



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

MEMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES
RECHERCHES

LE CARBONE DES SOLS EN MILIEUX FORESTIERS

Soutenu par : RAZAKAMANARIVO Herintsitohaina

le vendredi 19 Juin 2015

Document 1 : Synthèse des travaux de recherche

Jury :

RASOARAHONA Jean	Professeur Titulaire, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques	Président
RABEHARISOA Lilia	Professeur Titulaire, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques	Co-Directeur des Recherches
ALBRECHT Alain	Directeur de Recherche, Institut de Recherche pour le Développement	Co-Directeur des Recherches
RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostome	Professeur Titulaire, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques	Rapport interne
RAKOTONDRAOMPIANA Solofo	Professeur, Institut Observatoire Géophysique d'Antananarivo	Rapporteur externe
RAZANAKA Samuel	Professeur au Centre National de Recherche sur l'Environnement	Examineur

REMERCIEMENTS

Tout au long de la préparation de ce présent mémoire, j'ai pu remémorer des multitudes de noms, de visages, de souvenirs ... grâce auxquels j'ai pu élaborer le mémoire et dont sûrement je ne saurais lister exhaustivement. En effet, comme ce mémoire est la synthèse de tous les travaux que j'ai pu effectuer depuis la dernière décennie, différentes personnes-équipes-partenaires y ont été rassemblés et dont j'aimerais remercier infiniment ici. Mes sincères remerciement pour ces défis surmontés ensembles à la suite : des ambiances sur le terrain et au laboratoire, ces discussions-débats-échanges officiels ou dans le couloir, ces conseils-recommandations-corrections-avertissements tout au long de mon parcours ; ... ; ces moments qui ont été des fois rigolotes ou encore assez tendus, qui ont tous alimenté ma motivation à aller jusqu'à la réalisation de ce mémoire.

Plus spécifiquement, je tiens à adresser mes remerciements à :

- Madame **RABEHARISOA Lilia**, Professeur à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Directeur du Laboratoire des RadioIsotopes qui m'a grandement aidé en favorisant, de différentes riches manières, la réalisation de ce travail. Elle a codirigée ce travail de synthèse de recherche, milles merci.
- Monsieur **ALBRECHT Alain**, Directeur de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), UMR Eco&Sols. Qui a été à la fois mon mentor et mon collègue et a su me motiver et m'encourager tout au long de mon parcours. Je lui remercie aussi d'avoir accepté d'être Co-directeur de recherche
- Monsieur **RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostome**, Professeur à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques-Département des eaux et Forêts, qui a accepté d'être le rapporteur interne de ce mémoire
- Monsieur **RAKOTONDRAOMPIANA Solofo**, Professeur à l'Institut Observatoire Géophysique d'Antananarivo, qui a accepté d'être le rapporteur externe de ce mémoire
- Monsieur **RAZANAKA Samuel**, Professeur au Centre National de Recherche sur l'Environnement, qui a accepté d'évaluer ce travail
- Monsieur, **RASOARAHONA Jean**, Professeur à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, qui a aussi accepté d'évaluer ce travail et de présider le jury de ce mémoire.

Je voudrais remercier également :

- Tous les collègues chercheurs travaillant avec l'Unité de Recherche « Sols et Changement Climatique » particulièrement : **RAZAFIMBELO Tantely, ANDRIAMANANJARA Andry, RAFOLISY Tovonarivo , RABENARIVO Michel**
- Toute l'équipe du Laboratoire des RadioIsotopes : techniciens (équipe de **RAZAFIMANANTSOA Marie Paule**) et personnel administratif (équipe de **RASOARIMALALA Odette**)
- Tous les membres de l'équipe scientifique et administratif du WorkPackage 4 Carbone ; **HARINIRINA ROVA HENINTSOA Andoniaina** particulièrement
- Tous les autres collègues proches ou lointains, que ce soit du LRI, de l'IRD UMR Eco&Sols, du CIRAD UMR Eco&Sols, de l'ESSA (particulièrement **RAZAFIMAHATRATRA Hery**), de l'ESSA-Forêts (particulièrement, **RAMAMONJISOA Bruno** et **RAJOELISON Gabrielle**)
- Tous les étudiants qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire : **Ramifehiarivo Nandrianina, Grinand Clovis, Ramboatiana Nantenaina, Randevoson Finaritra, Razakavololona Ando, Rakonarivo Sarobidy, Andriampiolazana Manony, Randrianarisoa Jeannicq, Zafindrabenja Anatole, Andriamihaja Misalalaso**
- Tous les partenaires de recherche : GRENE-ISSED Université de Tamatave, CTHT, ONE, la grande famille de p4ges project, programme PARRUR, ...
- Mes autres collègues qui ne sont pas forcément scientifiques, amis qui ont chacun contribué à la réalisation de tous les travaux et projets ayant convergé au présent mémoire et qui sont aux niveaux locaux, nationaux et internationaux.

Sans oublier également :

- Dada et deux Neny, pour tout ce qu'ils ont fait depuis mon existence et jusqu'à maintenant, leurs soutiens et appuis dans leurs manières, dont je ne saurais décrire et exprimer

- mes frères et sœurs, beaux-frères et belles sœurs, nièces et neveux ; au Canada et ici à Madagascar, particulièrement **SANDA Rakotonarivo** pour ces soutiens et aides incomparables

- mes amis et grandes familles du **Sekoly Alahady** , de la **Chorale TF6**, de mes **parents et mentors spirituels** pour les prières et les aides de tout genre

Avant de finir, je voudrais remercier du fond du cœur ma petite merveilleuse famille : **Hoby** mon âme-sœur sweetii vadii et mes précieux enfants **Fanilo** et **Fiadanana**. Merci pour vos amours inconditionnels, d'avoir été à la fois mes moitiés, mes co-équipiers, mes conseillers, mon tout. Merci infiniment d'avoir accepté mes absences, de m'avoir supporté pendant les moments assez difficiles, de m'avoir encouragé dans tous les moments malgré moi... Merci infiniment pour ces prières, ces soutiens, ces sacrifices et aussi ces cadeaux de tout genre incommensurable ... sans quoi je n'ai pas pu réaliser tout ce travail.

Je dédie aussi ce travail en mémoire de mes précieuses jumelles

Enfin, je tiens à témoigner ici la puissance de **DIEU** à qui, Seul, revient toute gloire

Sommaire

I. PRESENTATION SUCCINCTE DU PARCOURS SCIENTIFIQUE	1
II. SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE	5
II.1. Contextes du parcours scientifique.....	5
II.2. Première phase de la recherche (DEA 2004-2005)	7
II.2.1. Cadrage des activités de recherche.....	7
II.2.2. Les principaux résultats obtenus.....	9
II.3. Deuxième phase de la recherche (THESE 2006-2009)	11
II.3.1. Cadrage des activités de recherche.....	11
II.3.2. Les principaux résultats obtenus.....	14
II.4. Troisième phase de la recherche (2010- première moitié 2014).....	24
II.4.1. Cadrage des activités de recherche.....	24
II.4.2. Les principaux résultats obtenus.....	27
III. PERSPECTIVES : QUATRIEME PHASE DES TRAVAUX DE RECHERCHE (2^{ème} moitié 2014 à 2024) .	40
III.1. Cadrage général.....	40
III.2. Approche à adopter et principaux résultats attendus	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation schématique des activités menées lors du DEA (2004-2005) sur le développement de méthodologie pour la quantification du carbone de la biomasse aérienne de la forêt sèche de Kirindy-Morondava	7
Figure 2 : Représentation schématique des activités menées lors de la période de la thèse (2006-2009) sur la quantification des stocks de carbone des taillis d'eucalyptus sur les Hautes Terres malgaches	11
Figure 3 : Importance (en %) de chaque compartiment dans le stockage de carbone des différents modes d'usage des terres des Hautes Terres centrales de Madagascar	17
Figure 4 : Evolution des stocks de C (Mg C.ha ⁻¹) des compartiments séquestrants (racine et sol) des taillis d'eucalyptus des Hautes Terres Centrales de Madagascar avec la durée de plantation.....	19
Figure 5 : Cartes de la distribution des stocks de carbone (Mg.ha ⁻¹) des taillis d'eucalyptus de la CR de Sambaina pour les compartiments : aérien (en haut à gauche), racinaire (en haut à droite), sol (en bas à gauche), total (en bas à droite)	21
Figure 6 : Représentation schématique des activités menées lors de la période d'après-thèse (2010-première moitié 2014) sur la considération des questions en suspens après la thèse at aussi les enjeux nationaux et internationaux sur la quantification et les dynamiques spatio-temporelles du carbone	24
Figure 7 : Evolution des stocks de carbone du sol de l'Ecorégion Humide de Madagascar (en Mg.ha ⁻¹ et sur 0-30 cm de profondeur) après la conversion des forêts et suivant le modèle empirique ...	32
Figure 8 : Distribution spatiale du carbone du sol dans la région d'Antsirabe : (en haut) sur 0-30 cm et (en bas) sur 0-100 cm de profondeur	35
Figure 9 : Distribution spatiale du carbone du sol sur 0-30 cm dans l'Ecorégion humide de Madagascar	36
Figure 10 : Représentation schématique des activités prévues pour les prochaines années dans la quatrième phase du parcours scientifique (deuxième moitié 2014 à 2014)	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques des équations allométriques pour la quantification de la biomasse des plantations d'eucalyptus des Hautes Terres de Madagascar.	16
Tableau 2. Variation des stocks de carbone du sol SCS en Mg.ha ⁻¹ suivant la méthode de prélèvement	29

LISTE DES PHOTOS

Photo 1. Pédocomparateurs sur deux transects lors des prospections pédologiques dans la CR de Sambaina-Manjakandriana	20
--	----

LISTE DES ABREVIATIONS

AcNALS	: l'Académie Nationale des Arts des Lettres et des Sciences de Madagascar
AIRD	: Agence Internationale pour la Recherche et le Développement
C	: Carbone
CarSoM	: projet Carbone des Sols de Madagascar
CaSA	: Réseaux Carbone des Sols en Afrique de l'Ouest et Subsaharienne
CAZ	: Corridor Forestier Ankeniheny Zahamena
CCNUCC	: Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique
CDB	: Convention sur la Diversité Biologique
CIAT	: International Center for Tropical Agriculture
CIRAD	: Centre International de Recherche Appliquée pour le Développement
CLD	: Convention sur la Lutte contre la Désertification
CR	: Commune Rurale
CT-REDD	: Comité Technique Nationale de la REDD
DFID	: Department for International Development
ED	: Ecole Doctorale
ESPA	: Ecosystem Services for Poverty Alleviation
Ex-ACT	: Ex-Ante Carbon balance Tool
FOFIFA – DRFP	: Direction des Recherches Forestières et Piscicoles au sein du Centre National de Recherche pour le Développement Agricole
FSP-GDRN	: Fond de Solidarité Prioritaire-Gestion Durable des Ressources Naturelles
GEF	: Global Environmental Fund
GTCC	: Groupe Thématique sur le Changement Climatique
ICRAF	: World Agroforestry Center
IFS	: International Foundation for Science
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement
LRI	: Laboratoire des RadioIsotopes
MDP	: Mécanisme pour le Développement Propre
N	: Azote
NERC	: Natural Environment Research Council
P	: Phosphore
PERR-FH	: Programme de définition des lignes de références au sein de l'Ecorégion Forêts humide de Madagascar
PHCF	: Programme Holistique pour la Conservation des Forêts
REALU	: Reduction of Emissions from All Land Uses
REDD	: Réduction des Emissions issues de la Déforestation et de la dégradation des Forêts
RothC	: Rothamshed model
SCAC	: Service de Coopération et d'Action Culturelles
SCS	: Stock du Carbone organique du Sol
UMR Eco&Sols	: Unité Mixte de Recherche Ecologie Fonctionnelle & Bio-géochimie des sols & des Agro-écosystèmes de l'IRD
VOC	: Voie Oxalate de Calcium
WFC	: World Forest Congres

I. PRESENTATION SUCCINCTE DU PARCOURS SCIENTIFIQUE

C'était en 2005, au cours de mon stage de DEA en « Foresterie, Développement et Environnement » auprès de l'ESSA-Forêts et en collaboration avec la Coopération Suisse que j'ai débuté ma carrière de chercheur dans la thématique principale du rôle de la foresterie et des sols en milieux forestiers dans le cadre du changement climatique. Certes, à ce tout début, le carbone du sol était moins présent mais ça m'a quand même permis de développer les premières réflexions sur la quantification du carbone des forêts ainsi que le besoin de considérer les autres compartiments de carbone en forêts.

A noter que durant le DEA, j'ai exercé en parallèle un travail au poste d'assistante technique nationale auprès d'un projet Fond de Solidarité Prioritaire-Gestion Durable des Ressources Naturelles (FSP-GDRN) de la Coopération Franco-Malgache au sein du Ministère de l'Environnement et au cours de laquelle j'ai pu rester dans les couloirs du changement climatiques, de la foresterie et de l'environnement. Aux termes de ce projet (dernier trimestre 2006), le soutien apporté par mon superviseur professionnel d'alors a fortement facilité l'obtention d'une bourse de thèse auprès du Service de Coopération et d'Action Culturelles (SCAC) auprès de l'Ambassade de France à Madagascar. Cette bourses permettait de prendre en charge mes séjours en France à Montpellier auprès de l'Institut de Recherche pour le Développement- l'Unité de Recherche Séquestration de Carbone ou UR SeqBio (actuellement devenu l'Unité Mixte de Recherche Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des sols & des Agro-écosystèmes ou UMR Eco&Sols ; dirigée par J.L. Chotte). La thématique sur le carbone - les plantations de taillis d'eucalyptus - caractérisation spatiale étant déjà été plus ou moins définies grâce à des échanges avec les chercheurs de l'IRD, dont C. Feller, représentant de l'IRD à Madagascar à l'époque, et A. Albrecht, un futur représentant de l'UR SeqBio à

Madagascar. L'obtention de la bourse du SCAC m'a, par la suite, augmenté mes chances pour gagner une bourse de soutien pour le déroulement d'une thèse auprès de l'IRD ; il s'agit d'une bourse complémentaire pouvant couvrir mes séjours à Madagascar et aussi une partie du fonctionnement de la thèse. J'ai donc pu effectuer les travaux de recherche en collaboration avec le FOFIFA-DRFP et ces travaux m'ont permis de montrer l'importance du compartiment sol des écosystèmes forestiers de taillis d'eucalyptus en termes de quantité de carbone et aussi la teneur en carbone des autres compartiments pour l'atténuation au changement climatique.

Après la soutenance de la thèse en décembre 2009 et jusqu'à mon recrutement en Juin 2011 en tant qu'enseignant chercheur à l'Université d'Antananarivo-Laboratoire des Radio Isotopes, j'ai fait un post-doc toujours auprès de l'UMR Eco&Sols Madagascar, avec A. Albrecht. Durant cette période, j'ai travaillé sur la finalisation des publications internationales ayant fait parties de ma thèse mais aussi sur les préparations de certaines notes conceptuelles (synthèse des connaissances existantes et ouverture vers le partenariat) pour pouvoir poursuivre dans l'exploration de l'importance des sols en milieux forestiers dans l'atténuation au changement climatique ; entre autres dans le cadre de la Réduction des Emissions issues de la Déforestation et de la dégradation des Forêts (REDD+).

Une fois recruté, en valorisant les échanges et les collaborations que j'avais tissés depuis le début de mon parcours scientifique, j'ai pu mieux me fixer sur les lignes directrices de recherches sur la contribution du compartiment sol au stockage de carbone en forêts naturelles et plantées. Effectivement, de là, j'ai pu concevoir des thématiques plus précises sur : (i) la définition de la teneur et la caractérisation spatiale du carbone du sol dans la région de Didy et dans le cadre de la REDD (en collaboration avec CIAT-ICRAF du Kenya, financé par l'International Foundation for Science IFS), (ii) la valorisation et l'opérationnalisation de la

base de données sur les sols malgaches et leur environnement en vue d'une meilleure caractérisation spatiale du carbone des sols de Madagascar (en partenariat avec l'UMR Eco&Sols, financé par le Programme d'Excellence de l'Enseignement et la Recherche au Sud de l'Agence Internationale pour la Recherche et le Développement PEERS-AIRD). Plus tard, toujours grâce à l'avancé de ces échanges et collaboration, et aussi, au soutien du directeur du LRI (L. Rabearisoa) ainsi que celui des équipes LRI et IRD UMR Eco&Sols, j'ai pu concevoir et mener d'autres projets de recherche sous d'autres sources de financement (Ecosystem Services for Poverty Alleviation ESPA, La Banque Mondiale, Agence Française pour le Développement AFD à travers le projet PHCF2, ...) et aussi d'autres partenaires (Universités de Bangör, Université de Lausanne, ONG MaVoa, Conservation International, Association ETC TERRA, ...). A rappeler que toutes ces recherches résident dans les questionnements de définition de la taille de carbone des compartiments (dont, le sol au cœur) forestiers et leur environnement, de l'analyse des déterminants de stockage de carbone, de l'étude de leur dynamique temporelle et spatiale, ... ceci dans diverses localités en milieux forestiers dans toute l'île.

Par ailleurs, à part ces activités de conduite de recherche scientifique, j'ai dispensé des cours sur le changement climatique et le marché du carbone pour le troisième cycle (DEA) à l'ESSA-Forêts et récemment (depuis 2014) j'ai participé à un même genre de module pour les étudiants en M2 sur l'Environnement et la Gestion des Ressources Naturelles à l'Université de Toamasina. Depuis 2015, avec l'opérationnalisation de la formation auprès de l'Ecole Doctorale « Agriculture, Elevage et Environnement », je suis aussi responsable d'un certain nombre de modules. Une autre forme de d'enseignement que j'ai assuré avec l'équipe du LRI et l'IRD UMR Eco&Sols aussi est la réalisation d'Ecole thématique sur les sols et leur service

écosystémique. Parallèlement à ces cours théoriques, j'ai encadré des étudiants nationaux et internationaux sur les thématiques du carbone en milieux forestiers pour l'obtention de leurs diplômes d'Ingénieur, en M2 ou en préparation de leur doctorat.

En outre, à part le fait que je suis membre de l'Unité de Recherche Sols et Changement Climatiques (dirigée par T. Razafimbelo) auprès du LRI, je suis aussi intégrée dans différents réseaux et plateformes œuvrant dans les thématiques du changement climatique, le sol et les forêts ; entre autres : le Comité Technique Nationale de la REDD (CT-REDD), le Groupe Thématique sur le Changement Climatique (GTCC), les réseaux Carbone des Sols en Afrique de l'Ouest et Subsaharienne (CaSA), le groupe de travail restreint de ESPA traitant le sol (ESPA Soil Working Group). Enfin, depuis 2013, toujours grâce au support du directeur du LRI, je suis devenue membres correspondantes de l'Académie Nationale des Arts des Lettres et des Sciences de Madagascar (AcNALS).

II. SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE

II.1. Contextes du parcours scientifique

Les activités scientifiques que j'ai effectuées tournent principalement autour des enjeux du changement climatique à Madagascar et de certaines thématiques qui peuvent s'y atteler dans le secteur forestier, à l'instar du stockage de carbone (C). Plus spécifiquement, elles partent du fait que : les forêts, notamment tropicales, seraient des écosystèmes qui ont une grande influence sur le cycle du C et du climat global ; ceci, en raison de leurs grands réservoirs de 652 gigatonnes de carbone (Gt C) pour la végétation et 1 500 à plus de 2 000 Gt C pour le sol (jusqu'à un mètre de profondeur) (FAO, 2001 ; IPCC, 2007) et aussi leur capacité de fixer (fonction puits) ou de libérer (fonction source) le C stocké. En outre, à part la fonction de régulation du climat, ces activités tiennent aussi en considération des autres fonctions des ressources « Forêts » et « Sols », entre autres : la production, la protection et le social. Dans tous les cas, elles se penchent majoritairement sur la ressource Sol suite à la rareté de leurs études et aussi aux recommandations internationales (IPCC, 2006)) de devoir considérer tous les compartiments susceptibles de stocker du C ; à savoir : aérien, litière, bois mort, racine, matière organique du sol.

Dans ce sens, tout au long des phases d'exercices de mon métier de chercheur, mes activités pourraient être cadrées dans les défis internationaux portant sur : le changement climatique (Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique-CCNUCC), la dégradation des terres (Convention sur la Lutte contre la Désertification-CLD) et la sécurisation alimentaire (inclus dans la Convention sur la Diversité Biologique-CDB). En termes d'initiatives internationales et nationales, ce sont donc des activités se cadrant dans le développement ou la mise en œuvre : du Mécanisme pour le Développement Propre- MDP, la

Réduction des Emissions issues de la Déforestation et de la Dégradation des forêts-REDD+, et la Réduction des Emissions issues de tous les modes d'usage des terres REDD++.

Ainsi, plusieurs thématiques et questionnements de recherche ont été considérés et qui peuvent être résumés comme suivent :

- En termes de taille : (i) quelle est la quantité de carbone (en termes de stock de C à l'unité de surface – en ha) renfermées par les écosystèmes forestiers malgaches ?; (ii) Quelles sont leurs variabilités ?; (iii) Compte tenu des contextes malgaches (richesse bio-pédo-climatique) Quelles seraient les méthodes appropriées (lors des prélèvements sur le terrain et des calculs)
- Les divers compartiments (à savoir : l'aérien et le racinaire de la végétation (biomasse), la litière, la matière organique du sol, les bois morts) sont-ils d'une même importance en termes de contribution à ces quantités mesurées ?
- Quels sont les effets modes d'usage des terres existants en milieux forestiers à Madagascar, dans le cadre de la rente C (MDP et REDD+) ?
- Quels sont les devenir des stocks de C mesurés par compartiment suite à ces changements d'usage des terres (trajectoires de la dégradation ou de la restauration des écosystèmes forestiers)?
- Quels sont les facteurs déterminants qui influencent et contrôlent ces quantités de C mesurées ; sont-ils les mêmes (type, nature et importance relative) pour tous les compartiments et aussi pour toute échelle d'étude ?
- En termes de modélisation: (i) quels modèles pour prédire les quantités de C d'un compartiment ou de tous les compartiments, ceci compte tenu de leurs variabilités et des complexités rencontrées? ; (ii) compte tenu des déterminants de stockage, quels modèles appropriés pour détecter le changement de ces stocks dans le temps et dans

l'espace en conséquence aux changements d'usage des sols et aussi des variabilités des facteurs pédoclimatiques ?

- Quels systèmes d'informations (incluant l'ingénierie et les aspects géographique et spatial) à instaurer afin d'archiver et exploiter au mieux ces données pédologiques et données sur le C pour une meilleure prise de décision à l'égard d'une bonne gestion des ressources « Sols » et de leur environnement?

En bref, mon parcours de recherche peut être divisé en quatre phases distinctes, selon ce qui vont être décrites dans les pages ultérieures: (i) la phase correspondante à l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA 2004-2005), (ii) la phase de conduite de la thèse de doctorat (DOCTORAT 2006-2009), (iii) la phase après-thèse (APRES THESE 2010-première moitié 2014), (iv) la phase en relation avec les perspectives (PERSPECTIVES deuxième moitié 2014 à 2024).

II.2. Première phase de la recherche (DEA 2004-2005)

II.2.1. Cadrage des activités de recherche

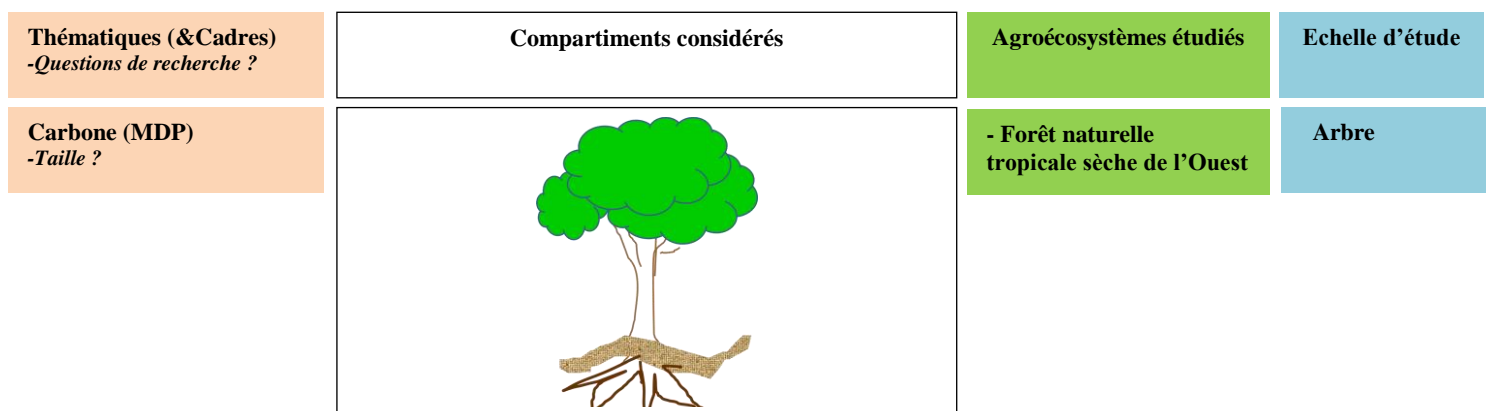


Figure 1 : Représentation schématique des activités menées lors du DEA (2004-2005) sur le développement de méthodologie pour la quantification du carbone de la biomasse aérienne de la forêt sèche de Kirindy-Morondava

Le schéma conceptuel présenté à la [Figure 1](#) résume les activités menées lors de cette première phase.

Dans cette première période, l'objectif principal était de contribuer à la connaissance des quantités de carbone des forêts denses sèches du Menabe central (région de Morondava), notamment de la forêt de Kirindy. Les compartiments considérés à travers les mesures directes assez simplifiées étaient : (i) la partie aérienne de l'arbre (feuille, branche, tronc) ou la biomasse aérienne; (ii) la partie racinaire de l'arbre (sans catégorisation des racines creusées sur 1m² jusqu'à une profondeur maximale de 75 cm) ou la biomasse racinaire ; et (iii) la litière.

Plus spécifiquement, les objectifs étaient d'abord de pouvoir développer des équations allométriques locales permettant de quantifier le stock de C des compartiments cités ci-dessus et à travers les mesures directes via abattage et de pesage d'arbres ; ceci en comparaison avec les équations allométriques standards internationaux, entre autres : celle de [Brown¹ \(1997\)](#) pour la biomasse aérienne et celle de [l'UNESCO² \(1979\)](#) pour la biomasse racinaire. Par la suite, il s'agissait de la valorisation des données d'inventaire déjà avancées sur la forêt de Kirindy pour évaluer les stocks de C sur une unité de surface ; des données catégorisant les classes de diamètre des arbres en cinq (5) classes³. Afin d'atteindre ces objectifs, les coupes et pesées des compartiments de la biomasse ont été faites sur dix (10) espèces dominantes avec des diamètres de 1-5 et 10 cm de cette forêt, combinées aux pesées des litières (sur 1m² de

¹Equation allométrique de Brown (1997) pour l'estimation de la biomasse aérienne : $Y = 10^{[-0.535 + \log_{10}(g)]}$ avec Y : la quantité de biomasse par arbre (en kg), et g : la surface terrière de l'arbre (en cm²)

²Equation allométrique de l'UNESCO (1979) pour l'estimation de la biomasse racinaire : $Y = 0,0264 (D^2 H)^{0.775}$ avec Y : poids de matières sèches des racines (kg), D : diamètre à 1,3 m (cm), H : hauteur de l'arbre (m)

³Les cinq classes de diamètre des arbres dans la forêt de Kirindy : [5-10 cm], [10-20 cm], [20-30 cm],[30-40 cm],[> 40 cm]

surface) et aussi aux analyses au laboratoire auprès du FOFIFA Tsimbazaza pour la détermination des poids secs de ces compartiments et aussi de leurs éventuelles teneurs en C.

Ces activités ont été menées sous la coordination des enseignants chercheurs de l'ESSA-Forêts et ont été appuyées financièrement par la Coopération Suisse-principal partenaire de l'ESSA-Forêts.

II.2.2. Les principaux résultats obtenus

A partir des poids d'échantillons d'arbre sur terrain, différents tests pour l'établissement de meilleurs modèle allométrique en comparaison aux modèles standards internationaux pour la prédiction des poids secs des biomasses aérienne et racinaire ont été réalisés. Ces modèles locaux sont tels que :

Pour la biomasse: $Y = 10^{3,11444 + [0,742047 * (\log_{10}(g))]}$

Pour la biomasse racinaire : $Y = 0,0186 (D^2 H) 0,8509$

Avec comme caractéristiques des variables Y : la quantité de biomasse par arbre (en kg), et g : la surface terrière de l'arbre (en cm^2), D : diamètre à 1,3 m (cm), H : hauteur de l'arbre (m) ; et aussi comme caractéristiques des paramètres tels que : des $p-values < 0,000001$ et un r^2 jusqu'à de 84%.

Plus tard, une fois appliquées aux données d'inventaire, il en était sortie que :

- Pour la biomasse aérienne, les modèles local et international de Brown (1997) présentaient des différences significatives en termes de quantité de biomasse sur une parcelle (biomasse aérienne totale $45,44 \pm 2,36$ et $39,56 \pm 2,34$ $Mg \cdot ha^{-1}$ respectivement)

principalement suite à des différences significatives pour les arbres des classes de diamètres petites (< 20 cm) ;

- Pour la biomasse racinaire, les deux modèles présentent aussi une différence significative pour certaines classes de diamètres (biomasse racinaire totale $11,59 \pm 0,75$ et $8,57 \pm 0,51$ Mg.ha⁻¹ respectivement) ;
- Compte tenu des contraintes de classe de diamètre pour les arbres coupés, il serait toujours recommandé de recourir aux modèles internationaux) ;
- En considérant la biomasse de la litière qui est estimée à $23,15 \pm 0,98$ Mg.ha⁻¹, la biomasse contenue dans les trois compartiments de la forêt de Kirindy est de l'ordre de $77,21$ Mg.ha⁻¹ ;
- En termes de stocks de C, chaque compartiment (aérien, racinaire et litière) représente respectivement $22,4$; $4,01$ et $7,84$ Mg C.ha⁻¹ avec des teneurs de C respectives de $48,5$; $45,74$ et $33,89$ g C. 100 g⁻¹ de biomasse ; correspondant ainsi à un stock moyen de $33,9$ Mg C.ha⁻¹ pour la forêt dense sèche de Kirindy.

En somme, à part le fait d'avoir contribué à la connaissance exploratoire en termes de quantité de carbone de cette forêt dense sèche de Kirindy, cette première activité de recherche m'a permis de m'initier aux méthodologies d'établissement des équations allométrique pour l'évaluation des quantités de biomasse en forêts. Néanmoins, elle a permis de se rendre compte des grands défis d'une telle recherche toujours en termes méthodologiques mais aussi en termes de moyens requis afin d'obtenir de meilleurs résultats à des échelles (spatiale et temporelle) plus grandes.

II.3. Deuxième phase de la recherche (THESE 2006-2009)

II.3.1. Cadrage des activités de recherche

Le schéma conceptuel correspondant à la [Figure 2](#) présente le cadre des activités de recherche entreprises durant cette deuxième phase de mon parcours.

Durant cette seconde phase, l'objectif principal était d'évaluer les potentialités des plantations d'*Eucalyptus robusta* à stocker du C dans ces différents compartiments. En effet, à part l'importance socio-économique de ces taillis, aucune connaissance n'a encore existé sur leur importance écologique en relation avec la régulation du climat (fixation ou émission de C) et ceci est aussi important compte tenu des contextes contraignants sur la viabilité de ces peuplements d'eucalyptus. Ces contextes sont, entre autres : la conduite des taillis d'eucalyptus des Hautes Terres malgaches (durée de rotation devenant de plus en plus courte), de l'âge avancé des souches d'eucalyptus (jusqu'à plus d'un siècle, sans renouvellement des souches) et aussi de l'importante densité des rejets par souche (absence de traitement sylvicole sur la sélection de rejets).

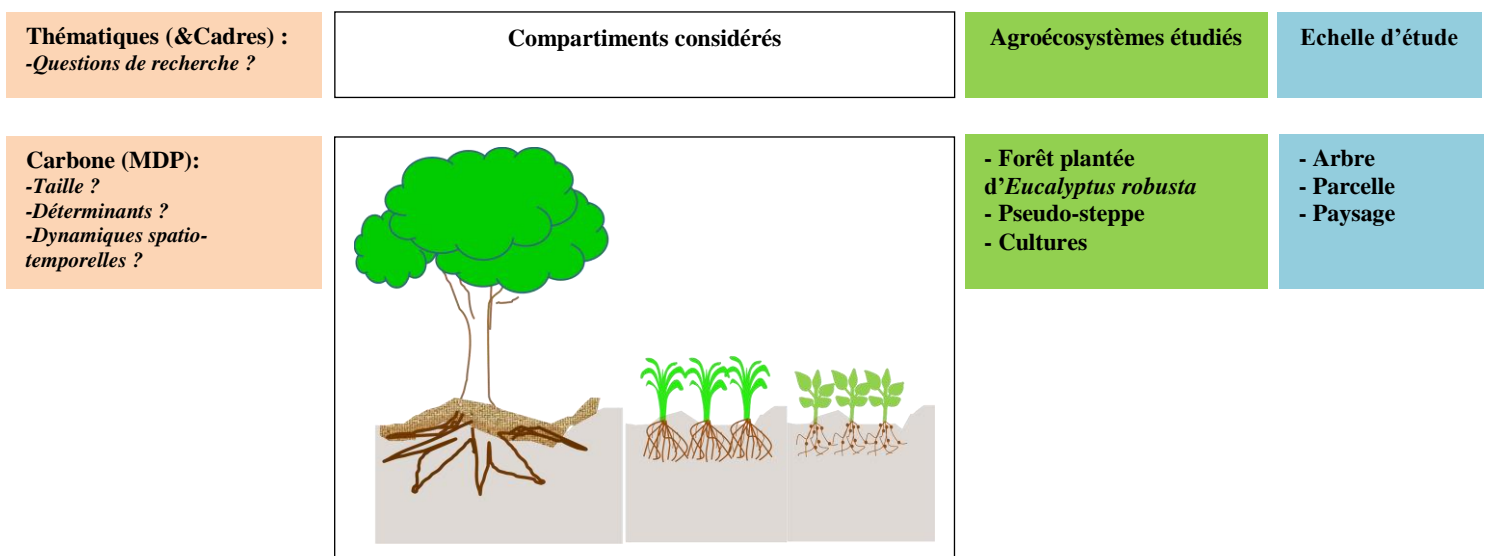


Figure 2 : Représentation schématique des activités menées lors de la période de la thèse (2006-2009) sur la quantification des stocks de carbone des taillis d'eucalyptus sur les Hautes Terres malgaches

Afin de pouvoir évaluer ces potentialités, divers compartiments de C ont été considérés (aérien, litière, racinaire, matière organique du sol) et la recherche a aussi abordé le sujet à différentes échelles ; à savoir :

- l'échelle de l'arbre où l'on peut distinguer deux catégories de compartiments :
 - les compartiments aériens de la plante qui sont non pérennes : constitués par les feuilles, les branches (qui chutent pour former la litière) et les troncs des rejets (ces derniers correspondent aux bois d'énergie, en substitution aux énergies fossiles),
 - les compartiments sous terrains dans le sol qui sont pérennes : ce sont la souche et les racines qui constituent des organes de réserve de stock de C,
- l'échelle de la parcelle où on a :
 - la densité des souches à l'unité de surface (*ha*) qui peut varier,
 - le compartiment de la litière : qui se confond avec le mat racinaire et dont une certaine quantité de C de la litière est perdue au niveau de la parcelle d'eucalyptus selon le flux de l'exportation en vue d'une valorisation en fumure organique dans les parcelles de culture,
 - le type de végétation correspondant aux modes d'usage des terres : pied d'eucalyptus, cultures non pérennes et pseudo-steppe (comme végétation originelle de référence)
 - le compartiment du sol : qui est approvisionné en C par la décomposition de la partie restante de la litière et aussi par les exsudations racinaires ainsi que la décomposition d'une partie de la biomasse racinaire après la récolte des rejets,
- l'échelle du paysage où :

- il y a exportation du C hors de la parcelle d'eucalyptus vers les villages, ce qui témoigne de la capacité de ces taillis d'eucalyptus en tant que bioénergie à éviter les émissions par la combustion des énergies fossiles,
- on rencontre la variation de l'âge des parcelles de plantation d'eucalyptus et aussi la variabilité morpho-pédologique de chaque parcelle (sous eucalyptus ou autres modes d'usage des terres).

En outre, en considérant le souhait de pouvoir évaluer l'éligibilité et l'importance des plantations forestières dans la séquestration de C contribuant ainsi à la mise en œuvre du MDP et de la rente C, les différentes mesures directes (inventaire forestier, échantillonnage des compartiments aériens et racinaires, échantillonnage des sols) ont d'abord été menée au niveau de la Commune Rurale (CR) de Sambaina dans le District de Manjakandriana. Par la suite, d'autres travaux de terrain, particulièrement ceux en relation avec le cadrage du MDP, ont été menés dans une autre CR- à Sadabe (toujours dans le District de Manjakandriana) qui présentait un front d'afforestation, très intéressant pour l'exercice d'évaluation des potentiels d'évitement.

Les activités lors de cette phase ont été menées en étroite collaboration avec le CIRAD/FOFIFA – DRFP (Direction des Recherches Forestières et Piscicoles), sous la supervision de l'IRD-Unité de Recherche SeqBio à Montpellier et à Madagascar. Les principales sources de financement pour le fonctionnement de la thèse, tous les travaux de terrain et de laboratoire ont été le SCAC Ambassade de France à Madagascar et la bourse de thèse IRD.

II.3.2. Les principaux résultats obtenus

Afin d'atteindre les objectifs escomptés, une cinquantaine de parcelles regroupant les trois modes d'usage des terres (taillis d'eucalyptus, culture et pseudo-steppe) ont été identifiées dans les deux CR parmi lesquelles, une chronoséquence de plantation d'eucalyptus (souches âgées de 17 à 111 ans) ; ceci, principalement, suite à des travaux de photo-interprétation. Toute une démarche méthodologique incluant des méthodes plus ou moins spécifiques a été déployée pour quantifier les stocks de C des différents compartiments, entre autres :

- les inventaires dendrométriques sur les parcelles d'eucalyptus avec la mesure de la circonférence à la base des souches-Cir, de la circonférence à la hauteur de poitrine de chaque rejet (CHP ou CBH) sur une souche ainsi que sa hauteur H, la prise des coordonnées (x,y) de chaque souche par rapport à son emplacement dans la parcelle de mesure (carré de 10mx10 m)
- la mise en place des *polygone de Voronoï*³ dans chaque parcelle d'eucalyptus pour la mesure directe des racines avec leur catégorisation (grosses racines à $\varnothing \geq 10$ mm, racines moyennes $10 \text{ mm} > \varnothing \geq 2$ mm), ceci, jusqu'à 1m de profondeur
- le prélèvement des litières avec la catégorisation de deux couches O1 litière de l'année (constituée par des débris végétaux facilement reconnaissable) et Of+Oh litière ancienne déjà fragmentée et humifiée (confondue avec le mat racinaire)
- les investigations sur le compartiment sol : d'une part, prélèvement d'échantillons de sol avec les cylindres jusqu'à 40 cm de profondeur afin de calculer les stocks de C à l'échelle de la parcelle. D'une autre part, prélèvement de sol jusqu'à 1 m de profondeur avec le carottier le long d'un certain nombre de transects dans divers paysages de la CR de Sambaina pour l'établissement de *pédocomparateur* qui

³ Le *polygone de Voronoï* est la surface occupée par une souche en tenant compte de sa distance par rapport aux souches voisines (Santantonio, 1977)

reconstitue la séquence verticale du profil de sol en dehors de la parcelle (important pour vérifier les types de sol et la morpho-pédologie)

- Les analyses au laboratoire incluant : l'évaluation des biomasses prélevées après étuvage, le traitement des échantillons de sol prélevés, les dosages du C du sol et les analyses classiques du sol, le passage au spectromètre au moyen infrarouge ou MIRS pour la prédiction des valeurs des propriétés du sol, les études isotopiques ($\delta^{13}\text{C}$) selon technique de traçage par l'abondance naturelle.

Les principaux résultats peuvent être regroupés dans les rubriques suivants : (i) établissement d'équations allométriques locales (*Tier 3*) appropriées aux peuplements de taillis d'eucalyptus des Hautes Terres malgaches, (ii) détermination des stocks de C des différents compartiments des modes d'usage des terres rencontrés sur la zone d'étude, (iii) de l'appréhension de la dynamique temporelle de ces stocks de C pour les compartiments pérennes à savoir racinaire et le sol, iv) l'appréhension de la distribution spatiale de ces stocks de C à l'échelle de la CR de Sambaina (principale zone d'étude) et enfin (v) les résultats exploratoires sur la rente C à l'échelle de la CR de Sadabe.

II.3.2.1. Quantification des stocks de C et analyse de leurs déterminants dans les écosystèmes de plantations d'eucalyptus :

En premier lieu, des équations allométriques appropriées aux taillis d'eucalyptus dans le contexte malgache ont été développées ([Tableau1](#)). Les éléments à retenir sont tels que : c'était la surface terrière par rejet qui exprimait le mieux la biomasse du compartiment aérien et la surface terrière à la base de la souche qui reflétait celle du compartiment souterrain (grosses et moyenne racine). Par la suite, ramenée en termes de quantité de biomasse à l'échelle de la parcelle d'eucalyptus, la biomasse racinaire totale (donc incluant les racines fines $\varnothing < 2$ mm qui ont été directement mesurées par prélèvement de sols au cylindre, en

plus des grosses et moyennes racines) varie de 82.3 to 100.9 Mg ha⁻¹. C'est la souche qui y contribue le plus avec environ 46.5 ± 3.6 Mg ha⁻¹ de cette biomasse. Pour les autres sous-compartiments, les grosses racines et les racines moyennes et fines constituent 38.2 ± 2.7 Mg ha⁻¹, 3.9 ± 0.3 Mg ha⁻¹ et 3 ± 2.5 Mg respectivement. Pour le compartiment aérien, la biomasse varie de 19.3 à 39.8 Mg ha⁻¹ et ce sont les rejets qui y contribuent le plus à cette biomasse ; avec 19.9 ± 5.9 Mg ha⁻¹ contre 4.2 ± 1.3 Mg ha⁻¹ et 4.8 ± 1.4 Mg ha⁻¹ respectivement pour les feuilles et les branches.

Tableau 1. Caractéristiques des équations allométriques pour la quantification de la biomasse des plantations d'eucalyptus des Hautes Terres de Madagascar.

Compartiments	Equation	R ²	p
Aérien	Y = 1582 x ^{0.930}	0,8	< 0.0001
Feuille	Y = 362,4 x ^{1.028}	0,85	< 0.0001
Branche	Y = 196,2 x ^{0.877}	0,7	< 0.0001
Tronc	Y = 1073 x ^{0.934}	0,76	< 0.0001
Souterrain	Y = 0.018 x ^{1.478}	0,62	< 0.0001
Souche	Y = 0.002 x ^{1.774}	0,66	< 0.0001
Grosse Racine (Ø ≥ 10 mm)	Y = 0.02 x ^{1.29}	0,56	0.0003
Racine moyenne (10 mm < Ø ≤ 2 mm)	Y = 0.034 x ^{0.736}	0,19	0.037

Y est la quantité de biomasse en kg, R² le coefficient de détermination et p la probabilité de retour au seuil de α = 0,05. Pour le compartiment aérien x est la surface terrière de tous les rejets supportés par une souche avec (exprimée en m².souche⁻¹) :

$$x = \sum_{i=1}^n (CHP_i)^2 / 4 \pi \quad (n \text{ étant le nombre de rejets par souche, } CBH \text{ la circonférence à hauteur de poitrine de chaque rejet de la souche en cm). \text{ Pour le compartiment souterrain, } x \text{ correspond à la circonférence de la souche (Cir en cm).}$$

En second lieu, considérant les autres situations de mode d'usage des terres au niveau de cet écosystème de plantations d'eucalyptus, tous compartiments confondus (aérien, racinaire, M.O du sol et litière), il a été montré que les eucalyptus présentent des stocks de C significativement élevés (au seuil de α = 0,05) avec leur stock de 150 ± 25,3 Mg C.ha⁻¹ grâce à la contribution des compartiments souterrains qui sont les racines et le sol, à part la contribution de l'arbre-eucalyptus de l'eucalyptus (44% du stock total) (Figure 3). En effet, pour les plantations d'eucalyptus, racines et sol ensemble constituent 85% du stock C du système auxquels s'ajoutent les stocks de C des compartiments aérien et de la litière (Ol)

(11% et 4% chacun, versus 1-2% et 0 % chez les autres modes d'usage). Par contre, pour les autres modes d'usage, c'est uniquement le sol qui constitue le principal compartiment pour séquestrer du C (plus de 95%).

En outre, considérant les études isotopiques sur le C du sol, l'analyse isotopique par traçage d'abondance naturelle porté sur la chronoséquence de ces taillis d'eucalyptus, il a été conclu que : i) sur le profil de 0-40 cm du sol, l'incorporation dans le sol de la matière organique issue de l'eucalyptus se limiterait en surface (sur 0-20 cm) suite à la courte durée de la rotation ; ii) les pourcentages de C apportés réellement par les eucalyptus sur cet horizon de surface sont de 58,3 et 30,5% respectivement sur 0-10 cm et 10-20 cm (le reste des pourcentages étant donc constitué par le C issu de la végétation originelle qui est la pseudo-steppe).

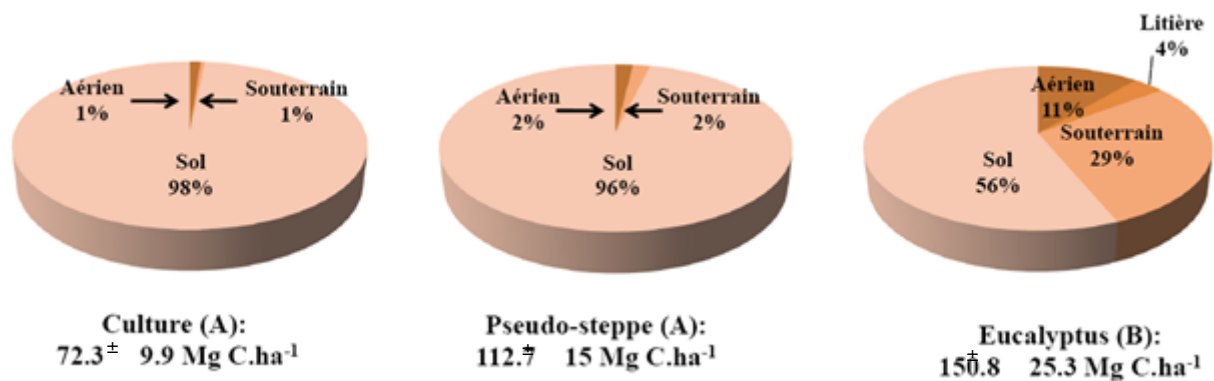


Figure 3 : Importance (en %) de chaque compartiment dans le stockage de carbone des différents modes d'usage des terres des Hautes Terres centrales de Madagascar

Par ailleurs, des méthodes statistiques multivariées considérant une multitude de variables disponibles ont été effectuées pour les analyses des déterminants. Ces variables ont été issues ; soit à partir des travaux de terrain (inventaire dendrométrique, prospection des types de sol sur le terrain via des profils pédologiques, ...), soit, à la suite des travaux de numérisation de la répartition des sols (dérivation des cartes ou données spatiales

disponibles). C'était l'arbre de régression *boosted* ou BRT Boosted Regression Tree (Friedman, 2001; Poulos et al., 2007 ; Elith et al., 2008), une forme de régression qui présente un algorithme avancé des modèles à arbre à régression en considérant tout type de variables (quantitative et qualitative) qui a donné le meilleur résultat en terme de caractérisation des stocks de C des différents compartiment en taillis d'eucalyptus. En somme, les modèles de caractérisation retenus par compartiment sont comme suit:

- Pour le compartiment aérien $C_{bg} = f(\text{Slope}, \text{CBH}, \text{Age2}, \text{Stocking2})$
- Pour le compartiment racinaire $C_{bg} = f(\text{NhaCir}, \text{Altitude}, \text{Age1})$
- Pour le compartiment du sol $\text{SOC} = f(\text{Altitude}, \text{Slope}, \text{Age1})$

Avec : **Cir**- circonférence à la base des souches, **CBH** : circonférence à hauteur de poitrine des rejets, **Stocking1** : nombre de souches à l'ha, **Stocking2** : nombre de rejets à l'ha, **NhaCir** : produit entre les circonférences et la densité des souches à l'ha, **Altitude** : altitude au niveau de la parcelle, **Slope** : pente au niveau de la parcelle, **Age1** : âge de la plantation/des souches, **Age2** : âge des rejets

II.3.2.2. Dynamique spatio-temporelle des stocks de carbone dans les taillis d'eucalyptus

L'étude du devenir des stocks de C mesurés s'est focalisé sur les compartiments pérennes sur les parcelles de taillis, à savoir les souches-racines et le sol, comme le compartiment aérien (et aussi de la litière) serait un compartiment neutre (Mathews, 2008). Ainsi, les différences de stocks de C (ΔC) entre les compartiments racinaire et sol des plantations d'eucalyptus et leur système originel (pseudo-steppe) ont permis de connaître les points suivants (Figure 4) : i) Il existe une relation entre l'accroissement du stock de C des racines et la durée de plantation correspondant à un gain net de C pour ce compartiment ; ii) malgré une tendance générale avec la durée de plantation, les stocks de C dans le sol ne sont pas corrélés significativement

avec cette durée de plantation; iii) Jusqu'à environ 55 ans après leur mise en place, les plantations d'eucalyptus ont des stocks plus faibles en comparaison à ceux des pseudo-steppes ($\Delta C < 0$);

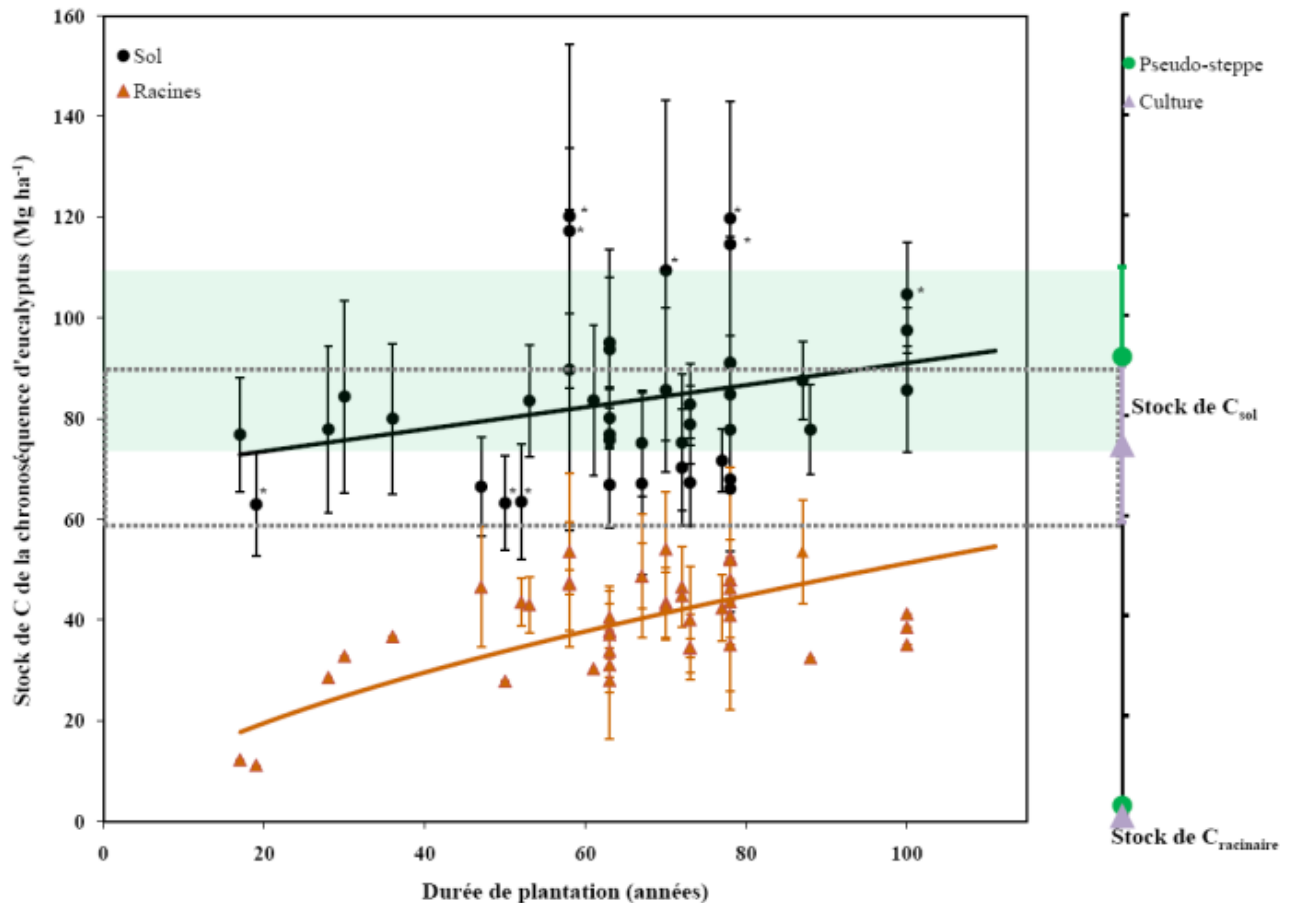


Figure 4 : Evolution des stocks de C (Mg C.ha⁻¹) des compartiments séquestrants (racine et sol) des taillis d'eucalyptus des Hautes Terres Centrales de Madagascar avec la durée de plantation.

En outre, afin de pouvoir caractériser la distribution spatiale des stocks de C des différents compartiments des taillis d'eucalyptus, les cartographies de la végétation et du sol de la CR de Sambaina ont été effectuées. Ces étapes ont fait appel aux analyses des données et des imageries satellitaires disponibles et/ou accessibles et aussi aux divers travaux de terrain pour les prospections pédologiques. A noter que, d'un côté, les données cartographiques correspondent principalement aux : acquis en géomorphologie et pédologie (Bourgeat et Zebrowski, 1973 ; Randriamboavonjy, 1996 ; Delenne and Pelletier, 1981 ; Riquier, 1968), un

modèle numérique de terrain -MNT, Image satellites QuickBird de 2008. D'un autre côté, les observations directes sur le terrain le long d'une dizaine de transects ont regroupé: les descriptions (jusqu'à 1m de profondeur) des sondages à la tarière et des fosses pédologiques et la constitution de pédocomparateur (Photo 1) permettant à l'identification des types de sols selon la classification de la FAO (FAO, 2006b ; FAO, 2008). A la suite de cette démarche, des types de modelés et des types de sols ont été définis et délimités, combinés aux modèles de caractérisation des stocks, on a pu aboutir aux cartes des valeurs de stocks de C des taillis d'eucalyptus (aussi bien en $Mg \cdot ha^{-1}$ que pour toute la CR) (Figure 5).

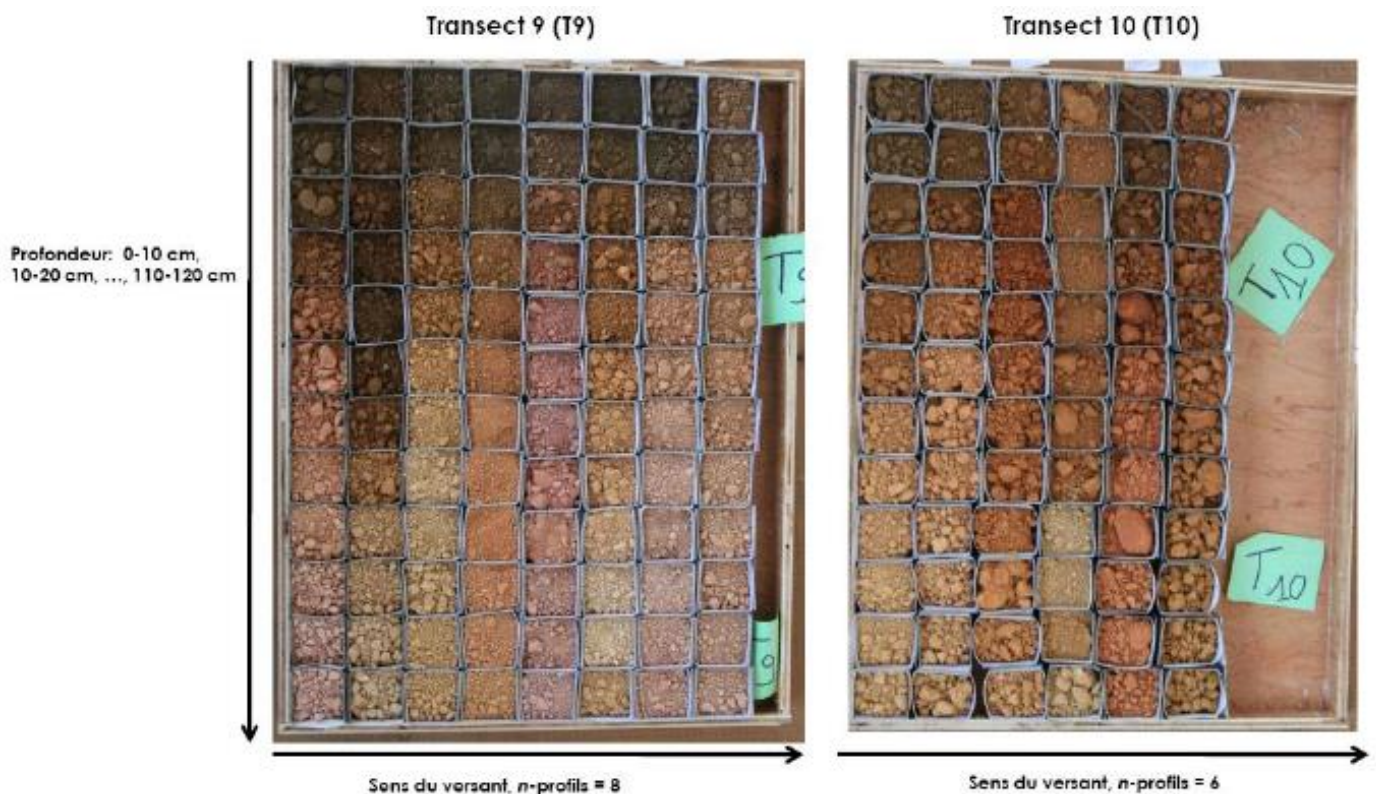


Photo 1 : Pédocomparateurs sur deux transects lors des prospections pédologiques dans la CR de Sambaina-Manjakandriana

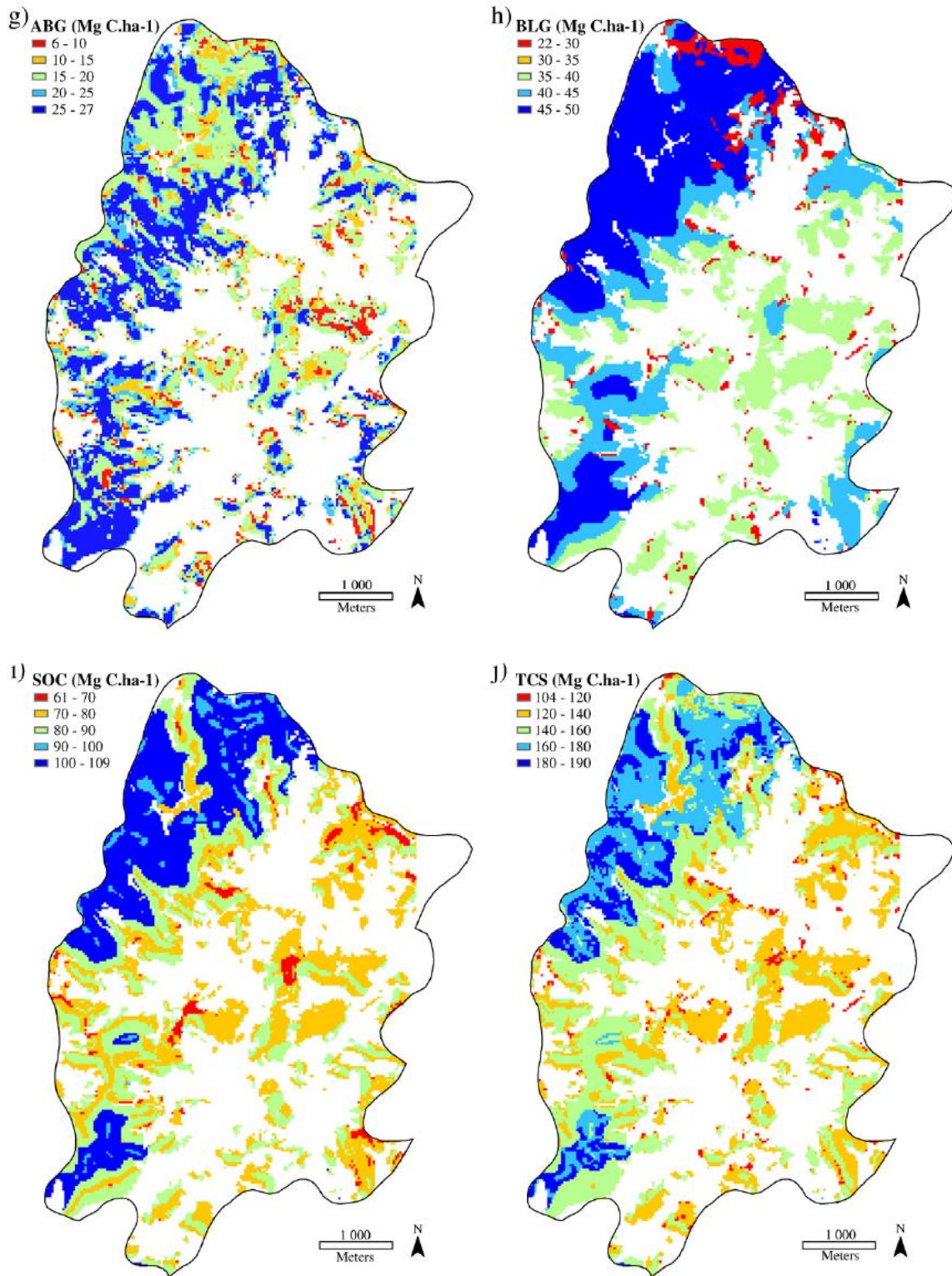


Figure 5 : Cartes de la distribution des stocks de carbone (Mg.ha-1) des taillis d'eucalyptus de la CR de Sambaina pour les compartiments : aérien (en haut à gauche), racinaire (en haut à droite), sol (en bas à gauche), total (en bas à droite)

II.3.2.3. Taillis d'eucalyptus dans le contexte de la rente carbone

Par ailleurs, en valorisant ces résultats de la CR de Sambaina aux cas de la CR de Sadabe (un front d'afforestation dans des conditions pédoclimatiques similaires à celles de la CR de Sambaina), pour le cadre du MDP, un éventuel projet de rente C a été simulé. Dans cette simulation, le projet de plantation d'eucalyptus couvre environ 1.230 ha avec une densité de 2.000 souches à l'hectare et prévu pour une durée de 60 ans (ou 30 ans renouvelable 2 fois dans le cadre d'un projet MDP. Cette durée a été déterminée principalement en raison des recommandations sur les besoins de renouvellement des souches ([Rambeloarisoa, 1987](#)) malgré leur production soutenue. En relation avec la durée de 5 ans de la rotation, la mise en place des parcelles sera effectuée pendant les 5 premières années du projet et sur 5 localités différentes dans la CR de Sadabe (superficies allant de 228 à 271 ha).

Après application des différents modèles de dynamique spatio-temporels, en considérant tous les compartiments (aérien, racinaire, sol), les stocks de C additionnel via ces nouvelles plantations pourraient atteindre 362,4 Gg C (ramené aux 1230 ha des 5 parcelles), ce qui correspond à 1342,2 Gg de CO₂. En se basant sur le prix de la tonne de CO₂ dans le cadre du projet de MDP-BioCarbonFund à Madagascar (3 \$ la tonne de CO₂), le projet à Sadabe génèrerait 4 026 628 \$ durant les 60 ans avec une moyenne de 67 110 \$.an-1 ou 134 220 872 Ar.an-1 en monnaie locale. Tout ceci démontre l'importance économique de ces taillis d'eucalyptus puisque, en plus de la fourniture de bois d'énergie, le revenu généré par le projet MDP-séquestration et évitement de C se retrouve à peu près au même niveau que le budget annuel de fonctionnement de la Commune (de l'ordre de 177 942 977 Ar ; [PSDR-UPEP, 2006](#)).

En somme, les principales conclusions de cette deuxième étape de mon parcours sont telles que : (i) des équations allométriques locales ont été développées et pourraient être valables

pour d'autres plantations de taillis d'eucalyptus au niveau international comme les résultats s'y retrouvent (Paukkonen *et al.*, 1998 ; Zewdie *et al.*, 2009) ; ii) le compartiment sol est d'une grande importance pour ces écosystèmes forestiers (de plus de 50% jusqu'à plus de 90% à lui seul) ce qui lui confère d'être incontournable pour toutes études sur la quantification du C ; ii) les cartes numériques des stocks de C, particulièrement la considération du compartiment sol pourraient s'aligner aux qualités de niveau international en raison du contenu même de leur démarche méthodologique (ayant eu comme inspiration celle de Legros, 2006)

II.3.2.4. Autres résultats

Pour finir, il est à noter que d'autres formes de valorisations de ces activités de recherche ont obtenus, entre autres :

- la formation d'un certain nombre d'étudiants : l'ingénieur à l'ESSA-Forêt de Rakotonarivo Sarobidy (2007), le DEA à l'ESSA-Forêt de Razakavololona Ando (2007), la formation des étudiants en M2 de l'Engref AgroParitech de Montpellier (au cours de leur module sur le changement climatique) ;
- la rédaction d'un certain nombre de rapports d'aspects scientifiques en relation avec l'attribution des financements de la thèse par le SCAC et aussi l'IRD ;
- la publication de trois principaux papiers scientifiques auprès de trois revues internationales, à savoir : *Bois et Forêts des Tropiques*, *Biomasse & Bioenergy*, *Geoderma*. Ces papiers ont rapporté les principaux résultats scientifiques présentés précédemment, à part l'ouvrage de la thèse en elle-même.

II.4. Troisième phase de la recherche (2010- première moitié 2014)

II.4.1. Cadrage des activités de recherche

Le schéma conceptuel de la [figure 6](#) ci-dessous décrit les activités de recherche menées durant cette phase.

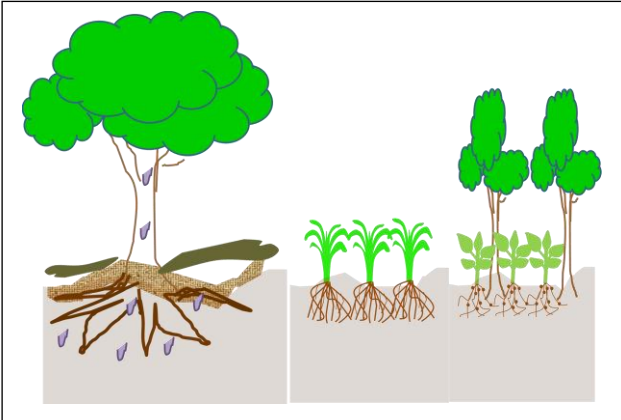
Thématiques (& Cadres) -Questions de recherche ?	Compartiments considérés	Agroécosystèmes étudiés	Echelle d'étude
Carbone (MDP, REDD+) : -Taille ? -Déterminants ? -Dynamiques spatio-temporelles ? - C profond ? Voie Oxalate de Calcium : -Existence?		<ul style="list-style-type: none"> - Forêt naturelle tropicale humide de l'Est - Forêt naturelle de l'Ouest - Forêt plantée d'<i>Eucalyptus</i> sp. - Jachères forestières - Agroforesterie - Cultures - Terres dégradées 	<ul style="list-style-type: none"> - Arbre - Parcelle - Paysage - Intercommunalité - Ecorégion Est

Figure 6 : Représentation schématique des activités menées lors de la période d'après-thèse (2010-première moitié 2014) sur la considération des questions en suspens après la thèse et aussi les enjeux nationaux et internationaux sur la quantification et les dynamiques spatio-temporelles du carbone

D'un côté, les activités entreprises lors de cette phase essayaient en même temps de reprendre les questions restées en suspens durant les deux premières phases et aussi de considérer les besoins en termes de connaissance en relation avec les cadres de l'après MDP ; dont principalement, la préparation à la mise en œuvre de l'initiative de la Réduction des Emissions issues de la Déforestation et de la Dégradation des Forêts (REDD+) à Madagascar (Bussonet *al.*, 2009). Ceci correspond aussi aux interminables discours internationaux sur les principales sources d'émission de gaz à effet de serre dont la déforestation et de changement d'usage des terres en relation avec la conversion des forêts en milieu tropical (IPCC, 2007) ce qui confère aux forêts humides de l'Est de Madagascar tout le besoin d'attention en termes de

quantification de C en vue de l'augmentation de leur puits et/ou en vue de la réduction de leur source. D'un autre côté, mais toujours en mettant en exergue la thématique du changement climatique et aussi la ressource « Sol » en son entier, il y a eu considération des thématiques entrant dans le cadre de la sécurisation alimentaire ; donc en relation avec ce qui pourrait contribuer à l'amélioration des productivités des sols et aussi à leur durabilité.

Par conséquent, les objectifs visés lors de cette phase sont tels que : (i) la recherche d'une méthode appropriée pour la quantification du C du sol, principalement, pour les besoins nationaux (qui peuvent être aussi internationaux) en termes de connaissance du C du sol dans le cadre de la REDD ; (ii) l'approfondissement des acquis sur le devenir et la dynamique temporelle du C du sol ; (iii) dans la même foulée, l'amélioration et la considération d'échelle plus élargie dans la caractérisation spatiale du C du sol ;(iv) la quantification du C dans d'autres agroécosystèmes dans l'Ecorégion de l'Est de l'île; (v) plus loin, l'exploration du processus de la Voie Oxalate de Calcium⁴(VOC) qui serait un phénomène en parallèle avec la séquestration du C dans le sol, avec en plus, une amélioration de l'état du sol.

Afin de pouvoir satisfaire aux attentes en relation avec les objectifs susmentionnés, sont présentés ci-dessous les éléments et échelles qui viennent s'ajouter à ceux déjà décrit lors de la seconde phase du parcours de recherche, entre autres :

- à l'échelle de l'arbre : l'exploration de la VOC
- à l'échelle de la parcelle :
 - la mesure sur le compartiment du bois mort à part les autres 4 compartiments selon IPCC (2006)

⁴ La Voie Oxalate de Calcium (VOC) correspond au phénomène de biominéralisation du calcaire chez un arbre pour renfermer ce calcaire dans ces tissus végétaux avant d'être séquestré dans le sol à l'aide de certains microorganismes du sol (Braissant, 2005). Ce phénomène a déjà été rencontré chez plusieurs arbres africains et constitue une thématique de recherche qui connaît son essor (Aragno et al., 2010).

- la considération du C profond du sol, à part la profondeur standard de 30 cm, la contribution du sol profond (jusqu'à 100 cm) est aussi abordée, justement, en raison du fait que ce sont les milieux forestiers qui sont étudiés ; des écosystèmes où les racines des arbres peuvent aller en profondeur et pourrait influencer la séquestration de C du profile de sol en son entier
 - la considération d'autres agroécosystèmes présents dans les milieux forestiers de l'Est, dont l'agroforesterie et les jachères forestières naturelles
- à l'échelle du paysage : extension des zones d'étude au-delà d'une CR pour considérer tout un district ou un ensemble de CR mais aussi jusqu'à l'échelle écorégionale de l'Est.

Dans ce sens, les activités ont fait l'objet, aussi bien de projet de recherche individuelle que de projets de recherche en étroite collaboration avec l'équipe du LRI et de ses partenaires, particulièrement, l'IRD UMR Ecos&Sol. Toutefois, plusieurs partenaires constitués par des organismes et institutions (locaux, nationaux, internationaux) ont aussi permis la conception et la conduite de ces différents projets de recherche, ceci, à travers leurs appuis technique-scientifique et financier. Ces divers partenaires sont : le SCAC Ambassade de France via le programme PARRUR, l'Agence Internationale pour la Recherche et le Développement AIRD, le CIAT et l'ICRAF-Kénya, le Natural Environment Research Council et le Department for International Development, Ecosystem Services for Poverty Alleviation NERC-DFID-ESPA ainsi que les diverses Universités et organismes qui y sont associées (Bangör-UK, Belfast-UK, VUA Amsterdam, ESSA-Forêt, Conservation International Madagascar et USA, ONG MaVoa, Associations Mitsinjo et toutes les COBA dans le Corridor forestier Ankeniheny-Zahamena (CAZ), la FAO, le consortium WCS-ONE-MNP-ETC TERRA et la Banque

Mondiale, l'Université de Lausanne, le réseau de l'Afrique de l'Ouest et subsaharienne sur le C du sol ou CaSA, ...

II.4.2. Les principaux résultats obtenus

Comme présenté dans les pages antérieures, les objectifs escomptés (en relation avec la particularité de chaque projet de recherche dans lesquelles se cadraient chaque activité) ont requis la nécessité de la considération de différentes échelles et localités d'étude. Dans ce sens, plusieurs zones de l'Ile (majoritairement dans l'Est en relation avec la mise en place de la REDD+ à Madagascar) ont été investigué, entre autres : les régions de Didy, de Fénérive Est et d'Antsirabe ; le Corridor forestier Ankeniheny-Zahamena-CAZ ou encore toute l'Ecorégion Humide de l'Est.

Plusieurs travaux de terrain incluant l'étude de la végétation (inventaires forestiers) et les prospections des sols ainsi que leur prélèvement ont d'abord été effectué par les équipes ponctuelles du LRI ; ceci, en fonction des moyens (humain, matériel et financier) qui pouvaient être alloués par chaque projet de recherche. D'importants travaux de laboratoire ont par la suite eu lieu, déployant une grande majorité des moyens matériels et surtout moyen humain auprès du LRI et de ses partenaires ; pour enfin, faire appel aux compétences de toute une équipe de chercheurs (titulaires et collaborateurs) pour les analyses des données et les publications des résultats sous différentes formes.

II.4.2.1. Comparaison des méthodes adoptées depuis le terrain jusqu'aux calculs des stocks de carbone

a) Concernant les méthodes de prélèvements du sol

Les activités en relation avec cette partie ont été principalement effectuées dans la région de Didy. Trois méthodes de prélèvement de sol permettant de déterminer la densité apparente du sol (l'un des principaux paramètres permettant de calculer le stock de C du sol) qui sont les plus couramment retrouvés et recommandés dans la littérature ([Gifford and Roderick, 2003](#) ; [Benites et al., 2007](#)) ont été considérés, à savoir⁵ :

- le cylindre : prélèvement du sol avec des cylindres métalliques de 10 cm de hauteur et d'environ 8 cm de diamètre)
- la masse cumulative : prélèvement du sol avec une tarière adaptée, de 20 cm de hauteur et 7 cm de diamètre)
- et le pédo-transfert qui est une fonction mathématique permettant de déterminer indirectement la densité apparente du sol en considérant un certain nombre de propriétés du sol, entre autres : la teneur en carbone, la teneur en argile, la quantité de bases échangeables.

Les premiers résultats sont présentés dans le [Tableau 2](#) ; avec des différences significatives ($p\text{-value} < 0.00001$) entre les méthodes. En somme, peu importe la profondeur considérée, c'est la méthode du cylindre qui conférerait la moins de variabilité (moindre écart-type et de

⁵ Premièrement, la méthode du cylindre est la plus classique mais exigeant beaucoup d'efforts et de temps ; il s'agit de prélever le sol jusqu'aux profondeurs voulus avec l'enfoncement d'un cylindre métallique de 10 cm de hauteur et d'environ 8 cm de diamètre. Deuxièmement, la méthode de masse cumulative étant une dérivée de la méthode du cylindre avec le recours à une tarière spécifique de 20 cm et/ou 30 cm de hauteur et environ 7 cm de diamètre ; contrairement au cylindre, son utilisation demanderait moins d'effort et de temps au détriment de son coût de confection et les certaines contraintes d'enfoncement en sol durs. Enfin, la méthode de pédotransfert ne permet pas d'avoir directement la Densité apparente D_a du sol (contrairement aux deux premières méthodes) comme la tarière classique avec laquelle le sol est prélevé ne se réfère pas à un volume fixe mais est très manipulable et ne demande pas beaucoup de temps sur le terrain. Cette méthode exige donc d'abord l'estimation de la D_a à partir d'analyses des propriétés du sol (texture, C, somme des bases) au préalable.

coefficient de variation CV) même si elle montre des valeurs proches de celles de la méthode Masse Cumulative ; le pédotransfert présente toujours des valeurs de CV élevées.

Les travaux sur cette activité sont encore en cours, en collaboration étroite avec CIAT et ICRAF, et en vue d'une publication internationale dans la revue *Soil Use and Management* dans les trois prochains mois à venir.

Tableau 2. Variation des stocks de carbone du sol SCS en $Mg \cdot ha^{-1}$ suivant la méthode de prélèvement

Méthode	SCS 0-20 cm (n= 120)			SCS 0-50 cm (n= 113)		
	Moyenne	Ecart-type	CV	Moyenne	Ecart-type	CV
Masse Cumulative	55,05	26,38	0.48	110,65	38,16	0,34
Pédotransfert	54,76	44,16	0.38	111,60	43,89	0,39
Cylindre	56,55	13,48	0.24	125,94	24,02	0,19

b) Concernant les méthodes de calcul du stock de C du sol

A côté des différences de méthode de prélèvement des sols, les méthodes de calcul aussi posent soucis (Ellert et Bethany, 1995 ; Guo and Gifford, 2003) notamment lorsqu'on a à faire à différents modes d'usage des terres, réalités de la REDD+. Effectivement, un mode d'usage quelconque a de l'effet sur l'état du sol principalement la densité apparente ; ainsi, au lieu de calculer et comparer les SCS aux profondeurs fixées (*volume équivalent*), il s'avère plus judicieux de les comparer à une *masse équivalente* similaire aux modes d'usage peu importe la profondeur requise. Les activités de ce paragraphe concernent donc les études sur toute l'Ecorégion humide et au cours desquelles il a été sorti qu'il y aurait des différences significatives entre les valeurs de SCS sur 0-30 cm issues de ces deux méthodes (p value < 0,05) avec des fourchettes allant de 21 à 221 $MgC \cdot ha^{-1}$ (moyenne = 109) et 20 à 330 $MgC \cdot ha^{-1}$ (moyenne = 119) respectivement pour le volume et la masse équivalente.

c) *Concernant la détermination des stocks de C de tous les compartiments et importance du C profond du sol :*

Ces activités sont effectuées dans le CAZ et sont encore à leur début. Quatre zones d'intérêt distinguées par leur appartenance bioclimatique ont été identifiées à la suite de divers travaux de télédétection à la base de photos satellites à moyenne et haute résolutions (travaux fait en partenariat avec l'équipe de Conservation International à Madagascar et aux USA). Quatre modes d'usage des terres ont aussi été définis en tenant compte des pratiques de *tavy* dans la région Est de Madagascar et aussi des successions de végétation qui s'ensuivent : les forêts, les jachères arborées, les jachères herbacées et les terres dégradées. Néanmoins, les résultats disponibles dans deux des quatre zones d'intérêt de l'étude ont montré l'importance du C du sol et aussi la contribution assez effective du C profond (de 30 à 100 cm de profondeur). En effet, en n'ayant pu considérer que deux compartiments principaux (aérien et sol), il en est sorti que : (i) le stock de ces deux compartiments va de 257.59 ± 53.59 à 148.26 ± 32.48 MgC.ha⁻¹ respectivement sous forêts et sous les terres dégradées ; (ii) le sol pouvait contribuer jusqu'à 82% du stock total de C avec 48 % pour le sol de surface (0-30 cm) et 34% pour le sol profond (30-100 cm).

Les travaux sur cette activité sont encore en cours, en collaboration étroite avec des scientifiques de CI et en vue d'une publication internationale dans la revue *Soil Use and Management* et *Geoderma regional* dans les six prochains mois à venir.

II.4.2.2. Résultats sur les études de la dynamique temporelle des stocks de carbone

Dans ce paragraphe, on parle de différents types de modèles pour suivre l'évolution du C du sol dans le temps comme il est encore assez difficile dans les cas de Madagascar de disposer de placettes permanentes pour faire des suivis dans le temps. Les catégories de modèles sont

entre autres : les modèles empiriques (dont la construction est basée sur les mesures directes et valeurs effectives de stocks sur terrain) et les modèles ou outils standards (développés pour la plus part du temps par les chercheurs du Nord et à la base de leurs placettes permanentes).

a) Recours aux modèles empiriques

Il existe deux approches distinctes : diachronie (comparaison des résultats des mesures à deux dates différentes, donc suivie réelle d'une certaine chronoséquence) et synchronie (comparaison à une même date t les mesures sur une chronoséquence). Toutefois, par la suite de la différence de méthodes de mesure actuelle comparées à celles lors des premières études pédologiques (par l'ORSTOM vers 1970), les objectifs que l'on s'est fixé pour les études dans la région d'Antsirabe n'ont pas pu aboutir. Par conséquent, l'approche diachronique (basé sur les analyses des chronoséquence d'images satellites disponibles et appuyées par les travaux de terrain effectifs) sur les données disponibles dans l'Ecorégion Humide de Madagascar ont fait ressortir que : (i) malgré une variabilité sur les données obtenues (incarnant la complexité de la ressource Sol dans le temps et dans l'espace), la conversion des forêts en autres modes d'usage des terres impacte en la diminution du SCS qui est d'une importance en général sur les 10 à 15 premières années après la conversion ([Figure 7](#)), (ii) cette diminution qui correspond à une perte par rapport à l'état sous forêt va de 9,57 à 47,17% et elle varie suivant un certain nombre de facteurs (type de sol, nature de la conversion et de la pratique qui s'en suit, la région d'étude avec ses caractéristiques biophysiques, ...), (iii) cependant, plus loin, le calcul des facteurs d'émission⁶ n'a pas été concluant compte tenu du peu de données disponibles sur les SCS ayant permis de déceler l'impact réel de cette conversion des forêts

⁶ Les facteurs d'émission et de variation de stock de C après déforestation correspondent aux différences des stocks « sous forêt naturelle » et « sous autres modes d'usage des terres » ; ils sont souvent exprimés en delta carbone (ΔC) et sont vivement recommandés par IPCC (depuis 2006) de les établir au niveau local (Tier 3) pour les inventaires de gaz à effet de serre nationaux et communications nationales par les Parties à la CCNUCC.

(après 10 ans de conversion), mis à part l'impact des autres déterminants du SCS. Ces ΔC variaient de -10 à +15 $MgC.ha^{-1}$ pour forêt vs non-forêt en général et de -5 à +25 $MgC.ha^{-1}$ pour forêt vs jachère en général.

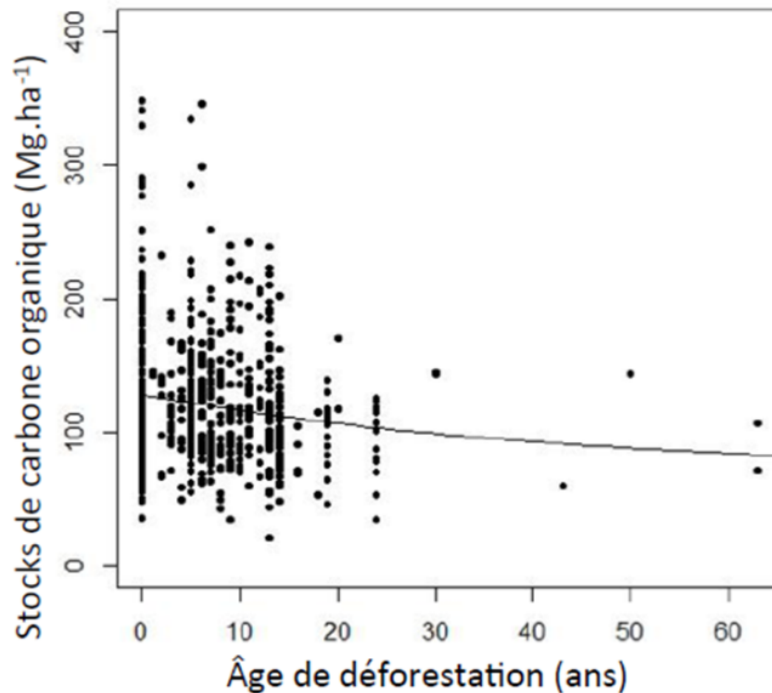


Figure 7 : Evolution des stocks de carbone du sol de l'Ecorégion Humide de Madagascar (en $Mg.ha^{-1}$ et sur 0-30 cm de profondeur) après la conversion des forêts et suivant le modèle empirique

b) Recours à l'outil Ex-ACT⁷

Cet outil qui est en fait un calculateur sous un tableur Excel compare les stocks de C fixés ou émis au cours des changements de situations (en termes de changement de surfaces en *ha* sous différents modes d'usage des terres après conversion des forêts) dans deux contextes distinctes : si on met en place le projet REDD (avec projet REDD) ou si on ne le met pas en

⁷Ex-ACT est un outil standard développé par des scientifiques auprès de la FAO (<http://www.fao.org/tc/exact/accueil-ex-act/fr/>) incluant l'un de nos collègues de l'IRD UMR Eco&Sols. C'est un outil reconnu internationalement pour sa capacité d'évaluation ex-ante du bilan C nommé « Ex-Ante Carbon balance Tool » (Ex-ACT). Il permet d'estimer par simulation la quantité de C stockée par le sol et la végétation dans le cadre de différentes initiatives internationales (REDD+, autres projets de développement socio-économique, ...) en effectuant le bilan C du projet. L'outil Ex-ACT est adapté aux politiques, programmes et projets agricoles et forestiers, sans limitation géographique et respectueuse des lignes directrices de l'IPCC en 2006 ; son application a ainsi gagné la majorité des continents.

place (sans projet REDD, la situation *Business As Usual* correspondant au niveau de référence). L'exercice a été mené dans toute l'île, en considérant les projets pilotes REDD+ mis en place depuis les années 2004 (donc incluant différents types de forêts : dense humide, dense sèches, mangrove, *tapia*, ...) et il a visé en même temps : (i) à tester l'efficacité de l'outil pour une simulation sur 30 ans, (ii) en comparant les résultats issus des deux niveaux de précision qu'il offre (Tier1 recourant aux valeurs standards donc avec un niveau de précision plus faible ; Tier2 utilisant les valeurs nationales disponibles qui donnerait un niveau de précision plus élevé)) et (iii) en essayant de voir la contribution éventuelle du C du sol (sur 0-30 cm) dans cette simulation.

Il en est sorti que : (i) la mise en place des projets REDD+ aboutit à un bilan négatif (réduction des émissions) de GES en équivalent carbone avec une part importante du compartiment sol ($\approx 60\%$ de séquestration et/ou d'évitement d'émission) par rapport au compartiment aérien de la végétation ; (ii) un potentiel de réduction d'émissions qui varie selon le type de forêt ; (iii) l'inexistence de différence des résultats obtenus entre les deux niveaux de précision (Tiers) mais quand –même avec une réduction des incertitude jusqu'à 15% de Tier1 à Tier2.

c) Recours au modèle RothC⁸

Cet autre exercice se focalise sur le devenir du C du sol dans le cadre de la REDD et en tenant compte des scénarii de continuité de la déforestation (en se basant sur l'historique de la déforestation à Madagascar) et aussi celui sur les projections climatiques à Madagascar. Il

⁸ Le modèle Rothamshed ou *RothC*, tout comme l'outil Ex-ACT, prend en considération les changements d'utilisation des terres. C'est un modèle qui se focalisent sur le processus impliquant le mouvement et les transformations de la matière en énergie et il fonctionne à un pas de temps mensuel, tout en considérant différents compartiments de matière organique qui sont caractérisés par leur nature et vitesse de minéralisation (Jenkinson et Rayer, 1977)

s'agit donc de l'étude de la dynamique du stock de carbone du sol SCS sur 0-30cm, à l'aide du modèle RothC dans les zones des 5 principaux projets-pilotes REDD de Madagascar(les mêmes que pour Ex-ACT) dont la majorité est recouverte par une forêt dense humide sempervirente. Dans ce modèle, ont été tenus en compte les paramètres qui caractérisent à la fois ce modèle et les zones en question dont la teneur en argile, la couverture du sol ainsi que les paramètres climatiques : température et précipitations.

IL en est sortie que : (i) le SCS diminue avec la perte de la couverture forestière, (ii) le SCS n'est pas très sensible aux changements climatiques simulés sur 30ans, et que le SCS est alors plus sensible à la déforestation qu'à l'augmentation de la température et à la baisse des précipitations, (iii) une baisse de SCS de plus de 75% a été notée pour l'ensemble de ces sites suites à la déforestation seule ou combinée aux changements climatiques (à peu près le même ordre de grandeur que le résultats de Ex-ACT).

II.4.2.3. Résultats sur les caractérisations spatiales des stocks de carbone

La capitalisation et la valorisation de la base de données sur les sols malgaches et leur environnement, la BDD ValSol, a aussi contribué considérablement à l'amélioration de la caractérisation spatiale des SCS à différentes échelles.

En premier lieu, les mesures et caractérisation dans la région d'Antsirabe a permis d'établir la carte du C du sol dans la région (délimitation selon la feuille d'étude de [Zebrowski et Ratsimbazafy en 1979](#)) sur 0-30 cm et 0-100 cm de profondeur. L'étude, à travers la méthode de spatialisation par unité cartographique, a confirmé la variabilité spatiale du SCS suivant le type de sol et la profondeur ([Figure 8](#)) et aussi la contribution effective du C profond en considérant toute la région (échelle 1/ 100 000) : allant de 11 à 18 Tg pour les deux profondeurs, correspondant aux fourchettes de 62 à 144 MgC.ha⁻¹ et 94 à 287 MgC.ha⁻¹ respectivement.

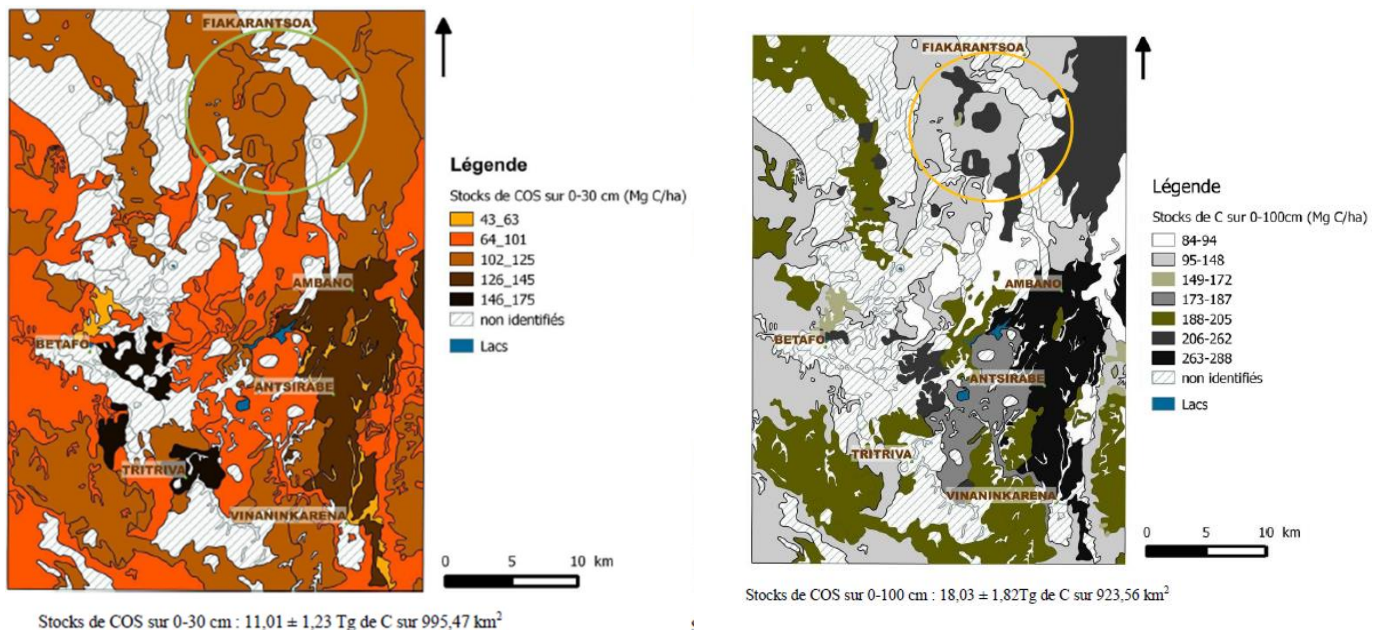


Figure 8 : *Distribution spatiale du carbone du sol dans la région d’Antsirabe : (à gauche) sur 0-30 cm et (à droite) sur 0-100 cm de profondeur*

En second lieu, l’étude portée sur l’ensemble de l’Ecorégion humide de l’Est de Madagascar a été effectué dans le cadre de la contribution de l’équipe du LRI à la définition des niveaux de référence et d’émissions de GES des forêts humides de Madagascar à travers la REDD (PER-FH) . Cette étude a eu comme démarche générale : (i) l’identification de zones représentatives pour la collecte de données sur le terrain (description de la végétation, prélèvement de sols), (ii) la collecte des données spatiales (basée sur des images Landsat 2012 avec collecte des paramètres et variables utiles au travail, comme ; l’indice de végétation et autres variables environnementales), (iii) le développement de modèle de prédiction du SCS (basé sur les données disponibles de SCS et aussi en adoptant le modèle de Random Forest⁹), (iv) la

⁹ Le modèle statistique *Random Forest* (RF) est une version améliorée des arbres de régressions classiques. Son choix s’est particulièrement basé sur les expériences du LRI et de ses partenaires (ICRAF, CIAT, IRD UMR Eco&Sols) et aussi sur les acquis des études antérieures (à l’instar de Grinand en 2010).

spatialisation du SCS par pixel (échelle 1/ 1 000 000). Les résultats (Figure 9) ont montré la variabilité spatiale du SCS : en fonction de variables biophysiques, notamment l'altitude.

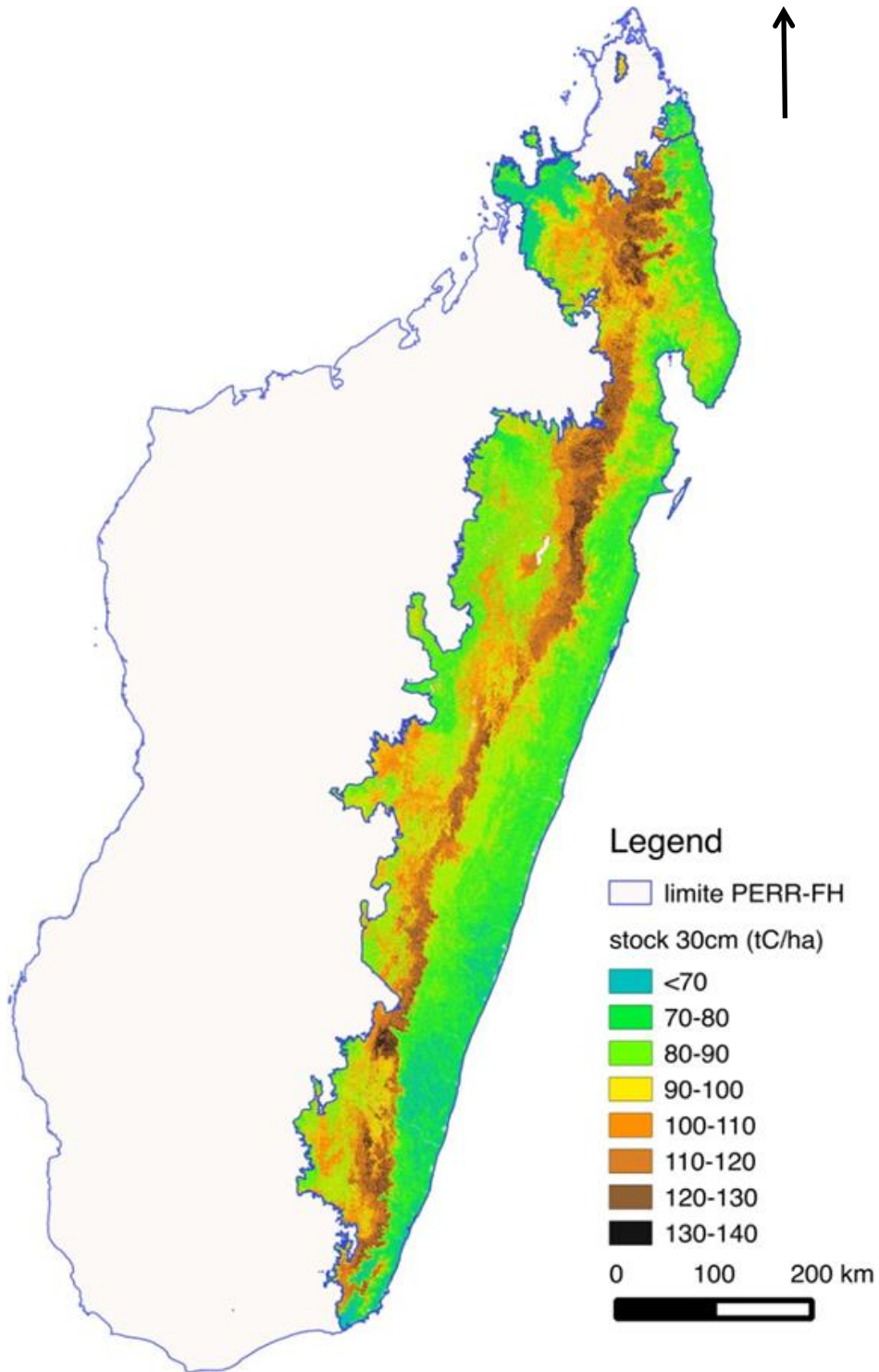


Figure 9 : Distribution spatiale du carbone du sol sur 0-30 cm dans l'Ecorégion humide de Madagascar

II.4.2.4. Considération des autres thématiques : Voie Oxalate de Calcium, nutriments du sol et vulnérabilité des sols

a) Voie Oxalate de Calcium

Suite aux analyses de connaissances sur ce phénomène (espèces potentielles et leurs écologies : sol acide, climat pas trop humide, ...) et aussi aux analyses spatiales (croisement des informations sur les espèces malgaches potentielles, leur environnement naturel et aussi l'écologie exigée trouvée dans la littérature), un listing d'une dizaine d'espèce a été établis ; sur la base duquel tous les travaux de terrain (prospection pédologique et végétale) et aussi les travaux analytiques au laboratoire (dosage du calcium dans les sols échantillonnés) ont été réalisés. Ainsi, les explorations menées dans différentes localités de l'île (Kirindy-Morondava, Sakaraha-Toliara, Ankarafantsika-Mahajanga, Foulpointe-Fénérive Est) ont aboutis à l'identification de deux principales espèces oxalogènes, à savoir : *Tamarindusindica* (FABACEAE-CAESALPINIOÏDEAE) et *Ceiba pentandra* (BOMBACACEAE). En effet, ces espèces impactent sur la qualité du sol dans le sens de leur amélioration : (i) augmentation du pH du sol de $7,2 \neq 6,4$ pour *T. indica*, $7,2 \neq 5,7$ pour *C. pentandra*, respectivement au pied de l'arbre et à 5m de l'arbre comme témoin ; (ii) augmentation de la teneur en carbonate de Ca, particulièrement pour *T. indica* (teneur en CaCO_3 : $\mu=31,83\text{g/kg}$ à 0m $\neq 1,81\text{g/kg}$ à 5m) et ceci en relation positive étroite avec le stock de C du sol.

b) Carbone, nutriments et vulnérabilité des sols face au changement climatique S

Ce paragraphe fait référence aux activités de quantification du C du sol (0-30 cm) de deux principaux modes d'usage des terres dans la région de Fénérive-Est : l'agroforesterie et la culture conventionnelles. Il a abordé en parallèle avec la mesure du C, d'une part, les

questions de la biodisponibilité des nutriments pour la plante (entre autres, l'azote N et le phosphore P) et de l'autre part, les questions sur la vulnérabilité des sols sous ces pratiques face au changement climatique (stress hydrique et/ou de la température).

Les travaux de terrain (incluant la caractérisation des sites étudiés) ainsi que les travaux au laboratoire (dosage de C, N et P et expérimentation en mésocosme pour suivre la minéralisation du C et des nutriments du sol) ont montré que : (i) les systèmes agroforestiers présenteraient des stocks plus élevés de C, N et de P par rapport à la culture conventionnelle ($77,6 \text{ Mg C.ha}^{-1}$ vs $64,23 \text{ MgC.ha}^{-1}$ et $2,6 \text{ mg NT.kg}^{-1}$; $6,4 \text{ mg P.kg}^{-1}$ vs $2,2 \text{ kgP.ha}^{-1}$) (ii) et que ce sont toujours ces systèmes agroforestiers qui seraient les plus résilients au changement climatique (moins d'émission de C et aussi de perte en N et P) ; (iii) ce sont donc des systèmes permettant à la fois à contribuer à la sécurisation alimentaire, à la restauration des terres dégradées et aussi à l'atténuation au changement climatique.

II.4.2.5. Autres résultats

A part les résultats scientifiques pointus présentés auparavant, d'autres types de résultats peuvent aussi être notés, entre autres :

- Formation d'un certain nombre d'étudiants à différents niveaux : Ingénieur de Andriampiolazana Manony et DEA Randevoson Finaritra pour le VOC, DEA de Razafindrabenja Anatole pour méthode de quantification du C du sol, Ingénieur Ramifehiarivo Nandrianina et DEA de Randrianarisoa Jeannicq et de Ramboatiana Nantenaina pour les dynamiques temporelles modèles empiriques et DEA de Andriamihaja Misalalaso et de Andrianirina Carole pour les dynamiques RothC et outil ExACT, DEA Andriampiolazana Manony pour spatialisation du C à Antsirabe,

- Guide de la quantification du C du sol à Madagascar dans CarSoM et dans CaSA : avec un doctorant Ramifehiarivo Nandrianina
- Diffusion des résultats des recherches dans différentes opportunités : 2 papiers à l'Académie Malagasy, un papier lors du conférence de Décembre 2013 Akon'nyAla (in press), les posters à différentes conférences, les papiers à WFC (WP4 et PERR-FH), ... Très récemment, deux papiers sur les résultats dans CAZ et aussi dans l'Ecorégion humide de l'Est sont publiés comme papiers complets auprès du 14^{ème} congrès mondial des forêts (<http://www.fao.org/about/meetings/world-forestry-congress>)
- Expertise scientifique dans le cadre de la REDD+
- Ecole thématique sur le Sol et leurs services écosystémiques

III. PERSPECTIVES : QUATRIEME PHASE DES TRAVAUX DE RECHERCHE (2^{ème} moitié 2014 à 2024)

III.1. Cadrage général

Compte tenu de tous les acquis et, notamment des questions de recherche à l'issu des trois premières phases de recherche, la vision sur les activités prévues dans les prochaines années à venir pourrait être résumé par le schéma conceptuel de la [figure 10](#).

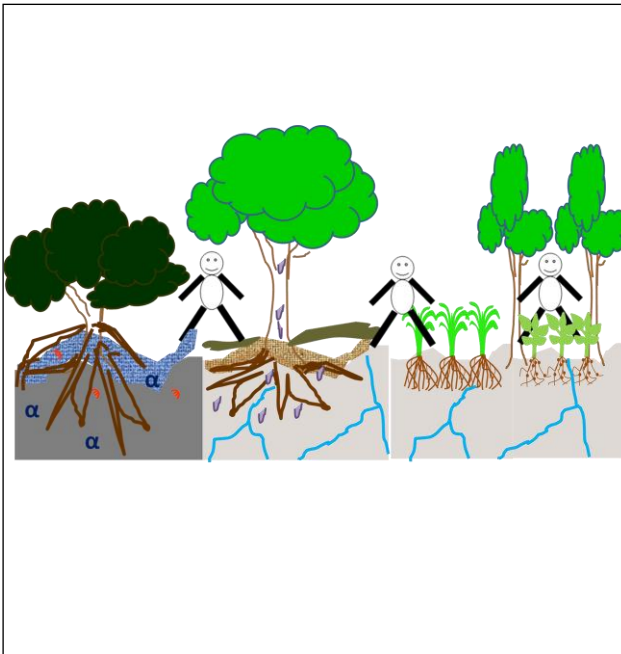
Thématiques -Questions de recherche ?	Compartiments considérés	Agroécosystèmes étudiés	Echelle d'étude
<p>Carbone (REDD+, REDD++): -Méthodologies ? - Taille ? -Déterminants ? -Dynamiques spatio-temporelles ? - C profond ? - Aspects socio-économiques ? - Innovation ? - Transfert de compétences&connaissances ?</p> <p>Voie Oxalate de Calcium : -Existence? - Déterminants ?</p> <p>Autres services écosystémiques du sol : - Hydrologie ? - Fertilité? - Biodiversité ? - Innovation ? - Transfert de compétences&connaissances ?</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Forêt naturelle tropicale humide de l'Est - Forêt naturelle sèche de l'Ouest - Forêts plantées : <i>Eucalyptus sp.</i>, <i>Pinus sp.</i>, <i>Acacia sp.</i>, Palmiers, ... - Autres formations forestières : Mangroves, Tapia, ... - Jachères forestières - Agroforesterie/pratiques Agroécologiques - Cultures - Terres dégradées 	<ul style="list-style-type: none"> - Arbre - Parcelle - Paysage - Intercommunalité - Ecorégion Est - Ecorégion Ouest - Nationale

Figure 10 : Représentation schématique des activités prévues pour les prochaines années dans la quatrième phase du parcours scientifique (deuxième moitié 2014 à 2014)

Pareillement aux activités d'après thèse (3^{ème} phase du parcours scientifique), les activités de recherche illustrées ici essayent d'une part de reprendre les questions de recherche restées en suspens et d'autre part, de considérer les besoins en termes de connaissance et de résultats

scientifiques fiables sur la ressource « Sol ». Ceci pourrait entrer dans le cadre de la préparation et/ou la mise en œuvre de la REDD+ à Madagascar mais aussi, en vue de l'intégration des réalités malgaches dans le cadre de la REDD++ ou REALU¹⁰ correspondant à toutes activités autres que la déforestation et la dégradation des forêts dans les émissions de gaz à effet de serre responsable du changement climatique. Plus loin, ces activités rejoignent les soucis internationaux en relation avec la sécurisation alimentaire mais aussi à la lutte contre la désertification et la dégradation des terres.

En conséquence, il est judicieux de rajouter et/ou d'apporter des détails aux activités antérieurement développées et ci-dessus les éléments s'ajoutant aux schémas conceptuels des phases antérieures :

- L'avancement des travaux en termes méthodologiques sera poussé : reprise des activités sur la spectrométrie en moyen Infrarouge, la capitalisation de toutes les méthodes dans la comptabilisation du C (sur terrain et dans les manières de calcul) dans le sol mais aussi en combinaison avec les 4 autres compartiments de C, ...
- D'autres agroécosystèmes seront considérés en plus de ceux qui l'ont déjà été, entre autres : les peuplements de mangrove et leurs sols organiques, les autres formations forestières (Tapia, plantations exotiques, etc.) ; et aussi d'autres types d'écorégions afin de pouvoir compléter les connaissances sur les sols des milieux forestiers de Madagascar,

¹⁰Reduction of Emissions from All Land Uses l'initiative allant au-delà de la REDD+ qui considère tous milieux et agro-écosystèmes au-delà des forêts en elles-mêmes, incluant les plantations forestières et aussi les sols organiques ; initiatives et concepts développés par ASB Partnership for the Tropical Forest Margins, ceci, depuis 2010, <http://www.asb.cgiar.org>

- La considération de la dimension sociale (aspect humain) et de la dimension économique prendrait aussi une grande part, ceci, afin d'être le mieux efficient dans les recherches effectuées.

- Le processus VOC est approfondi aussi bien à l'échelle de l'arbre mais aussi en termes de relation de l'arbre avec son environnement (le peuplement forestier et les caractéristiques pédologiques)

- A part le stockage de C et aussi la VOC, d'autres services écosystémiques que le sol pourraient offrir en milieux forestiers seront aussi considérés, à savoir :
 - l'hydrologie du sol et la lutte contre l'érosion : en relation avec la disponibilité d'eau pour les populations riveraines mais aussi en liaison avec le fonctionnement-même de l'écosystème étudié afin d'assurer leur durabilité

 - la fertilité et la productivité des sols en relation avec les activités biologiques et de la biodiversité dans le sol : aspect fonctionnel des racines, activité des faunes du sol, gestion de la matière organique du sol

- La considération de ce qu'il y a au-delà des parcelles et de l'écosystème étudiés, entre autres, tout ce qui est innovation à l'issue de toutes ces activités de recherche et aussi les transferts des connaissances et compétences acquis durant ces années de recherche.

En d'autres termes, les objectifs des activités de recherche durant cette quatrième phase rejoindraient tout ce qui est: (i) définition de la taille en termes de stock de C (sol et autres compartiments en milieux forestiers) et aussi des autres services offerts par le Sol ainsi que de leurs devenirs, (ii) analyse des déterminants de ces services écosystémiques du sol, (iii) *upscaling* ou changement d'échelle à une plus vaste étendue par rapport aux mesures réellement effectuées, (iv) relation entre les connaissances écologique, économique et social afin de contribuer à une meilleure gestion des ressources « Forêt » et « Sol » en considération des tous les niveaux (local, national et international).

Par ailleurs, atteindre ces objectifs ci-dessus demanderait encore plus de collaborations et de soutiens dans tous les aspects. Idéalement, la conduite des activités sera poursuivi avec les mêmes partenaires technique et financier présent depuis les trois premières phases du parcours scientifique ; mais, plus loin, d'autres partenaires potentiels seraient approchés (la plus part sont déjà en cours), à savoir :

- Blue Venture (Madagascar et International) et ESPA regional projects (pour tout ce qui est activités sur les peuplements de Mangrove, leur sol organique et aussi les écosystèmes marins) ;
- les autres sources de financement tel que : le Global Environmental Fund GEF- 6 en relation avec les activités sur la lutte contre la dégradation des terres et de la désertification ;
- le DFID et Royal Society à UK en relation avec les recherches fondamentales sur le sol et aussi tout ce qui est activités de formation et d'enseignement ;

- d'autres universités de UK et dans certains pays de l'Europe qui s'intéressent aux recherches fondamentales sur le Sol (à l'instar de l'University of Reading, UK) ainsi qu'aux unités d'enseignement qui pourrait être développé et conduites conjointement avec l'Ecole Doctorale Agriculture Environnement et Elevage ED-A2E ou d'autres ED et formation en Master en relation avec le LRI,
- ...

III.2. Approche à adopter et principaux résultats attendus

L'approche en générale considèrerait :

- une meilleure identification et caractérisation des sites/zones/régions d'étude lors de la mesure des tailles des thématiques abordées ; ceci fera recours de plus en plus aux approches de la télédétection sur des images à haute résolution couplées aux travaux de terrain assez explicites ;
- l'intégration de toutes les parties prenantes concernées par les ressources « Forêt » et « Sol », aussi bien, dans ces caractérisations (afin de cerner les diverses perceptions) et ces mesures sur le terrain (collecte et capitalisation des données à différentes échelles), mais aussi dans les identifications des priorités d'action et recommandations communes pour les prises de décision futures. Ces parties prenantes regroupent: la communauté locale de base, la société civile et ONG et organismes locaux-nationaux-régionaux et internationaux, les décideurs à différents niveaux (local, régional,

national, international), Cet aspect correspondra en fait à la conduite de Recherche Action Participative afin d'aboutir aux recherches pour le développement réel ;

- la considération de toutes les échelles d'étude : de l'arbre à l'échelle nationale (et aussi régionale en Afrique), en passant par la parcelle, le paysage, les écorégions et autres subdivisions territoriales ;

- l'apport de l'innovation en termes de méthodologie dans l'étude du C du sol, et après, dans l'étude des autres services écosystémiques offerts par le Sol. Ceci correspondrait particulièrement à l'harmonisation des méthodes de quantification du C ainsi qu'à leur applicabilité et utilité pour les acteurs de développement et décideurs qui ne soient pas des scientifiques. Cette harmonisation et opérationnalisation concernent la démarche méthodologique et méthodes en relation avec:
 - les travaux de terrain (en relation avec l'amélioration du fameux guide établis lors de la deuxième phase du parcours de recherche),

 - les travaux de laboratoire, entre autres : la spectrométrie au moyen infrarouge, sur les travaux d'analyses statistiques avancées en vue de l'établissement de modèles appropriés à la détermination des propriétés des sols des écosystèmes forestiers malgaches

 - les calculs par la suite de ces questionnements de recherche afin d'aboutir à un ou des standard(s) bien validé (s) dans le contexte malgache et qui pourrait, par

la suite, permettre aux communautés scientifiques de Madagascar de répondre au mieux aux exigences internationales en termes de recherche sur le sol.

De cette démarche, les principaux résultats attendus dans cette phase de perspectives seraient :

- la poursuite des formations des étudiants à différents niveaux, principalement, de niveau doctorat. A ce propos, trois sujets de thèse ont été lancés depuis la fin de l'année 2014, à savoir :
 - l'approfondissement du processus VOC (mesure de la taille, analyse des déterminants) en relation avec l'espèce forestière de *Tamarindusindica* : financé par l'Intercoopération Suisse et mis en œuvre avec l'Université de Lausanne et l'ESSA-Forêt ;
 - la caractérisation spatiale du C et aussi d'autres propriétés du sol de Madagascar en recourant aux méthodes avancées de la télédétection et aussi à la valorisation de la base de données des sols malgaches et leur environnement : financé par le projet avec l'AIRD ;
 - la définition des indicateurs de l'état de santé du sol en relation avec la REDD+ et à l'adoption des pratiques agro écologiques en considérant les perceptions des communautés de base à part la perception scientifique, ceci afin d'arriver à la conception d'outil de prise de décision pour la gestion des ressources « Forêt et Sol » : financé par le projet holistique pour la conservation des forêts-phase deux (PHCF 2) ;

- l'édition d'un certain nombre de documents, tels :
 - un « Atlas » sur les sols de Madagascar et leurs services écosystémiques ; ce serait un élément d'utilité scientifique mais surtout de capitalisation de tous les acquis sur les recherches pédologiques à Madagascar ;
 - un guide amélioré synthétisant les démarches méthodologiques sur les quantifications du C et des autres services offerts par le sol ;

- L'élaboration et l'opérationnalisation d'un certain nombre d'outils scientifique simples pour rendre utile à un certain public cible (acteurs de développement, décideurs à différents niveaux) les résultats de la recherche, tels :
 - Boite à outils permettant l'évaluation des services offerts par les sols et aussi les fameux *facteurs d'émission* tant demandés au niveau international. En fait, ce serait en quelque sorte une extension ou adaptation de l'outil Ex-ACT aux contextes et attentes malgaches (comme ce que l'équipe du LRI est actuellement en train de concevoir avec l'une de ses doctorantes Rakotovao Narindra, sur l'empreinte C) mais qui intégreraient tous les aspects en relation avec la gestion de cette ressource « Sol » ainsi que leur environnement,
 - Logiciel ou programme informatique en relation avec les études des spectres des sols et leurs éventuelles standardisations pour des études quantitative et qualitative du sol, pour la détermination d'un certain nombre de propriétés du

sol (carbone, densité apparente, nutriments du sol comme l'azote et le phosphore, l'eau-hydrologie du sol, biologie du sol, ...); ceci, au profit des diagnostics agricoles rapides, de programmation d'aménagement d'un territoire ou d'une région, ...

- La production d'un certain nombre de films documentaires (court et moyen métrage) capitalisant les acquis des recherches et aussi la conception de modules en *E-learning*, idéalement, pour des valorisations aussi bien locale-nationale qu'internationale. A ceci s'ajoute les organisations de différentes Ecoles Thématiques (en relation avec les thématiques développées par l'équipe du LRI et ses partenaires) et les *Field School* qui combineront en même temps les cours théoriques en grandeur nature et les travaux pratiques corollaires de ces cours.

Enfin, il serait bien de noter que, à part les publications et communications scientifiques au niveau international, le principal aboutissement serait la convergence de toutes ces activités de recherche qui sont et seront menées dans plusieurs localités et régions de Madagascar vers une synergie pour assurer des actions de plaidoyer au bénéfice des ressources « Sol » et « Forêt » pour le bien-être de l'homme, correspondant à une meilleure interface entre la science et la politique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aragno M., Verrechia E., Job D., Cailleau G., Braissant O., KhammarN., Katia F., Mota M., Guggiari M. et Martin G. ; 2010. Calcium carbonate biomineralization in ferrallitic, tropical soils through the oxalate-carbonate pathway. Bulletin BGS 30

Benites V.M., Machado P.L.O.A., Fidalgo E.C.C., Coelho M.R., Madari B.E., 2007 - Pedotransfert functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. Geoderma, 139, pp. 90-97

Bourgeat F., Zebrowski C., 1973. Relations entre le relief, les types de sols et leurs aptitudes culturales sur les Hautes Terres Malgaches. Cahier de l'ORSTOM, série biologique, 19 : 23-41.

Braissant, 2005. Carbonatogénèse bactérienne liée au cycle biogéochimique oxalate-carbonate. Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel. Thèse présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel pour l'obtention du grade de Docteur ès Science

Brown S., 1997. Estimating Biomass and biomass Change of Tropical Forests: a Primer. FAO Forestry Paper. 134. 86 pages.

Busson F., Andriamiarinosy M., Monteils F., Randrianarison M. (2009), REDD à Madagascar Etat des lieux et expériences en cours, Green Synergy, Unpublished report to the Madagascar REDD, Technical Committee.

Delenne, M.F., Pelletier, F., 1981. Carte du Potentiel des Unités Physiques, au 1:1 000 000e. Orstom. Bondy, France.

Elith, J., Leathwick, J.R., Hastie, T., 2008. A working guide to boosted regression trees. Journal of Animal Ecology 77, 802-813.

Ellert, B.H., Bethany, J.R., 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. Canadian Journal of Soil Science 75, 529-538.

FAO, 2006. World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. In: FAO (Ed.), World Soil Resources Reports, p. 145

FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2008. Harmonized World Soil Database (version 1.0). In, FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria, p. 42

Friedman, J.H., 2001. Greedy function approximation: a gradient boosting machine The Annals of Statistics 29, 1189-1232.

Gifford, M.R., Roderick, M.L., 2003. Soil carbon stocks and bulk density: spatial or cumulative mass coordinates as a basis of expression. Global Change Biology 9, 1507-1514.

Grinand C., 2010. Développement d'une méthode de spatialisation des stocks de carbone dans le sol à l'échelle régionale : Application à un projet REDD à Madagascar. Master SILAT AgroParitech et SupAgro-Montpellier, France. 47 p.

IPCC, 2006. Agriculture, Forestry and Other Land Use. In: Simon Eggleston, L.B., Kyoko Miwa, Todd Ngara and Kiyoto Tanabe (Ed.), Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Japan.

IPCC, 2007. Climate Change 2007 - The Physical Science Basis - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In. Cambridge

University Press, Cambridge, 996 p.

Jenkinson, D.S., Rayer, J.H., 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science* 123, 298-305.

Legros, J.P., 2006. *Mapping of the Soil*. Science Publishers.

Mathews, J.A., 2008. Carbon-negative biofuels. *Energy Policy* 36, 940–945.

Zewdie, M., Olsson, M., Verwijst, T., 2009. Above-ground biomass production and allometric relations of *Eucalyptus globulus* Labill. coppice plantations along a chronosequence in the central highlands of Ethiopia. *Biomass and Bioenergy* 33, 421–428.

Paukkonen K, Kauppi A. Effect of coppicing on root system morphology and its significance for subsequent shoot regeneration of birches. *Canadian Journal of Forest Research* 1998;28:1870e8.

Poulos, H.M., Camp, A.E., Gatewood, R.G., Loomis, L., 2007. A hierarchical approach for scaling forest inventory and fuels data from local to landscape scales in the Davis Mountains, Texas, USA. *Forest Ecology and Management* 244, 1–15.

PSDR-UPEP, 2006. Plan communal de développement de la commune rurale de Sadabe. 55 p.

Rambeloarisoa G. E., 1987. Conduite d'exploitation et de sylviculture dans un taillis d'*Eucalyptus robusta* à Andranomangatsiaka-Fivondonamokon-tany de Manjakandriana. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, Ecoles Supérieure des Sciences Agronomiques-Université de Madagascar. 95 p.

Randriamboavonjy J.C., 1996. Etude des pédo-paysages dans quatre zone-tests de Madagascar (Côte Est, Hautes Terres Centrales, Moyen-Ouest et Côte Ouest). La série du Département des Eaux et Forêts N°3, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques-Forêts, Université d'Antananarivo-Madagascar : 177p.

Riquier, J., 1968. Carte pédologique de Madagascar, au 1 : 1000000. Orstom. Paris, France.

Santantonio, D., Herman, R.K., Overtos, W.S., 1977. Root biomass studies in forest ecosystems. *Pedobiologia* 17, 1–31.

UNESCO-PNUE, 1979. Production primaire brute et nette, paramètres de croissance. Ecosystèmes forestiers tropicaux : un rapport sur l'état des connaissances préparé par l'Unesco (252 . 268). 740 p

Zebrowski Cl. et Ratsimbazafy Cl. (1979). Notice explicative N°83. Carte pédologique de Madagascar à 1/100.000. Feuille Antsirabe. ORSTOM, Paris 1979.

Zewdie M, Olsson M, Verwijst T. Above-ground biomass production and allometric relations of *Eucalyptus globulus* Labill. coppice plantations along a chronosequence in the central highlands of Ethiopia. *Biomass and Bioenergy* 2009;33:421e8.