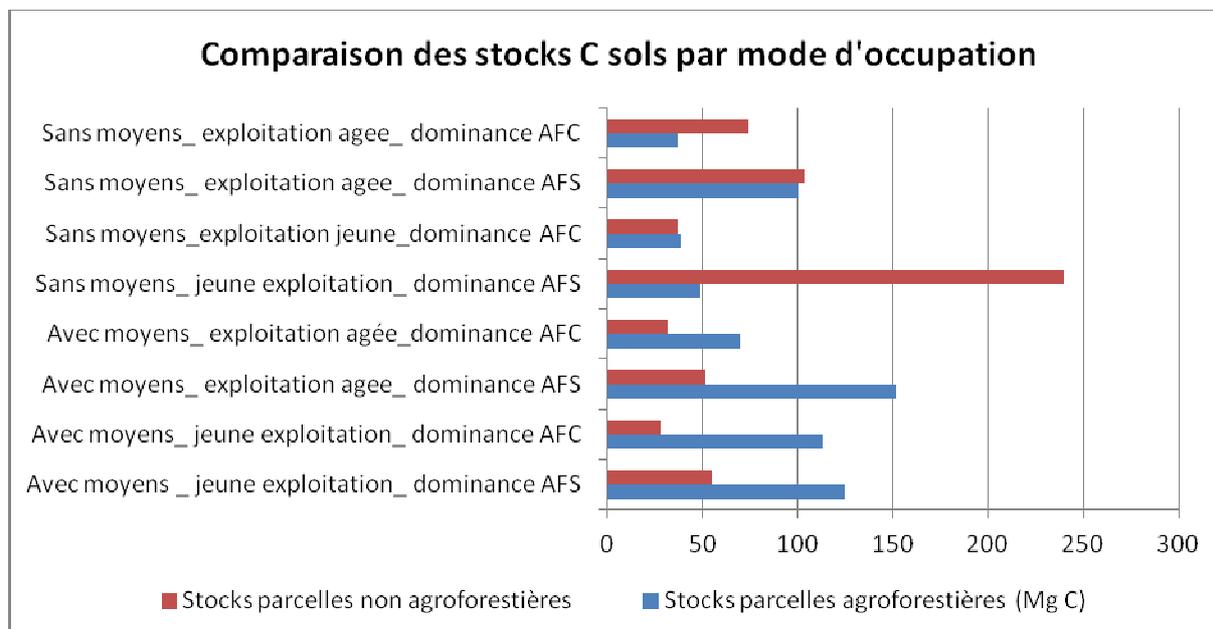


Figure 21: Comparaison des stocks de carbone des sols par mode d'occupation

IV.2.2 Stock de carbone de la biomasse ligneuse

Le carbone peut être stocké dans la biomasse des terres cultivées à végétation ligneuse vivace, y compris, mais sans limitation, des monocultures de type plantations de caféiers, palmiers à huile, cocotiers, et des polycultures telles que les systèmes agroforestiers. La moyenne de stock de carbone de la biomasse ligneuse dans cette région est de 23,41 Mg C (Cf. **Figure 22**) avec une valeur rapportée à l'unité de surface égale à 16,05 Mg C /ha.

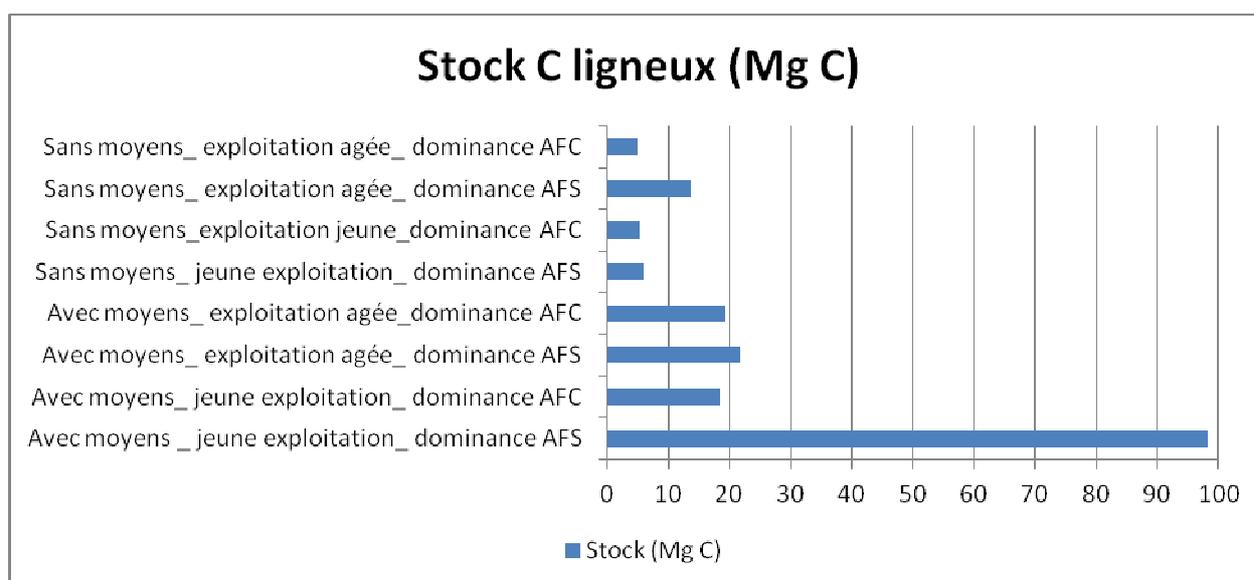


Figure 22: Stock de carbone de la biomasse ligneuse pour les exploitations étudiées



DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS



V. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

V.1 Discussions

V.1.1 *Sur la méthodologie*

V.1.1.1 *Travaux de terrain*

Par rapport au temps imparti et aux conditions d'accessibilité, le choix des exploitations considérées a été effectué sur deux communes : celle d'Ampasimbe Manantsatrana et Ambodimanga II sur les quatre communes prises en compte par la typologie du CTHT. Les exploitations sélectionnées sont cependant représentatives des types définis par l'institution. Par rapport au contexte foncier actuel à Madagascar, les exploitants affichent encore une certaine réticence à montrer l'intégralité de leurs terres qui ne sont pas enregistrées à leur nom. Dans le cas de la Région Analanjirofo, 71 % des exploitants ne possèdent pas de propriétés titrées (ONE, 2009). Pour le cas de quelques exploitations, la superficie totale des parcelles de l'exploitation est alors sous-estimée.

La sélection des exploitations étudiées montre également une certaine limite dans la mesure où il n'y a pas eu d'exploitations utilisant des engrais chimiques ou des pesticides étudiées. L'application de ces intrants chimiques constitue pourtant une des plus grandes sources émettrices des GES (Hillier *et al.*, 2009 ; Cheng *et al.*, 2011 ; ADEME, 2007).

Les résultats obtenus ont montré que la typologie n'est pas déterminante pour le calcul de l'empreinte carbone, ce qui nécessite l'élaboration d'une nouvelle typologie orientée en fonction des résultats.

V.1.1.2 *Calcul de l'empreinte carbone*

Cette étude a essayé d'apporter des valeurs les plus proches possibles de la réalité au vu de la disponibilité des données collectées. La littérature souffre en effet d'un manque de références par rapport aux émissions de GES à Madagascar. Des incertitudes peuvent se produire quant aux facteurs d'émissions utilisés vu l'absence d'une littérature spécialisée au niveau national.

Les résultats des travaux de Ramiandrisoa (2011) utilisés pour cette étude donnent une estimation proche pour le calcul de l'accroissement annuel des ligneux (giroflers, litchi et glyricidia). Les calculs se sont basés sur un taux d'accroissement moyen des arbres âgés de 6 à 50 ans. Le taux d'accroissement annuel utilisé pour les ligneux est celui pour les jeunes arbres alors que les arbres des exploitations ont un âge avancé.

- Comparaison avec d'autres études

La méthode LCA Life Cycle Analysis ou Analyse de Cycle de Vie est la plus utilisée pour le calcul de l'empreinte carbone des produits, des cultures et des filières (Brentrup, 2004 ; Cherubini, 2009 ; Brandao, 2010). Cette présente étude n'a pas bénéficié de cette approche. Il s'agit d'une étude encore exploratoire sur la caractérisation des émissions de GES à l'échelle d'une exploitation et figure parmi les premières effectuées dans ce domaine à Madagascar. C'est une étude ponctuelle et non orientée sur la durée de vie du produit comme pour la méthode LCA qui nécessite des investigations sur une plus longue durée.

V.1.1.3 Détermination des stocks de carbone

Les contraintes temps et moyens n'ont pas permis d'évaluer le stock de carbone de la litière, ce qui constitue une limite étant donné l'importance de ce pool (IPCC, 2006).

Face à l'insuffisance des études sur les équations allométriques spécifiques à Madagascar, les équations utilisées pour le calcul du stock de la biomasse ligneuse sont des équations standards, excepté pour les espèces majoritaires : le giroflier et le litchi. Il peut donc y avoir une surestimation ou une sous-évaluation du stock en fonction des conditions dans lesquelles les équations ont été établies.

V.1.2 Sur les résultats

V.1.2.1 Empreinte carbone des exploitations agricoles

- Résultats de l'étude

La moyenne des empreintes carbone des exploitations dans le District de Fénérive Est s'élève à 7,69 Mg CO₂ Eq/ha. L'empreinte carbone la plus faible est celle de l'exploitation « Sans moyens – exploitation jeune – à dominance d'agroforesterie simple » avec -0,63 Mg CO₂ Eq/ha. Ce sont les exploitations sans moyens à dominance d'agroforesterie complexe qui ont une empreinte carbone plus élevée avec 21,64 Mg CO₂ Eq/ha pour les exploitations jeunes et 21,92 Mg CO₂ Eq/ha pour les exploitations âgées (Cf. **Figure 23**)

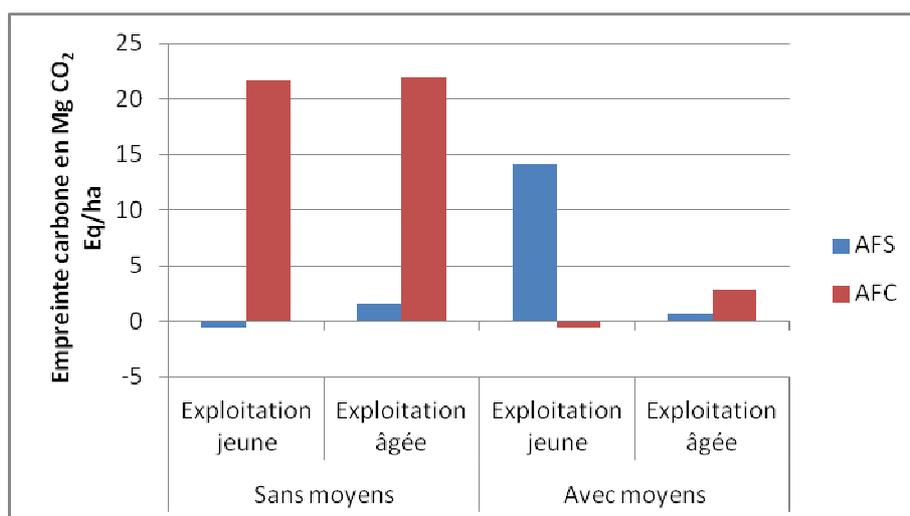


Figure 23: Empreinte carbone par hectare des exploitations agricoles

- Contribution des différents postes à l'empreinte carbone

Pour les sources de GES, la riziculture est le poste le plus émetteur avec 65 %. La fermentation entérique se place à la seconde place avec 11%. La gestion des tanety contribue 10 % des émissions et l'alambic participe à 8 % des émissions (Cf. **Figure 24**).

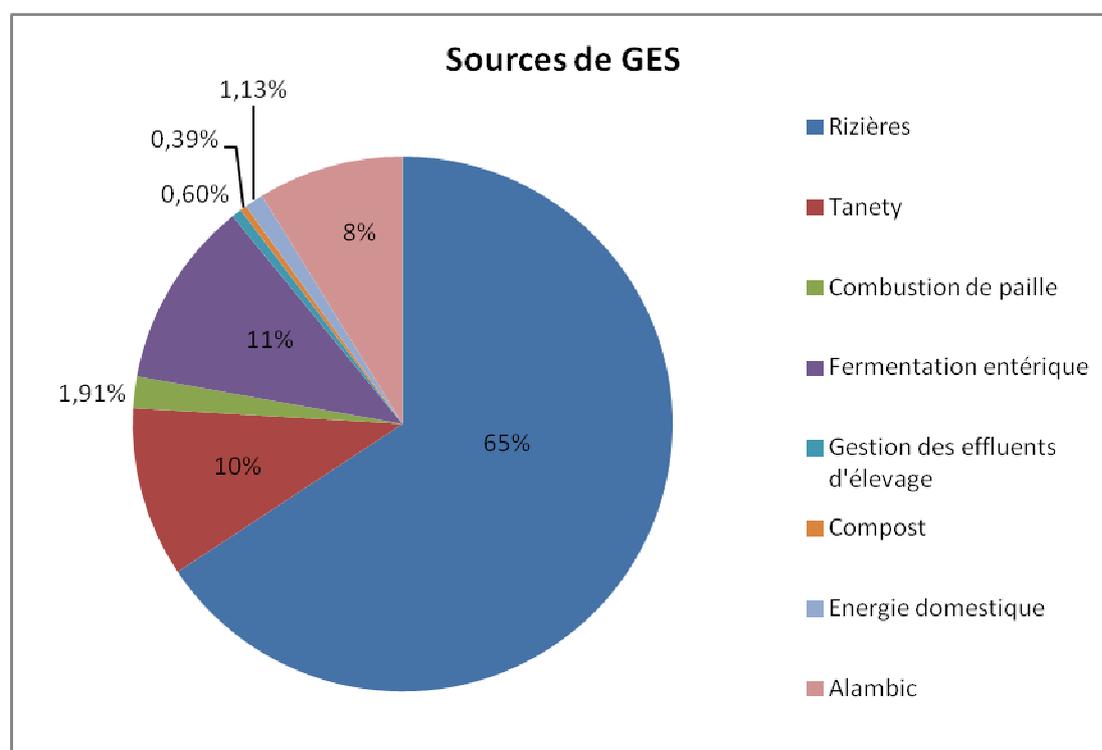


Figure 24: Distribution des émissions moyennes issues des différents postes (en %)

Les systèmes agroforestiers complexes contribuent en moyenne à 52% à l'absorption de CO₂ et les systèmes agroforestiers simples ont une part de 42%. Les AFC se distinguent par le nombre de ligneux plantés donc captent plus de CO₂ que les AFS qui sont une association ligneux (girofliers) et culture annuelle (riz, maïs, manioc, patate douce...). La densité des ligneux est plus élevée en AFC qu'en AFS. La restitution au sol est minimale, de l'ordre de 6%. En effet, l'apport de fertilisants sur les tanety est très restreint. (Cf. **Figure 25**)

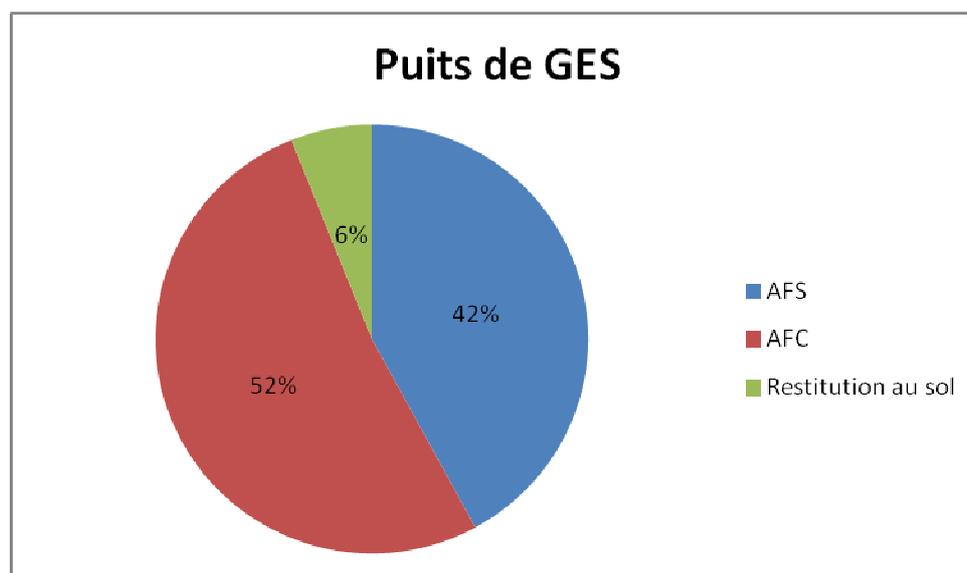


Figure 25: Distribution des absorptions moyennes issues des différents postes (en %)

- Diversité des modes de gestion et impacts sur le bilan de GES
 - La riziculture contribue le plus aux émissions de GES. Cela s'explique en grande partie par le système de culture adopté par les paysans. Le système de riziculture traditionnel est dominant et au cours d'une année, l'exploitant produit du riz sur deux cycles dont la durée varie entre quatre et cinq mois chacun. Ce système à inondation permanente favorise les émissions de CH₄ (28 Mg de CO₂ Eq/ha/cycle). Le SRI est encore adopté en faible proportion. Ce système qui est moins émetteur par rapport aux autres systèmes en raison de l'alternance des inondations et des aérations diminue les émissions de CH₄ chiffrées à 3,15Mg de CO₂ Eq/ha/cycle (Cf. **Figure 26**)

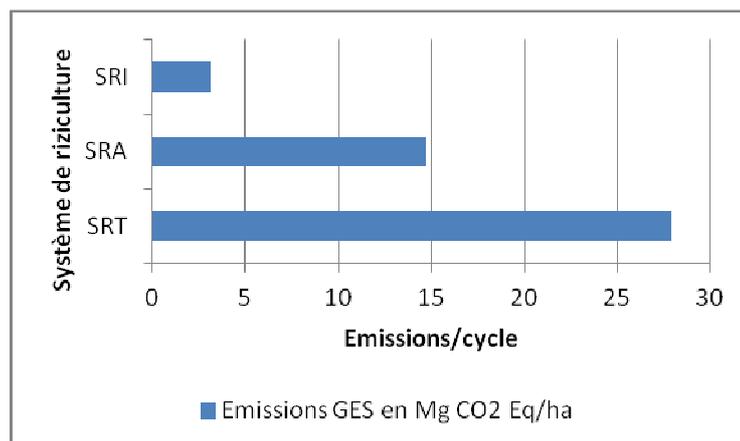


Figure 26: Emissions de GES en fonction des systèmes de riziculture

- Les tanety ne sont pas ou sont superficiellement travaillés. Le travail du sol sur tanety contribue à émettre 250 kg de CO₂ Eq/ha. La fermentation entérique contribue à 11% des émissions en moyenne pour les cas étudiés. Concrètement, la fermentation entérique issue de quatre zébus conduit à l'émission de 3100kg de CO₂ Eq. Si en plus les effluents d'élevage sont transformés, les émissions de GES liées à la fabrication du fumier s'élèvent à 660 kg de CO₂ Eq pour 1,5t de fumier produit. La restitution au sol de cette même quantité de fumier équivaut à 1627 kg de CO₂ Eq absorbés. Le bilan qui en résulte est de 2132 kg de CO₂ Eq, ce qui fait de l'élevage bovin une activité qui augmente l'empreinte carbone. La fermentation entérique des volailles est considérée comme nulle et la gestion des effluents d'élevage issus des volailles est faible. Utiliser les fientes de 30 têtes de volailles provoque l'émission de 15 kg de CO₂ Eq.
- Pour le cas du compost, la fabrication de 1000 kg de ce produit équivaut à une émission de 392 kg de CO₂ Eq. Cependant, s'il est entièrement restitué au sol, 441 kg de CO₂ Eq seront absorbés par le sol, ce qui fait de la fabrication du compost une activité qui augmente la production sans toutefois affecter l'empreinte carbone.

En comparant les contributions des différents postes à l'empreinte carbone, la typologie liée aux systèmes agroforestiers n'est pas déterminante. Les exploitations appliquent des modes de gestion différents pour les systèmes agroforestiers. Ils diffèrent à la fois par la structure-organisation spatiale des girofliers et l'objectif de production des girofliers.

- L'organisation spatiale des girofliers se présente sous trois formes : monoculture, agroforesterie simple (AFS) et agroforesterie complexe (AFC). Pour chaque forme d'organisation spatiale, l'exploitant gère ses arbres selon ses objectifs : production d'huile essentielle ou de clous de girofle. Les exploitants qui sont plus tournés vers la production de

clous de girofle limitent la fréquence de taille de leurs arbres tandis que les exploitants qui produisent en majorité de l'essence de girofle taillent leurs arbres en fonction de leurs besoins (2 à 3 fois/an). Pour cela, ils effectuent une sorte d'émondage. Les rameaux à la périphérie de la cime sont coupés et transportés vers l'alambic. Les feuilles séparées des rameaux sont distillées dans l'alambic. Les rameaux défeuillés sont destinés à alimenter le feu pour la fabrication d'huile essentielle.

- Pour le bilan de GES, c'est la production d'essence de girofle qui est plus émettrice. En effet, la récolte de biomasse pour la production d'essence (environ 50 kg de feuilles pour produire un litre d'essence) et le bois de chauffe pour la distillation (environ 1m³ de bois pour 24 heures) contribuent à augmenter la production de GES. La production d'un litre d'essence de girofle équivaut à l'émission de 20kg de CO₂ Eq (récolte de biomasse et bois utilisé pour la distillation). En cas de manque de liquidités, le paysan se tourne vers la production d'essence de girofle souvent de qualité médiocre.

- *Scénario : contribution des systèmes agroforestiers sur l'empreinte carbone*

Par rapport à l'empreinte carbone, la contribution des systèmes agroforestiers varie de 15% à 51% pour les exploitations étudiées, ce qui montre l'importance des systèmes agroforestiers pour faire diminuer l'empreinte carbone. Après simulation des mêmes situations étudiées, mais cette fois-ci sans agroforesterie, l'empreinte carbone augmente de façon considérable. Les empreintes carbone négatives deviennent supérieures à 0. Pour le cas de l'exploitation « Sans moyens-jeune exploitation-à dominance d'AFS », qui montre la plus grande variation, l'empreinte carbone qui était de -0.63 Mg CO₂ Eq/ha est passée à 14.02 Mg CO₂ Eq/ha si on supprime l'agroforesterie (Cf. **Figure 27**)

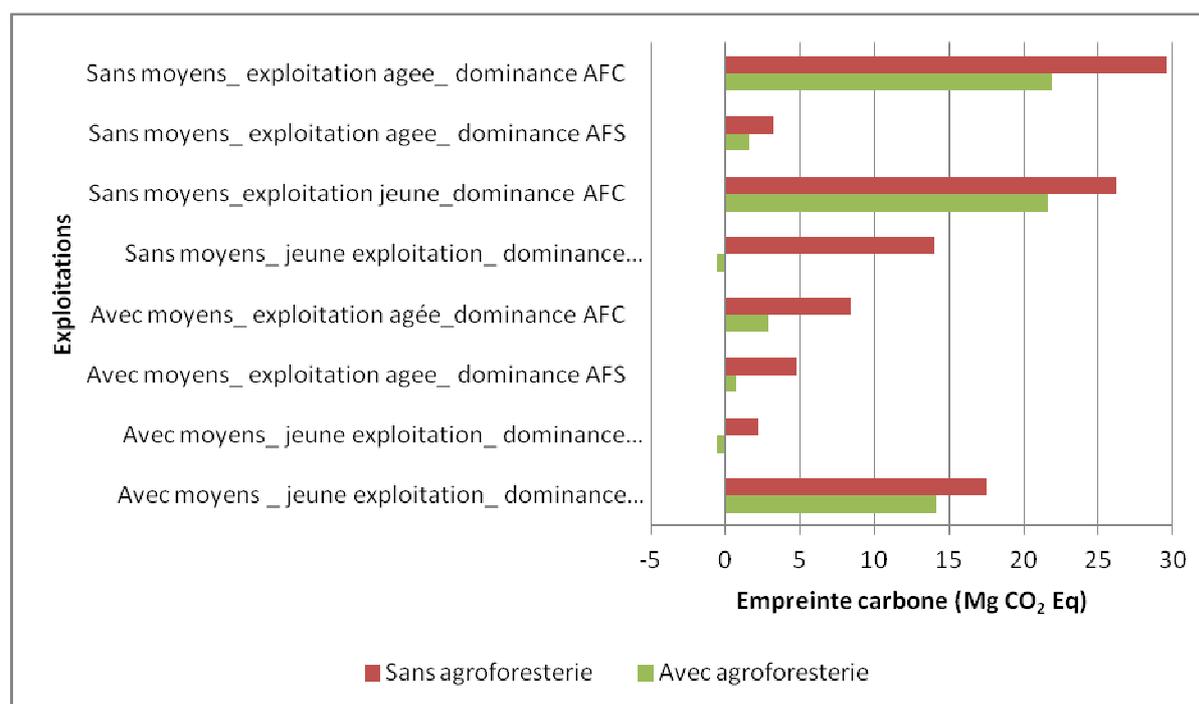


Figure 27: Comparaison des empreintes carbone en fonction de la présence ou non de pratiques agroforestières

- Comparaison avec d'autres études

Par rapport aux empreintes carbone des autres pays, la moyenne des empreintes carbone des exploitations dans le District de Fénérive qui se chiffre à 7,69 Mg CO₂ Eq/ha est élevée. La double riziculture traditionnelle sur bas-fonds en est la principale cause. La faible utilisation de fertilisants et donc la faible restitution au sol y est également pour beaucoup.

Les empreintes carbone des exploitations sans moyens sont nettement supérieures à celles des études internationales antérieures avec des empreintes dépassant les 20Mg de CO₂ Eq/ha. Néanmoins, les autres fermes rejoignent des valeurs plus faibles et même négatives. Le cas de la ferme du type « Avec moyens-exploitation jeune-à dominance d'AFC » en est une illustration, avec une empreinte carbone de -0,65 Mg de CO₂ Eq, les systèmes agroforestiers et la restitution au sol élevée arrivent à équilibrer les sources et les puits, en plus de l'utilisation du SRI.

Comparée à la valeur de l'empreinte carbone trouvée par Rakotovao (2011) dans la région Itasy, la valeur trouvée dans le District de Fénérive-Est demeure encore supérieure. Ceci s'explique par la différence entre les pratiques adoptées. Les paysans enquêtés de cette région pratiquent en général une riziculture annuelle et ont adopté des pratiques agroécologiques comme le SRI et le compostage alors que les techniques traditionnelles dominant encore dans le District de Fénérive-Est (Cf. **Tableau 10**).

Tableau 10: Quelques valeurs de l'empreinte carbone d'exploitations agricoles d'études antérieures

PAYS	REFERENCES	EMPREINTE CARBONE	
		(t EqCO ₂ /ha)	Principales sources
Ecosse	Topp et Rees (2008)	-18,3Mg EqCO ₂ /ha	Bétail, utilisation de fumier et d'engrais
	Hillier <i>et al</i> (2009)	2,78 Mg EqCO ₂ /ha	Fertilisation azotée
Chine	Cheng <i>et al.</i> (2011)	2,85 Mg EqCO ₂ /ha	Fertilisation azotée
UK	Hiller et al (2009)	1,28 Mg EqCO ₂ /ha	Utilisation d'engrais
France	ADEME (2007)	4,7 Mg EqCO ₂ /ha	Utilisation d'engrais, de pesticides et de combustibles fossiles
Madagascar	Rakotovoao (2011)	2,61 Mg EqCO ₂ /ha	Riziculture sur bas-fonds

V.1.2.2 Stock de carbone des exploitations agricoles

- Résultats de l'étude

En parallèle avec le calcul de l'empreinte carbone des exploitations, une estimation des stocks de carbone dans le sol et dans la biomasse ligneuse a été réalisée. En effet, en plus d'avancer un bilan GES au niveau de l'exploitation, jouer avec le potentiel de stockage de carbone de l'exploitation est également une option intéressante.

La moyenne de stock de carbone de la biomasse ligneuse dans cette région est de 16,05 MgC/ha. L'exploitation « Avec moyens- jeune exploitation- à dominance AFS » arrive à stocker jusqu'à 62,95 MgC /ha avec une densité de 500 pieds/ha mais reste une exception en raison de la densité très élevée des arbres.

La plantation de jeunes plants d'arbres contribuerait chaque année par leur accroissement annuel à 2,14 Mg de CO₂ Eq (à raison d'une densité moyenne de 250 arbres/ha), ce qui diminue annuellement l'empreinte carbone à 5,55 Mg de CO₂ Eq au lieu de 7,69 Mg CO₂ Eq/ha. Si on considère l'accroissement de façon linéaire, sur une durée de 20 ans, le stock de la biomasse ligneuse atteindrait 42,7 Mg de CO₂ Eq soit 11,6 Mg de C, une valeur non négligeable.

- Empreinte carbone et stocks de carbone

Au sein d'une exploitation, les activités peuvent à la fois être puits ou sources. L'empreinte carbone est l'expression qui en résulte. D'un autre côté, certaines activités contribuent à améliorer les stocks (restitution au sol, plantation de ligneux) ou à les diminuer (récolte de biomasse ligneuse). Une activité peut donc affecter l'empreinte carbone et le stock de carbone. La connaissance de l'empreinte carbone à un temps t_0 avec toutes les activités au sein de l'exploitation permet de déduire l'évolution des stocks, par rapport aux activités qui s'y déroulent. Cette étude a collecté des données relatives aux stocks de carbone exploitables (sols et ligneux) pour de futures études (Cf. **Figure 28**).

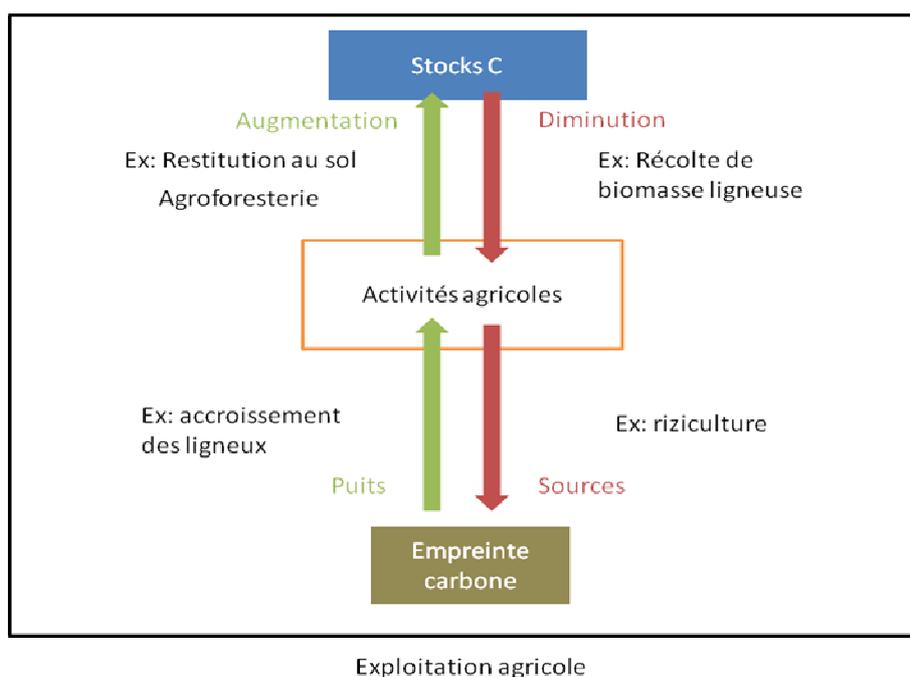


Figure 28: Relation activités agricoles- empreinte carbone- stocks C

V.1.2.3 Sur les hypothèses

Chaque activité au sein d'une exploitation influe de manière différente sur l'empreinte carbone. La riziculture contribue majoritairement aux émissions de GES mais sa contribution varie en fonction du système adopté, le SRI étant le moins émetteur. Varier les pratiques liées à la riziculture peut modifier l'empreinte carbone. Planter du riz sur deux cycles, mais changer le système de riziculture en réalisant par exemple une culture en SRI et la suivante en SRA ou SRT diminue déjà l'empreinte carbone.

Les tanety, émettent plus s'ils sont travaillés et s'ils bénéficient d'un apport azoté. Le compost réduit plus l'empreinte carbone que le fumier, en termes de restitution au sol. La fermentation entérique issue de quatre zébus entraîne l'émission de 3,1 Mg de CO₂ Eq. Cette quantité émise peut être compensée en restituant 1,5 Mg de fumier. L'ajout de 1,5 Mg de résidus d'alambic au fumier équivaut à restituer 4 Mg de CO₂ Eq, ce qui rend négatif les émissions. Les résidus d'alambic, peu utilisés par les paysans peuvent être ainsi valorisés.

- Ainsi, l'hypothèse 1 selon laquelle *la diversification des activités au sein de l'exploitation agricole augmente l'empreinte carbone* est donc partiellement vérifiée. Le choix entre des pratiques conventionnelles et alternatives influe les tendances, les pratiques comme le SRI et celles qui favorisent la restitution au sol conduisent à une réduction de l'empreinte carbone.

L'activité de production d'essence de girofle est émettrice. Or, si on alterne annuellement la production de clous et d'essence, au lieu d'une succession de distillations, le bilan GES peut être diminué. L'importance de l'accroissement annuel des ligneux pour le calcul de l'empreinte carbone et sa capacité à inverser la tendance en rendant une exploitation émettrice en une exploitation à tendance puits a déjà été démontré dans la phase de scénarisation.

Par rapport à l'activité rizicole qui émet 22,5 Mg de CO₂ Eq/ha pour un système traditionnel à raison d'une culture annuelle, planter 1000 pieds de girofliers équivaut à absorber 8,5 Mg de CO₂ par an, ce qui réduit du tiers les émissions.

- L'hypothèse 2 qui stipule que *la plantation d'espèces ligneuse réduit l'empreinte carbone* est donc confirmée.

V.2 Recommandations

V.2.1 Apports et intérêts de la recherche

V.2.1.1 Intérêts scientifiques

Malgré les nombreuses limites énoncées précédemment, les résultats de cette présente étude apportent des informations fondamentales et des éléments de réponse d'une portée non négligeable pour la connaissance des impacts des systèmes agroforestiers et des exploitations agricoles de la région d'étude en termes d'émissions de GES. En effet, c'est une des premières études qui s'est penchée sur les émissions de GES à l'échelle de toute l'exploitation et sur l'empreinte carbone.

V.2.1.2 Pour le CTHT

Une estimation de la capacité d'émissions des exploitations à base de systèmes agroforestiers et une évaluation du potentiel de stockage de carbone de ces exploitations ont pu être avancées lors de cette étude. A part la connaissance de ces deux éléments, une amélioration de la productivité par la vulgarisation de techniques moins émettrices est également envisageable.

V.2.2 Recommandations méthodologiques

V.2.2.1 Amélioration de l'échantillonnage et élaboration d'une nouvelle typologie

A partir de cette étude, il en est ressorti que la typologie de départ n'est pas déterminante pour le calcul de l'empreinte carbone. Une nouvelle typologie axée sur les pratiques agricoles est ainsi avancée (Cf. **Figure 29**).

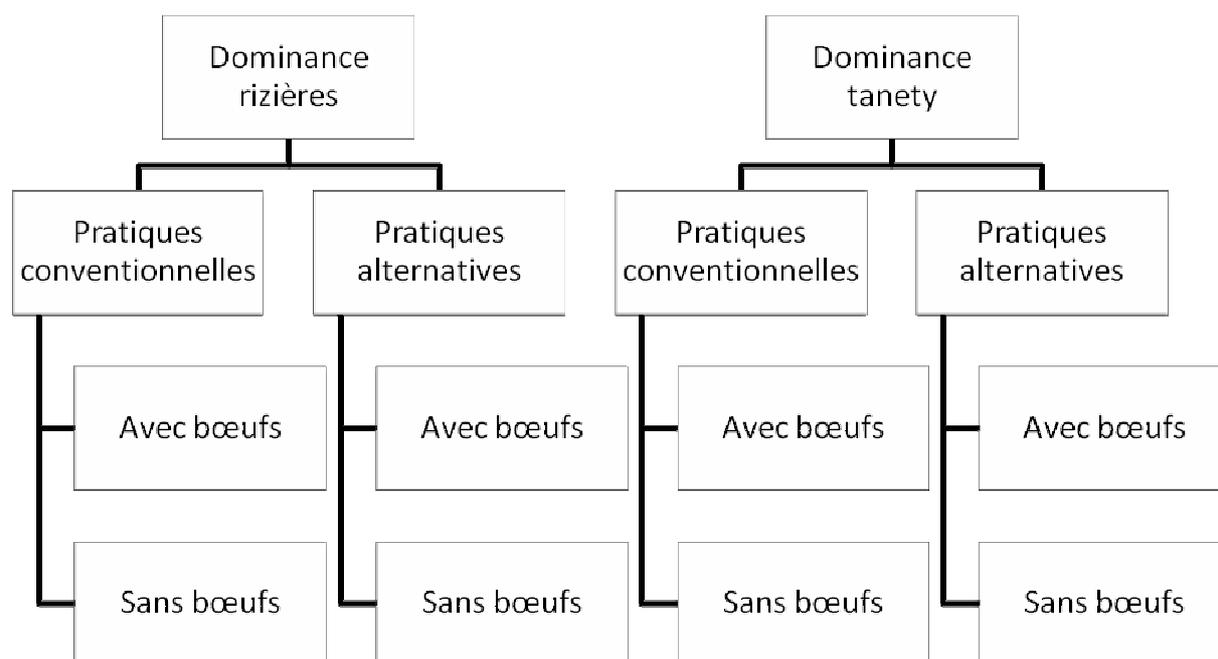


Figure 29: Nouvelle typologie proposée

Cette typologie « environnementale » est basée sur les critères suivants :

- La dominance de rizières et la dominance de tanety
- L'adoption de pratiques conventionnelles ou de pratiques alternatives
- La possession ou non de bœufs

Pour le premier critère, la superficie des rizières est fortement déterminante car c'est le compartiment le plus émetteur. Pour les tanety, la pratique de l'agroforesterie et donc le nombre de pieds sont déterminants.

L'adoption de pratiques conventionnelles ou de pratiques alternatives est également à considérer. Le SRI, le compostage, l'utilisation de pratiques favorisant la restitution au sol sont des pratiques qui influent sur l'empreinte carbone.

La fermentation entérique issue des bovins contribue aussi de manière importante à l'empreinte carbone. La considération d'exploitations qui en possèdent et celles qui n'en possèdent pas est également intéressante.

V.2.2.2 Calcul de l'empreinte carbone

Le calcul de l'accroissement annuel des arbres doit se faire en fonction de leur âge. La différence du carbone stocké au niveau des puits sera ainsi bien marquée pour chaque exploitation.

Des analyses statistiques doivent être menées pour mieux démontrer la significativité des différences entre les pratiques.

V.2.3 Recommandations pratiques

Découlant de cette recherche, quelques recommandations pratiques sont avancées pour les futures études et projets relatifs à cette zone d'étude. Les principaux axes d'orientation proposés visent une amélioration du calcul de l'empreinte carbone des exploitations à base de systèmes agroforestiers.

Le premier axe proposé est **d'effectuer des recherches complémentaires à l'empreinte carbone de ces exploitations**. Pour la mise en œuvre d'une telle entreprise, la nouvelle typologie basée sur les pratiques au sein de chaque exploitation doit être mise en place. De plus, un échantillonnage plus affiné, avec un taux d'échantillonnage plus élevé, sur une plus grande répartition spatiale est également conseillé. Des recherches sur les facteurs d'émissions spécifiques à la zone d'étude sont également à mener, ce qui nécessite un investissement sur une plus longue durée. Les autres espèces ligneuses qui n'ont pas été étudiées méritent aussi un approfondissement, en termes d'allométrie.

Le second axe d'orientation proposé est de **calculer une empreinte carbone non plus au niveau des exploitations mais au niveau des produits**. L'huile essentielle de girofle, dont les opportunités sont de plus en plus croissantes avec les industries pharmaceutiques, mérite une approche plus centrée. De plus, elle se distingue par son caractère biologique qui perce sur le marché mondial actuellement. En parallèle avec cette étude, un encadrement des paysans pour produire une huile de meilleure qualité est préconisé. Le clou de girofle et le litchi peuvent également bénéficier de cette approche mais avec l'approche LCA, qui analyse tout le cycle du produit jusqu'à sa commercialisation, incluant le transport jusqu'au port (Cf. **Tableau 11**).

Tableau 11 : Cadre logique de stratégies

Axe d'orientation n°1 : Effectuer des recherches complémentaires à l'empreinte carbone de ces exploitations				
Résultats attendus	Activités	Responsables	IOV	Echéance
Les données sur les émissions et les absorptions spécifiques à la zone d'étude sont déterminées	<ul style="list-style-type: none"> - Expérimentation et mesure des émissions et absorptions au niveau de chaque poste émetteur - Etude des espèces agroforestières (allométrie,) 	Instituts de recherche : LRI - IRD	Valeurs de facteurs d'émission	Moyen terme
Axe d'orientation n°2 : Calculer une empreinte carbone au niveau des produits				
Résultats attendus	Activités	Responsables	IOV	Echéance
Des valeurs d'empreinte carbone pour chaque produit sont déterminées : litchi, clou de girofle, essence de girofle	<ul style="list-style-type: none"> - Réalisation d'une étude d'analyse de cycle de vie au niveau de chaque produit 	Instituts de recherche : LRI – IRD, CTHT	Valeurs d'empreinte carbone pour chaque produit	Moyen terme



CONCLUSIO N

VI. CONCLUSION

La problématique du changement climatique a engendré de nombreuses initiatives dans le sens de la quantification des émissions de gaz à effet de serre en vue d'une atténuation ou d'une adaptation aux phénomènes climatiques. L'empreinte carbone, en tant que mesure de l'impact sur l'environnement des activités anthropiques en termes de GES est un outil adapté et d'actualité pour la compréhension et l'évaluation des émissions à de nombreuses échelles. Cette recherche centrée sur l'empreinte carbone des exploitations agricoles à base de systèmes agroforestiers a montré que la classification des exploitations par rapport à leurs moyens de production et par rapport à leurs âges n'influence pas l'empreinte carbone des exploitations agricoles. Par contre, l'agroforesterie joue un rôle important pour la valeur de l'empreinte carbone. Ce qui justifie la pertinence de la nouvelle typologie orientée vers une approche par type d'activité. Les pratiques conventionnelles appliquées dans la région de Fénériver Est contribuent pour beaucoup à l'augmentation de l'empreinte carbone mais le rôle de l'agroforesterie en tant que puits est également majeur.

La réalisation de la carte des flux des ressources a permis de représenter schématiquement le fonctionnement des exploitations et de surtout de faciliter l'inventaire des puits et des sources de GES. Grâce à un calculateur conçu pour la présente recherche, la détermination de l'empreinte carbone résultante a pu être réalisée. La démarche méthodologique adoptée lors de cette étude, notamment la carte des flux des ressources et le calculateur, peut servir de base aux recherches futures sur l'empreinte carbone.

Les systèmes agroforestiers de la zone d'étude possèdent un énorme potentiel, tant sur le plan environnemental que sur le plan production qui nécessite d'être exploité. Un encadrement à la base des exploitants agricoles afin de favoriser une amélioration de la qualité des produits et des formations portant sur des pratiques alternatives à la fois sur les cultures annuelles et les cultures pérennes méritent d'être réalisés. Ce afin de réduire l'empreinte carbone sans nuire à la production ou visant même à l'augmenter. Une approche « filière » est également adaptée pour cette zone où les cultures de rente tiennent une place importante dans l'économie nationale. L'agroforesterie au niveau des exploitations agricoles est un secteur porteur mais elle doit maintenant être orientée vers le critère qualité et non plus seulement vers la survie.

Références bibliographiques

- ADEME (2007), *Synthèse 2006 des bilans PLANETE – Consommation d'énergie et émissions de GES des exploitations agricoles ayant réalisé un bilan PLANETE*. SOLAGRO.
- Albrecht, A. and Kandji, S. T. (2003), « Carbon sequestration in tropical agroforestry systems », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **99** : 15–27
- Albrecht, A., Razafimbelo, T., Gantien, A. (2010), Changement climatique et SRI, Atelier National SRI : « Le SRI à Madagascar : un levier de la croissance économique, de la sécurité alimentaire et du développement durable ».
- Andrianaivonirina, R. M. (2011), *Caractérisation des matières organiques exogènes issues de l'élevage par la minéralisation potentielle, pour une valorisation potentielle-Mémoire de fin d'études*. Département Agriculture-ESSA-Université d'Antananarivo.
- Batjes, Niels H. (2008), « Mapping soil carbon stocks of Central Africa using SOTER », *Geoderma*, **146** : 58–65
- Brandao, M., Canals, L. M., Clift, R. (2010), « Soil organic carbon changes in the cultivation of energy crops: Implications for GHG balances and soil quality for use in LCA », *Biomass and Bioenergy*, 1-14
- Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., Barraclough, P., Kuhlmann, H. (2004), « Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems », *Europ. J. Agronomy*, **20** : 265–279
- Chapuis-Lardy, L., Metay, A., Martinet, M., Rabenarivo, M., Toucet, J., Douzet, J.M., Razafimbelo, T., Rabeharisoa, L., Rakotoarisoa, J. (2009), « Nitrous oxide fluxes from Malagasy agricultural soils », *Geoderma*, **148** : 421–427
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Folster, H., Kira, T., Lescure, J.P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riera, B., Yamakura, T. (2005), “Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests”, *Oecologia*, **145**: 87–99
- Cheng, K., Pan, G., Smith, P., Luo, T., Li, L., Zheng, J., Zhang, X., Han, X., Yan, M. (2011), “Carbon footprint of China's crop production—An estimation using agro-statistics data over 1993–2007”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 1- 7

- Cherubinia, F., Birda, Neil D., Cowieb, A., Jungmeiera, G., Schlamadingerc, B., Woess-Gallascha, S. (2009), « Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations », *Resources, Conservation and Recycling*, **53** : 434–447
- Defoer, T. (2002), « Learning about methodology development for integrated soil fertility management », *Agricultural Systems* **73** : 57–81
- Esilaba, A. O., Nyende, P., Nalukenge, G., Byalebeka, J.B., Delve, R.J., Ssali, H. (2005), “Resource flows and nutrient balances for crop and animal production in smallholder farming systems in eastern Uganda”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **109** : 192–201
- Falinirina, M. V. (2010), *Valorisation agricole des apports organiques contenus dans les déchets urbains: qualité des matières organiques et services écosystémiques*, Doctorat en Sciences Agronomiques, ESSA, Université d’Antananarivo.
- Gan, Y., Liang, C., Wang, X., McConkey, B. (2011), « Lowering carbon footprint of durum wheat by diversifying cropping systems », *Field Crops Research*, **122** : 199–206
- GIEC (2001), *Bilan 2001 des Changements Climatiques: Mesures d'atténuation. W. R. H. J. Y. D. WGI.*
- GIEC (2003), *Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie,*
- GIEC (2006), *Lignes directrices pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, Volume 1.*
- GIEC (2007), *Bilan 2007 des changements climatiques, Rapport de synthèse*, Genève, Suisse.
- Gifford, R. M. (1984). “Energy in different agricultural systems: renewable and nonrenewable Sources”. *Energy and agriculture*. 84–112.
- Grinand, C., Rajaonarivo, A., Bernoux, M., Pajot, V., Brossard, M., Razafimbelo, T., Albrecht, A., Le Martret, H. (2009), Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar, *Etude de Gestion des Sols*, **16**: 23-33
- Hillier, J., Hawes, C., Squire, G., Hilton, A., Wale, S., Smith, P. (2009), “The carbon footprints of food crop production”, *International Journal Of Agricultural Sustainability*, **7**: 107–118
- Kerr, A. R. (2007), “How urgent is climate change?”, *Science*, **318**: 1230–1231
- Lal, R. (2004), “Carbon emission from farm operations”, *Environment International*, **30**: 981– 990

- Lightfoot, C., Dalsgaard, J.P., Bimbao, A.M., Fermin, F. (1992), *Farmer participatory procedures for managing and monitoring sustainable farming systems*, International Centre for Living Aquatic Resources Management (ICLARM), Manila, Philippines.
- Montagnini, F. and Nair, P. K. R. (2004), « Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems », *Agroforestry Systems*, **61**: 281–295
- ONE (2009), *Tableau de bord environnemental Région Analanjirifo*
- Padgett, J. P., Steinemann, A. C., Clarke, J. H., Vandenberg, M. P. (2007), “A comparison of carbon calculators”, *Environmental Impact Assessment Review*, **28**: 106–115
- Pandey, D., Agrawal, M., Pandey, J. S. (2010), “Carbon footprint: current methods of estimation”, *Environ Monit Assess*, DOI 10.1007/s10661-010-1678-y
- Parker, C., Mitchell, A., Trivedi, M., Mardas, N. (2009), *Le petit livre du REDD+ Guide de propositions gouvernementales et non gouvernementales visant à réduire les émissions liées à la déforestation et à la dégradation de la forêt*, Oxford : Global Canopy Program.
- Pattey, E., Trzcinski, M.K., Desjardins, R.L. (2005), « Quantification de la réduction des émissions de gaz à effet de serre produites par le compostage de fumier de bovins de boucherie et de bovins laitiers », *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **72**: 173-187.
- Projet ACCA Madagascar (2010), *Adaptation aux changements climatiques en Afrique, vulnérabilité et adaptations des systèmes agraires à Madagascar aux changements climatiques Rapport technique final 2007 – 2010*, LRI/IRD.
- RABENARIVO, M. (2011), *Potentialités d'émissions de dioxyde de carbone et de protoxyde d'azote des sols de systèmes de culture en semis direct sous couverture végétale permanente à Madagascar*, Doctorat en Sciences Agronomiques, ESSA, Université d'Antananarivo.
- Rakotovao (2011), *Empreinte carbone de différents types d'exploitation agricole basés sur des pratiques agroécologiques-Région Itasy*, Mémoire de fin d'études, Département Agriculture, ESSA, Université d'Antananarivo.
- Ramiandrisoa (2011), *Quantification du stock de carbone dans les systèmes agroforestiers en vue d'une simulation de projet de financement de crédits carbone : cas de la Région Analanjirifo et Atsinanana*, Mémoire de fin d'études, Département Agriculture, ESSA, Université d'Antananarivo.

- Ranaivonasy, J., Ratsirarson, J., Ramamonjisoa, B., Rasolofomampianina, D., Rakotoarisoa, J. A., Dewar, R. E., Silander, J., A. (2003), *Dynamique de la couverture forestière de la Région d'Analajirofo : Aspects historiques, écologiques et socio-économiques*, Antananarivo, Centre d'Information et de Documentation Scientifique et Technique.
- Randevoson, N. M. L. (2009), *Les systèmes agroforestiers face aux aléas climatiques, Cas de la Région Analajirofo*, Mémoire de fin d'études, Département Agriculture, ESSA, Université d'Antananarivo.
- Ratovoson, A. A. N. (2011), *Analyse de la dynamique spatio-temporelle des paysages dans la Région d'Analajirofo*, Mémoire de fin d'études, Département des Eaux et Forêts, ESSA, Université d'Antananarivo.
- Razafimahatratra, H. M. (2006), *Evaluation des stocks de carbone du sol sous différents modes d'usages des terres dans le corridor forestier de Vohimana-District de MORAMANGA (MADAGASCAR)*, Doctorat en Sciences Agronomiques, ESSA, Université d'Antananarivo.
- Razafimbelo, T. (2005), *Stockage et protection du carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres malgaches*, Doctorat en Science du Sol, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.
- Razafindramanana, N. C. (2006), *Afforestation et stockage de carbone en lisière ouest du corridor forestier de Fianarantsoa (Madagascar)*, DEA en Sciences Agronomiques, ESSA, Université d'Antananarivo.
- Razakamanarivo, R.H. (2009), *Potentialités de stockage de carbone dans le système plante-sol des plantations d'Eucalyptus des hautes terres malgaches*. Doctorat en Sciences Agronomiques, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques Antananarivo, Université de Montpellier, SupAgro Montpellier.
- Smith, J. and Scherr, S.J. (2002), *Forest Carbon and Local Livelihoods: Assessment of Opportunities and Policy Recommendations*, CIFOR Occasional Paper 37, Centre for International Forestry Research, Jakarta, Indonesia.
- Soamazava, S. E. (2008), *Etude des séries évolutives des systèmes agraires en relation avec les changements climatiques-Cas du District de Fénériver-Est, Région Analajirofo*, Mémoire de fin d'études, Département Agriculture, ESSA, Université d'Antananarivo.
- Tiftonell, P., Vanlauwe, B., Leffelaar, P.A., Rowe, E.C., Giller, K.E. (2005), "Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **110** : 149–165

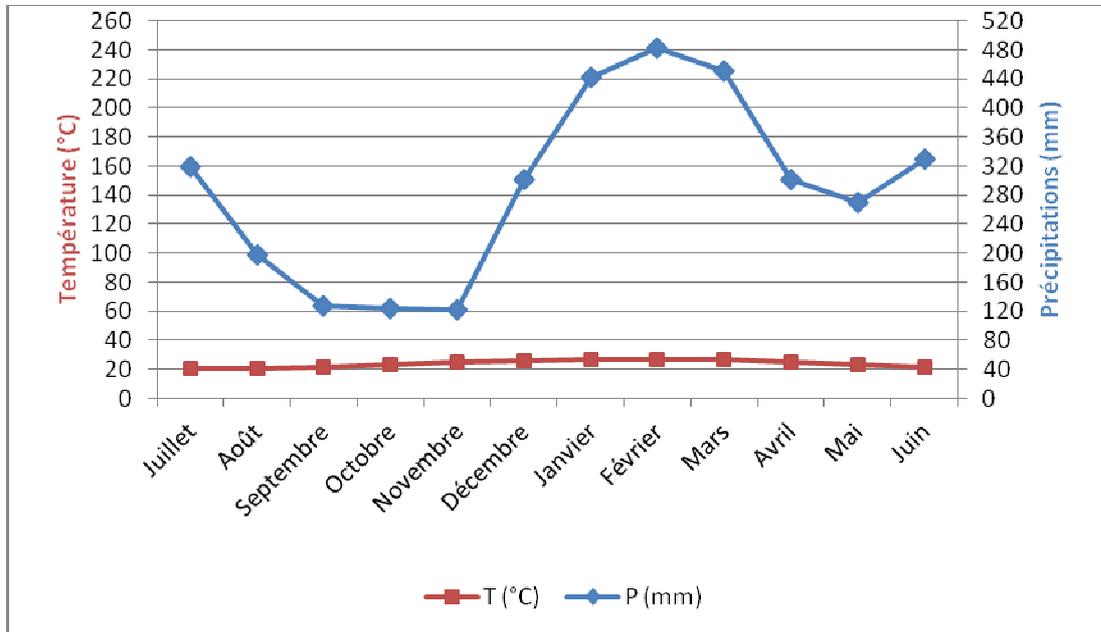
- Topp, K. and Rees, B. (2008), *Carbon footprint reporting for a Scottish livestock farm, Rural policy center, Research briefing*, Rural Policy Center.
- Walkley, A. and Black, I.A. (1934), “An Examination of Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method”, *Soil Science* **63**: 251-257.
- Wiedmann, T. and Minx, J. (2008), “A Definition of 'Carbon Footprint'”, *Ecological Economics Research Trends*, Chapitre 1, 1-11
- Zemek, O. J. (2009), *Biomass and carbon stocks inventory of perennial vegetation in the chieng koi watershed, nw vietnam*, Thesis, University of Hohenheim, Department for Agroecology and Plant Production in the Tropics and Subtropics.

Webiographie

- www.icraf.cgiar.org
- www.fao.org

Annexes

Annexe 1: courbe ombrothermique de la Région Analanjirofo



Station ASECNA Toamasina

Source : SOAMAZAVA, 2008

Annexe 2: Questionnaire d'enquête

Date :

N° exploitation :

Site	
Village	
Typologie	

Force de travail

Nom du chef de famille	Sexe	Situation matrimoniale	Education

	Homme	Femme
Membres de la famille		
Membres habitant et travaillant dans la ferme		
Membres travaillant à plein temps dans la ferme		
Membres travaillant à temps partiel dans la ferme		
% revenus provenant de la ferme		

Main-d'œuvre familiale	
Main-d'œuvre extérieure	

Foncier

	Oui	Non	Surface	
			Utilisée	Non utilisée
Terres en possession				
Terres en location				

Activités de l'exploitation

Agriculture

Nombre de parcelles :

Parcelle n° :

Etage écologique			Propriété ou en location				
Surface			Mesures GPS				
Système de culture		Culture 1 (ligneux)	Culture 2	Culture 3	Culture 4	Culture 5	Culture 6
		Durée	Durée	Durée	Durée	Durée	Durée
		Pratique agroforestière					
Fertilisants inorganiques	Type						
	Quantité						
Fertilisants organiques							
Compost	Type						
	Quantité						
Fumier	Type						
	Quantité						
Résidus	Type						
	Quantité						
Pesticides	Type						
	Quantité						
Fongicides	Type						
	Quantité						
Production							

Rendement							
Destination des récoltes	Auto-consommation						
	Vente						
	Don						
	Rémunération par nature						
	Semences						
	Pertes						
Résidus							
Travail du sol							
Matériel agricole	Type						
	Quantité (durée)						
	Consommation						
	Consommation totale						
	Valeur (cons tot*prix)						
	Location						
	Valeur totale						
Traction animale	Type						
	Quantité (durée)						
	Location						
Main-d'œuvre	Quantité (durée)						
	Location						
	Non louée						
	Salaire journalier						
	Valeur totale						

Élevage

Type		Elevage 1	Elevage 2	Elevage 3	Elevage 4
Effectif					
Alimentation					
Pâturage naturel	Origine				
	Quantité				
Complémentation	Origine				
	Quantité				
Aliments fabriqués	Origine				
	Quantité				
Résidus	Origine				
	Quantité				
Autres	Origine				
	Quantité				
Production					
Destination des produits	Auto-consommation				
	Vente				
	Don				
	Rémunération par nature				
	Géniteurs				
	Pertes				
Devenir des déchets					

Sub-division de la ferme

	Parcelle n°					
Etage écologique						
Type de sol						
Texture du sol						
Capacité de rétention d'eau						
Fertilité						
Pente						
Type d'adventice						
Distance par rapport aux bâtiments						
Autres						

Perceptions du fermier

Depuis combien de temps vivez-vous sur ces terres ?	
Dans quel ordre priorisez-vous les cultures ?	
Pourquoi ?	
Dernières saisons de récoltes des 5 principales cultures	
Est-ce que les rendements ont changé ces 10 dernières années?	
Comment?	
Pourquoi?	
Quelles sont les causes des différences de rendements entre les parcelles ?	
- maladies	
- utilisation de différentes variétés	
- utilisation d'intrants	
- érosion	
- baisse de fertilité du sol	
- autres	
En quelle période préparez-vous les terres (en fonction des pluies) ?	
Est-ce que les périodes varient suivant les parcelles ?	
Dans quel ordre? Pourquoi?	

Annexe 3: Prélèvement de sols



Photo 3: Enfouissement du cylindre



Photo 4: Extraction du cylindre



Photo 5: Enlèvement du surplus de terre



Photo 6: transfert dans un seau du sol prélevé à la tarière



Photo 7: mélange de sols d'un même horizon avant mise en sachet

Annexe 4: Protocole Walkley et Black **version** Jean De La Rivière 2011

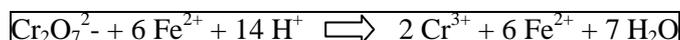
1. PRINCIPE

La matière organique est oxydée sans chauffage externe par une solution sulfurique de dichromate de potassium. On considère que la chaleur de dissolution de H₂SO₄ (120°C) est suffisante pour oxyder 77% du carbone. L'excès de dichromate est dosé par le sel de Mohr.

La réaction d'oxydation du carbone peut s'écrire :



La réaction de titrage du dichromate par le sel de Mohr peut s'écrire:



2. PREPARATION DES SOLUTIONS

Bichromate de potassium, solution N :

Peser exactement 49.035 g de K₂Cr₂O₇ séché à l'étuve à 105°C. Les dissoudre dans 800 ml d'eau distillée. Compléter le volume à 1000 ml dans une fiole jaugée.

Acide sulfurique, solution 0.5 N environ :

Verser 14 ml d'acide sulfurique concentré (d=1,84) dans un litre d'eau distillée. Utiliser cette solution pour la préparation du sel de Mohr.

Sel de Mohr [(NH₄)₂ Fe (SO₄)₂, 6H₂O], solution 0.5 N :

Dissoudre 196.1 g de sel de Mohr dans un litre d'acide sulfurique 0.5 N. Déterminer le titre exacte du sel de Mohr par le dichromate chaque jour de dosage. Conserver la solution en flaquant brun. Cette solution ne se conserve pas plus de trois jours (si conservation plus longue, dépôt de fer ferreux qu'il faudra nettoyer à l'acide).

3. MODE OPERATOIRE

Peser un poids P de terre broyée. La prise P doit contenir 5 à 12.5 mg de carbone. Elle est déterminée en fonction du taux d'azote dans le sol pour un rapport C/N supposé égal à 10.

Mette la prise P dans une fiole cylindroconique de 125 ml.

Ajouter 5 ml de dichromate N à la pipette automatique

10 ml d'acide sulfurique concentré (d= 1.84) avec la dispensette

Faire un témoin sans sol (titrage du sel de Mohr par le dichromate).

Agiter une minute. Laisser 30 mn sur une plaque isolante résistant à la chaleur (bois).

Ajouter 100 ml d'eau distillée puis un barreau aimanté.

Introduire l'électrode rédox et la pointe de burette dans la fiole.

Titrer l'excès de dichromate par la solution 0.5 N de sel de Mohr (titrateur Crison)

Calculer les limites maximales et minimales à l'intérieur desquelles doit se trouver le volume V_s de sel de Mohr nécessaire pour neutraliser l'excès de dichromate. Si V_s sort des limites, recommencer le dosage en changeant le poids P de la prise.

4. CALCULS

- **Détermination du poids P de la prise d'essai :**

Si l'on connaît la teneur en azote : calculer P à partir de la formule suivante :

$$P = \frac{15}{10 N^{0/100}}$$

15 est le poids moyen en mg de dans la prise P .

10 est la valeur moyenne du rapport C/N .

$N^{0/100}$ est la teneur en azote en g pour 1000 g de sol.

Si l'on ne connaît pas la teneur en azote : faire un premier essai sur une prise de 0.5 à 1 g de terre.

Calculer des limites du volume du sel de Mohr :

Soient : V_t le volume de sel de Mohr nécessaire pour le témoin.

V_s le volume de sel de Mohr nécessaire pour l'échantillon

V_s doit être inférieur à $V_t - \left(\frac{V_t}{39}\right) * 10$ ($C > 10\text{mg}$)

V_s doit être supérieur à $V_t - \left(\frac{V_t}{39}\right) * 25$ ($C < 25\text{mg}$)

Les limites maximales et minimales de V sont :

$$V_s \text{ maxi} = 0.74 V_t$$

$$V_s \text{ mini} = 0.36 V_t$$

Calcul de la prise P' pour le second essai :

Seulement pour le cas où V sort des limites :

Soient C mg de carbone dans la première prise P : $C \# (V_t - V_s)_2$

C mg de carbone dans la prise P' : $C \# 16$.

Le poids P' du sol pour la seconde prise est donné par la formule approchée :

$$P' = \frac{8P}{V_t - V_s}$$

5. EXPRESSION DES RESULTATS

10 ml de dichromate correspond à $\frac{30 * 100}{77}$ soit 39mg de C

Soient P la prise d'essai en grammes

Vt le volume de sel de Mohr 0.5 N en ml pour le témoin

Vs le volume de sel de Mohr 0.5 N en ml pour l'échantillon

C % le poids de carbone en g pour 1000 g de terre

On obtient la teneur en matière organique M.O. % en multipliant le résultat ci-dessus par 1.724.

$$M.O = 1.724 * C$$

Annexe 5: Tableur Excel

SOURCES

1. **Rizières**

	SRI				SRA				SRT			
	CH ₄ (kg)	N ₂ O (kg)	CO ₂ (kg)	CO ₂ Eq (kg)	CH ₄ (kg)	N ₂ O (kg)	CO ₂ (kg)	CO ₂ Eq (kg)	CH ₄ (kg)	N ₂ O (kg)	CO ₂ (kg)	CO ₂ Eq (kg)
<i>Superficie (Ha)</i>												
<i>Facteur d'émission</i>	0,84	1			3,92	0,0047			7,45	0,0047		
<i>Apport N2O-N(kg)</i>												
<i>Durée du cycle(j)</i>												
<i>Emissions</i>	0	0	0		0	0			0	0		
<i>Emissions CO2 Eq (kg)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2. **Tanety**

	TRAVAIL DU SOL	
	N ₂ O (kg)	CO ₂ Eq (kg)
<i>Superficie (Ha)</i>		
<i>Facteur d'émission</i>	0,84	
<i>Emissions</i>	0	
<i>Emissions CO2 Eq (kg)</i>	0	0

APPORT D'AZOTE PAR FERTILISANT		
	quantité (t)	N apporté (kg)
compost (t)		0
fumier (t)		0
lisier (t)		0
fiente volaille (t)		0
	N total apporté	0

3. Minéralisation aux champs

	résidus cultures	fumier de bovin	fumier de porc	fumier de volaille	compost	résidus de distillation
	CO ₂ Eq (kg)					
Quantité (t)						
facteur d'émission	365,79	0,2964	0,2011	0,223	0,15	396,05
C émis (t)	0	0	0	0	0	0
Emissions CO2 Eq (kg)	0	0	0	0	0	0

4. Combustion de la paille

	CH ₄ en CO2 Eq (kg)	N ₂ O en CO2 Eq (kg)	CO ₂ (kg)	CO ₂ Eq (kg)
Quantité (t)	0	0	0	
Facteur d'émission	96,12624	16,30713	613,05	
Emissions CO2 Eq (kg)	0	0	0	0

5. Fermentation entérique

	BOVINS		BOVINS LAITIERS		PORCS		LAPINS	
	CH ₄ (kg)	CO ₂ Eq (kg)	CH ₄ (kg)	CO ₂ Eq (kg)	CH ₄ (kg)	CO ₂ Eq (kg)	CH ₄ (kg)	CO ₂ Eq (kg)
Nombre de têtes								
Facteur d'émission	31		41		1		0,08	
Emissions	0		0		0		0	
Emissions CO2 Eq (kg)	0	0	0	0	0	0	0	0

6. Gestion des effluents d'élevage

fumier de bovin				
	CH ₄ (kg)	N ₂ O (kg)	CO ₂ (kg)	CO ₂ Eq (kg)
Quantité (t)	0	0	0	
Facteur d'émission	2,850	0,034	358,110	
Emissions CO2 Eq (kg)	0	0	0	0
fumier de porc				
	CH ₄ en CO2 Eq (kg)	N ₂ O en CO2 Eq (kg)	CO ₂ (kg)	CO ₂ Eq (kg)
Quantité (m³)				
Facteur d'émission	0,16104	0,02928	2,91336	
Emissions CO2 Eq (kg)	0	0	0	0
fumier de volaille				
	CH ₄ (kg)	CO ₂ Eq (kg)		
Nombre de têtes				
Facteur d'émission	0,02			
Emissions	0			
Emissions CO2 Eq (kg)	0		0	
compost				
	CH ₄ (kg)	N ₂ O (kg)	CO ₂ (kg)	CO ₂ Eq (kg)
Quantité (kg)				
Facteur d'émission	0,14	0,162	340,06	
Emissions	0	0	0	
Emissions CO2 Eq (kg)	0	0	0	0

7. Energies domestique et d'autres activités

	CHARBON DE BOIS
	CO ₂ Eq (kg)
<i>Quantité (t)</i>	0
<i>Facteur d'émission</i>	164,424768
<i>Emissions CO2 Eq (kg)</i>	0

	BOIS DE CHAUFFE
	CO ₂ Eq (kg)
<i>Quantité (m³)</i>	0
<i>Facteur d'émission</i>	10
<i>Emissions CO2 Eq (kg)</i>	0

	PETROLE
	CO ₂ Eq (kg)
<i>Quantité (l)</i>	
<i>Facteur d'émission</i>	2,994246
<i>Emissions CO2 Eq (kg)</i>	0

	GASOIL	ESSENCE
	CO ₂ Eq (kg)	
<i>Quantité (m³)</i>		
<i>Facteur d'émission</i>	2600	2900
<i>Emissions CO2 Eq (kg)</i>	0	0

8. Alambic

bois de chauffe

CO ₂ Eq (kg)

Quantité (m ³)	0
Facteur d'émission	10
Emissions CO2 Eq (kg)	0

récolte biomasse

CO ₂ Eq (kg)

Quantité (kg)	0
Facteur d'émission	0,183
Emissions CO2 Eq (kg)	0

PUITS

1. Espèces ligneuses

agroforesterie simple

	Accroissement annuel (m3/ha/an)	densité peuplement (pieds/ha)	densité du bois	nombre de pieds	CO2 Eq (kg)
<i>Eucalyptus sp.</i>	15	1200	0,58		0
<i>Acacia sp.</i>	15	1200	0,75		0
Absorption CO2 Eq (kg)					0
	Accumulation kg de C/Ha/an	densité de peuplement (pieds/ha)	Accumulation kg de C/pied/an	nombre de pieds	CO2 Eq (kg)
<i>Mixed fruit trees(caféier)</i>	510	475	1,074		0
<i>Arbres fruitiers</i>	3250	250	13,000		0
Absorption CO2 Eq (kg)					0
	Quantité de biomasse produite (kg/pied)	Nombre de pieds	CO2 Eq (kg)		
<i>Eugenia cariophyllus</i>	4,440		0		
<i>Litchi sinensis</i>	9,440		0		
<i>Glyricidia sp</i>	4,870		0		
<i>Cocos nucifera</i>	1,371		0		
Absorption CO2 Eq (kg)					0

agroforesterie complexe AFC

	Accroissement annuel (m3/ha/an)	densité peuplement (pieds/ha)	densité du bois	nombre de pieds	CO2 Eq (kg)
<i>Eucalyptus sp.</i>	15	1200	0,58		0,000
<i>Acacia sp.</i>	15	1200	0,75		0,000
Absorption CO2 Eq (kg)					0,000
	Accumulation kg de C/Ha/an	densité de peuplement (pieds/ha)	Accumulation kg de C/pied/an	nombre de pieds	CO2 Eq (kg)
<i>Mixed fruit trees</i>	510	475	1,074		0
<i>Arbres fruitiers</i>	3250	250	13,000		0
Absorption CO2 Eq (kg)					0
	Quantité de biomasse produite (kg/pied)	Nombre de pieds	CO2 Eq (kg)		
<i>Eugenia cariophyllus</i>	4,440		0		
<i>Litchi sinensis</i>	9,440		0		
<i>Glyricidia sp</i>	4,870		0		
<i>Cocos nucifera</i>	1,371		0		
Absorption CO2 Eq (kg)			0		

2. Restitution au sol

Fertilisants organiques

	résidus cultures	fumier	lisier	fiente	compost	résidus de distillation
<i>Quantité (t)</i>	0,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>C de la matière (t)</i>	0,206	0,000	0,000	0,000	0,000	0
<i>C restitué (t)</i>	0,023	0,000	0,000	0,000	0,000	0
<i>CO2 Eq (kg)</i>	82,7343	0	0	0	0	0

Annexe 6: Empreinte carbone de l'exploitation Type « Avec moyens _ jeune exploitation_ à dominance AFS »

ELEMENT	PUITS (Mg CO2 Eq)	SOURCES (Mg CO2 Eq)
AFS	-5.179	
AFC	0.000	
Restitution au sol	-0.5236362	
Rizières		22.0315125
Tanety		0.6894213
Combustion de paille		0
Fermentation entérique		3.1
Gestion des effluents d'élevage		0.659238
Compost		0
Energie domestique		0.117430952
Alambic		1.198
Total	-5.702397925	27.79560275
EMPREINTE CARBONE (Mg CO2 Eq)	22.09320483	

Annexe 7: Empreinte carbone de l'exploitation Type « Avec moyens_ jeune exploitation_ à dominance AFC »

ELEMENT	PUITS (Mg CO2 Eq)	SOURCES (Mg CO2 Eq)
AFS	-0.344	
AFC	-2.598	
Restitution au sol	-0.85990419	
Rizières		1.157949
Tanety		0.741764214
Combustion de paille		0.069646404
Fermentation entérique		0
Gestion des effluents d'élevage		0.0589492
Compost		0.097959
Energie domestique		0.123930952
Alambic		0.8935
Total	-3.802387952	3.14369877
EMPREINTE CARBONE (Mg CO2 Eq)	-0.658689182	

Annexe 8: Empreinte carbone de l'exploitation Type « Avec moyens_ exploitation âgée_ à dominance AFS »

ELEMENT	PUITS (Mg CO2 Eq)	SOURCES (Mg CO2 Eq)
AFS	-1.242	
AFC	-7.416	
Restitution au sol	-0.26474976	
Rizières		6.2859375
Tanety		2.14206624
Combustion de paille		0.030279766
Fermentation entérique		0
Gestion des effluents d'élevage		0
Compost		0
Energie domestique		0.095930952
Alambic		1.797
Total	-8.923086822	10.35121446
EMPREINTE CARBONE (Mg CO2 Eq)	1.428127636	

Annexe 9: Empreinte carbone de l'exploitation Type « Avec moyens_ exploitation âgée_ à dominance AFC »

ELEMENT	PUITS (Mg CO2 Eq)	SOURCES (Mg CO2 Eq)
AFS	0.000	
AFC	-7.281	
Restitution au sol	-0.0827343	
Rizières		6.762
Tanety		0.6894213
Combustion de paille		0.040373021
Fermentation entérique		3.1
Gestion des effluents d'élevage		0.0599925
Compost		0
Energie domestique		0.08994246
Alambic		0.401
Total	-7.363810483	11.14272928
EMPREINTE CARBONE (Mg CO2 Eq)	3.778918797	

Annexe 10: Empreinte carbone de l'exploitation Type « Sans moyens_ jeune exploitation_ à dominance AFS

ELEMENT	PUITS (Mg CO2 Eq)	SOURCES (Mg CO2 Eq)
AFS	-40.479	
AFC	0.000	
Restitution au sol	-0.0827343	
Rizières		37.43625
Tanety		0.7945557
Combustion de paille		0
Fermentation entérique		0
Gestion des effluents d'élevage		0
Compost		0
Energie domestique		0.110930952
Alambic		0.4592
Total	-40.56216778	38.80093665
EMPREINTE CARBONE (Mg CO2 Eq)	-1.761231131	

Annexe 11: Empreinte carbone de l'exploitation Type « Sans moyens_ jeune exploitation_ à dominance AFC »

ELEMENT	PUITS (Mg CO2 Eq)	SOURCES (Mg CO2 Eq)
AFS	-0.975	
AFC	-1.714	
Restitution au sol	-0.17970966	
Rizières		14.9298
Tanety		0.27883344
Combustion de paille		0.009612624
Fermentation entérique		0
Gestion des effluents d'élevage		0
Compost		0
Energie domestique		0.110930952
Alambic		0.2213
Total	-2.868806358	15.55047702
EMPREINTE CARBONE (Mg CO2 Eq)	12.68167066	

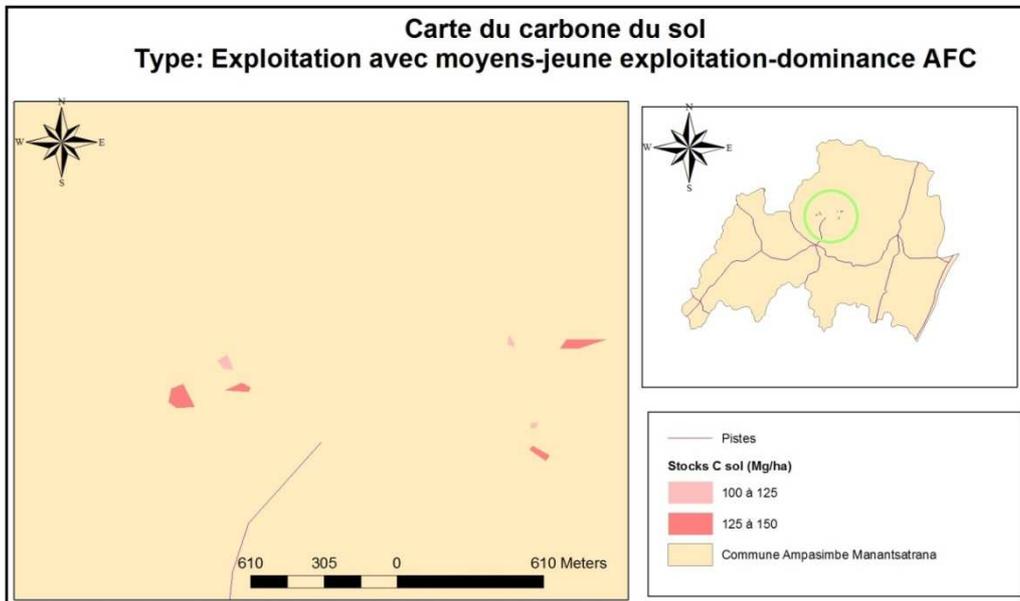
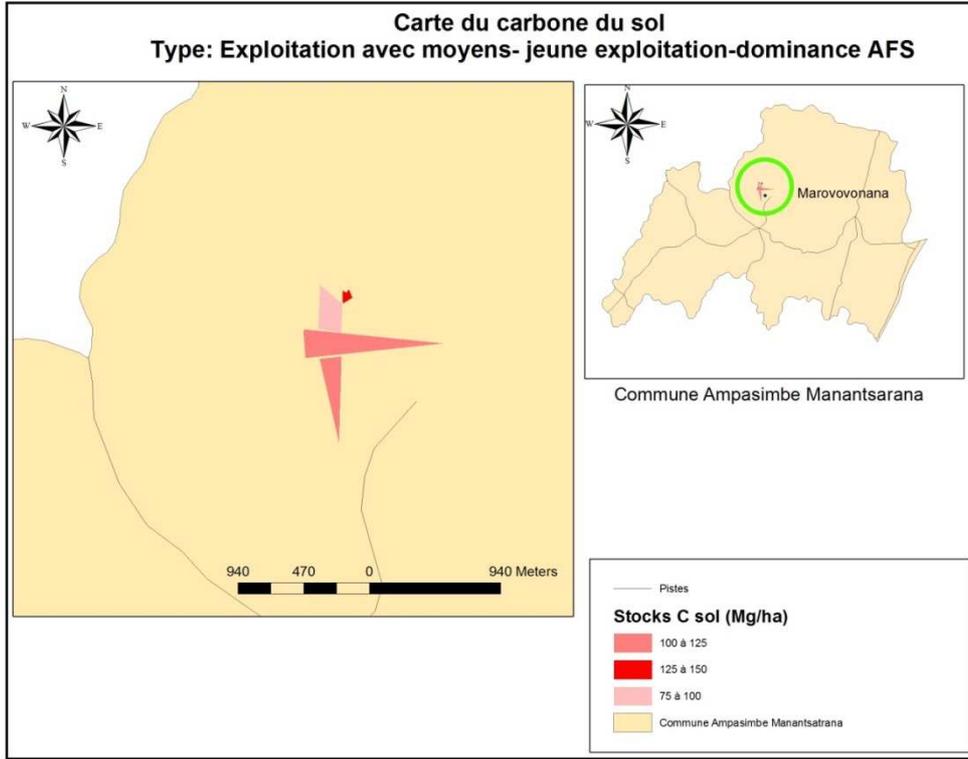
Annexe 12: Empreinte carbone de l'exploitation Type « Sans moyens_ exploitation âgée_ à dominance AFS »

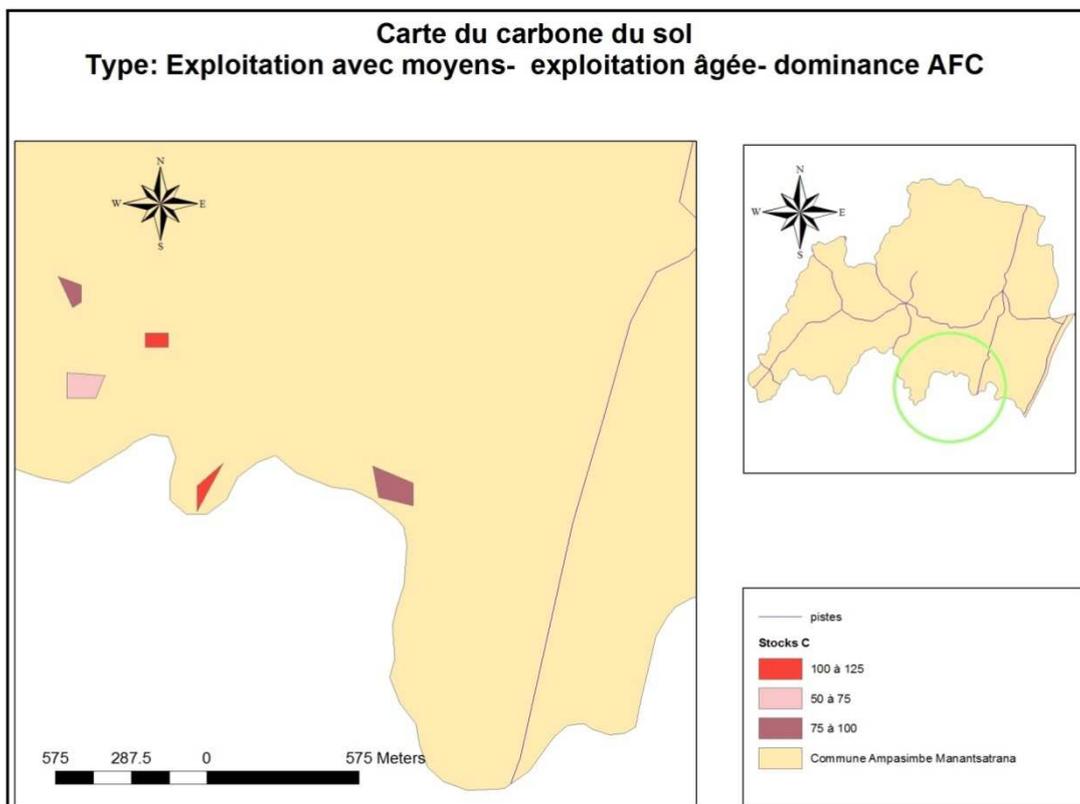
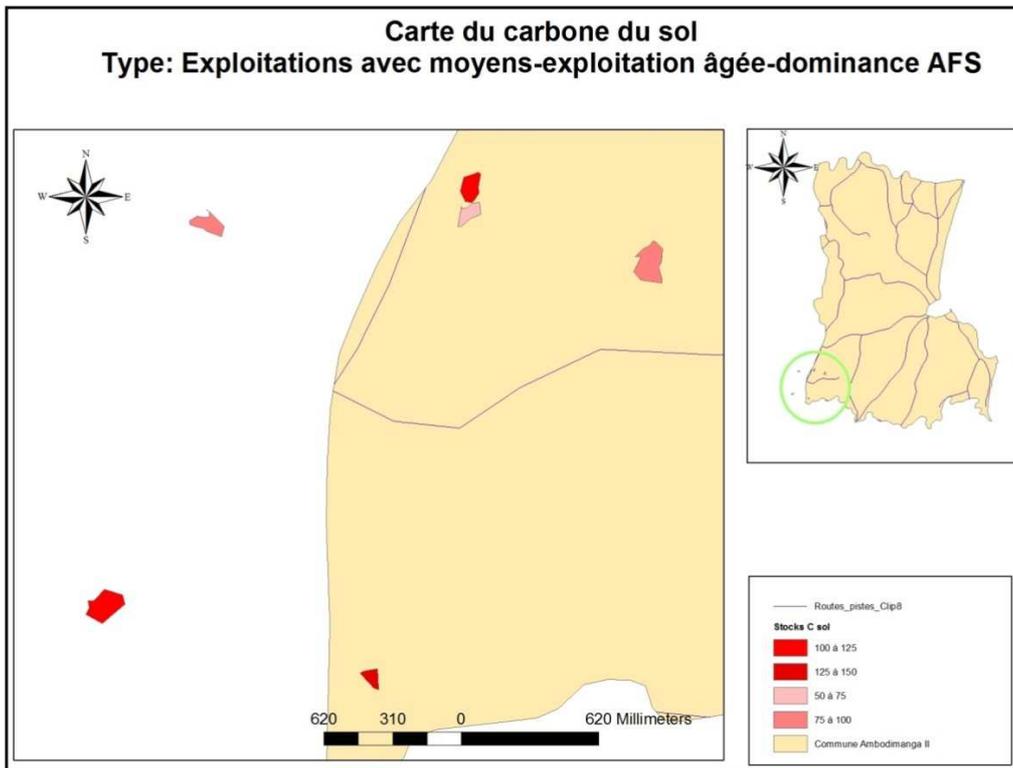
ELEMENT	PUITS (Mg CO2 Eq)	SOURCES (Mg CO2 Eq)
AFS	-0.705	
AFC	-2.317	
Restitution au sol	-0.1654686	
Rizières		0
Tanety		1.3888554
Combustion de paille		0.72548337
Fermentation entérique		3.1
Gestion des effluents d'élevage		0
Compost		0
Energie domestique		0.095930952
Alambic		0.7188
Total	-3.187971197	6.029069722
EMPREINTE CARBONE (Mg CO2 Eq)	2.841098525	

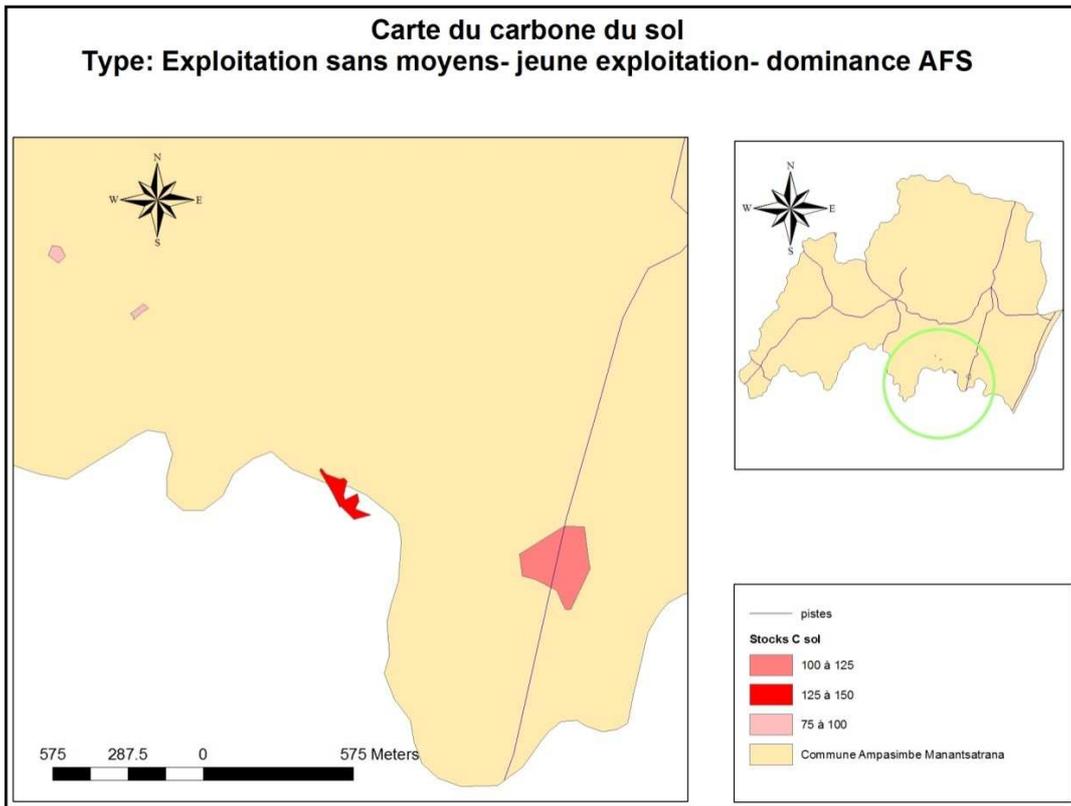
Annexe 13: Empreinte carbone de l'exploitation Type « Sans moyens_ exploitation âgée_ à dominance AFC »

ELEMENT	PUITS (Mg CO2 Eq)	SOURCES (Mg CO2 Eq)
AFS	-5.275	
AFC	-2.522	
Restitution au sol	-0.0827343	
Rizières		28.753275
Tanety		0.6944277
Combustion de paille		0.09612624
Fermentation entérique		0
Gestion des effluents d'élevage		0
Compost		0
Energie domestique		0.095930952
Alambic		0.4892
Total	-7.879592337	30.12895989
EMPREINTE CARBONE (Mg CO2 Eq)	22.24936756	

Annexe 14 : Cartes du carbone des exploitations agricoles







Carte du carbone du Type: exploitation sans moyens - jeune exploitation- dominance AFC

