

LISTE DES ABBREVIATIONS

ΔC	: Différence de stocks de carbone
ABG	: Aboveground
ACP	: Analyse en composante principale (PCA)
Al	: Aluminium
ANOVA	: Analyse de la variance
BLG	: Belowground
BRT	: Boosted regression tree
C	: Carbone
$C_{\text{aérien}}$: Stock de carbone aérien (C_{abg})
CCNUCC	: Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CDM	: Clean Development Mechanism
CdP	: Conférence des Parties
CEC	: Capacité d'échange cationique
CH_4	: Méthane
CHP	: Circonférence à hauteur de poitrine du rejet (CBH)
Cir	: Circonférence à la base des souches
CIRAD	: Coopération Internationale en recherche Agronomique pour le Développement
cm	: Centimètre
cm^3	: Centimètre cube
CO_2	: Dioxyde de carbone
CR ¹	: Commune Rurale
CR ²	: Coarse root
$C_{\text{racinaire}}$: Stock de carbone racinaire (C_{blg})
C_{sol}	: Stock de carbone du sol (SOC)
C_{tot}	: Stocke de carbone total
CV	: Coefficient of Variation
Da	: Densité apparente du sol
DBH	: Diameter at breast height
DSF-IRD	: Département Soutien et Formation des Communautés du Sud-Institution de Recherche pour le Développement
ESSAgro-Forêts	: Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques-Département Eaux&Forêts
Fe	: Fer
FOFIFA-Forêts	: Foibe Fikarohana momba ny Fambolena, department des Forêts
FR	: Fine root
g	: gramme
G	: Surface terrière, basal area
GES	: Gaz à effet de serre
Gg	: Gigagramme
Gt	: Gigatonne
H	: Hauteur des rejets
ha	: Hectare
HTC	: Hautes Terres Centrales

INRA	: Institut National de la recherche Agronomique
IPCC	: InterGovernmental Panel on Climate Change
kg	: Kilogramme
km	: Kilomètre
LRI	: Laboratoire des RadioIsotopes
m	: Mètre
MDP	: Mécanisme pour le Développement Propre
Mg	: Mégagramme
mg	: Milligramme
MIRS	: Mid infrared spectroscopy (Spectrométrie en moyen infrarouge)
MLM	: Multiple linear regression model
MNT	: Modèle numérique de terrain (DEM)
MOS	: Matière Organique du Sol
MR	: Medium root
N ₂ O	: Protoxyde d'azote
NhaCir	: Interaction entre la taille des souches et leur densité
Ø	: Diamètre
O ₂	: Oxygène
O _b , O _f , O _h	: Couches de la litière (de l'année, fragmentée, humifiée)
PC	: Principal component
PK	: Protocole de Kyoto
R : S	: Root shoot ratio
REDD	: La réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts (Reducing <i>Emissions</i> from <i>Deforestation</i> and <i>Degradation</i>)
RMSE	: Root mean square error
RPD	: Residual of prediction deviation
SIG	: Système d'information géographique (GIS)
SM	: Simple linear regression model
SRF	: Short rotation forestry
UTCF	: Utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie
δ ¹³ C	: ratio des isotopes stables du carbone ¹³ C et ¹² C

RESUME

Les écosystèmes forestiers jouent un rôle important dans l'atténuation de la concentration du gaz carbonique (gaz à effet de serre) en raison des fortes quantités de carbone (C) stockées dans leur végétation et le sol. Cette capacité peut être toutefois affecté par différents facteurs, comme le type de forêt, le type d'espèces végétales, l'âge et le mode de gestion. Aussi, la caractérisation de cette fonction de stockage de C de ces écosystèmes forestiers est-elle primordiale. Dans ce contexte, le stockage de C dans les compartiments végétaux (aérien, racinaire et litière) et du sol des plantations d'eucalyptus (E) à courte durée de rotation (5 ans) a été étudié sur les Hautes Terres de Madagascar ; ce sont des plantations destinées à la production de bois d'énergie et de charbon de bois.

Diverses situations sont étudiées : une chronoséquence de plantation d'eucalyptus (âge des souches de 17 à 111 ans, $n = 41$), des systèmes sous rotation culture/jachère (CJ, $n = 6$) et des systèmes sous système originel (pseudo-steppe et savane, B ; $n = 7$). Des mesures destructives de la biomasse aérienne et racinaire ont été réalisées dans ces situations ; un effort particulier a été porté sur la mesure de la biomasse racinaire de l'eucalyptus via la méthode du polygone de Voronoï.

Des équations allométriques reliant la quantité de biomasse (aérienne et racinaire) de ces taillis d'eucalyptus aux variables dendrométriques (circonférence des souches, surface terrière des rejets) ont été développées. L'application de ces équations et la caractérisation du stock de C du sol (0-30 cm) ont montré que les plantations d'eucalyptus présentent un stock total de C élevé en comparaison aux autres modes d'usage des terres : $150,8 \pm 25,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ vs 112 ± 15 pour B et $72,3 \pm 9,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ pour CJ. Ceci est en raison de la contribution importante du système racinaire ($21,22 \text{ Mg C ha}^{-1}$ dans la souche et $20,38 \text{ Mg C ha}^{-1}$ dans les racines à $\varnothing > 2 \text{ mm}$) et du sol (de l'ordre de $84,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$).

L'analyse des relations entre les valeurs de stocks de C dans les différents compartiments de l'eucalyptus mesurés et les variables dendrométriques/spatiales effectuée dans cette étude a montré qu'il n'y a pas de corrélations significatives entre la durée de plantation et les stocks de C dans chaque compartiment d'une part et le C aérien et le C racinaire d'autre part. Ce sont des modèles d'arbre de régression qui ont permis de prédire les stocks de chaque compartiment avec : f (pente, circonférence, âge et densité des rejets) pour le C aérien ($R^2 = 0,74$), f (variable intégrant à la fois la circonférence et la densité des souches, altitude, âge des souches) pour le C racinaire ($R^2 = 0,85$) et f (altitude, pente, âge des souches) pour le C du sol ($R^2 = 0,61$). L'application de ces modèles sur des couches spatiales des variables concernées préalablement établies à l'échelle d'une Commune Rurale des Hautes Terres malgaches (Sambaina) a permis de quantifier le stock de C sur une superficie de 1580 ha. Pour un stock total de $238 \pm 40 \text{ Gg C}$, $32 \pm 13 \text{ Gg C}$ se trouvent dans la biomasse aérienne, $67 \pm 15 \text{ Gg}$ dans la biomasse racinaire et $139 \pm 36 \text{ Gg C}$ dans les 30 premiers centimètres du sol.

Les résultats de ce travail ont montré que les plantations d'eucalyptus considérées dans cette étude permettent le stockage important de C. Ainsi les méthodologies et résultats acquis lors de cette étude seront-elles applicables à d'autres zones (comme les fronts d'afforestation), afin de valoriser ces nouvelles plantations d'eucalyptus sur le marché du C, en plein développement.

MOTS-CLES : séquestration de carbone, biomasses aérienne et racinaire, sol tropical, taillis d'*Eucalyptus robusta*, chonoséquence, changement de mode d'usage, réchauffement climatique.

ABSTRACT

Forest ecosystems play an important role in mitigating carbon dioxide concentration (greenhouse gas) owing to the large carbon (C) quantities stored in their soil-plant system. Different factors are controlling the process, as: forest type, species, and forest age and management. Characterization of the C storage function in forest ecosystems is needed. In this context, C storage in vegetal (shoot, root, litter) and soil components of short rotation forestry of eucalyptus plantations (5 years) is studied in the Highlands of Madagascar; these plantations are used for fuel wood and charcoal supply.

Several sites have been studied: a chronosequence of eucalyptus plantation (E, age of stump from 17 to 111 years, $n = 41$), croplands (CJ, $n = 6$) and systems under native vegetation (grassland B, $n = 7$). Destructive measurements of shoot and root biomass were carried out. Massive effort was made in measuring root biomass of eucalyptus with use of Voronoï polygon.

Allometry equations linking biomass density (shoot and root) of these coppices of eucalyptus with biological variables (stump circumference, basal area of shoots) were developed. Application of these equations and characterization of soil C stock (0-30 cm) showed that total C stock for eucalyptus plantation was higher than for the other land use: $150, 8 \pm 25,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ vs $112 \pm 15 \text{ Mg C ha}^{-1}$ for B and $72,3 \pm 9,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ for CJ. It was mainly due to the great contribution of the root system ($21,22 \text{ Mg C ha}^{-1}$ for the stump, $20,38 \text{ Mg C ha}^{-1}$ in the coarse and medium roots with $\varnothing > 2 \text{ mm}$) and the C-soil ($84,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$).

Analysis of relationships between measured C stocks values in the different components of eucalyptus and spatial and biological variables demonstrated that there were no significant correlation between plantation duration and C stocks in each component on the one hand and between shoot C and root C on the other hand. The boosted regression tree method gave the best prediction of C in the tested compartments: f (slope, shoot circumference at breast height, age and stocking of shoots) for the shoot C ($R^2 = 0,74$), f (variable combining circumference and stocking of stump, elevation, stump age) for the root C ($R^2 = 0,85$) and f (elevation, slope, stump age) for soil C ($R^2 = 0,61$). The models have been used on spatial layers at a county scale in the Malagasy Highlands (Sambaina) to predict C stocks in an area of 1580 ha. For a total stock of $238 \pm 40 \text{ Gg C}$, $32 \pm 13 \text{ Gg C}$ were in the aerial biomass, $67 \pm 15 \text{ Gg}$ in the root biomass and $139 \pm 36 \text{ Gg}$ in the first 30 cm of soil.

Results from this study showed that eucalyptus plantations considered herein allowed important C storage. Thus, methodologies and results established in this study could be applied in other area (like afforestation fronts) in order to increase the value of these new eucalyptus plantations on C market which is in expansion.

KEYWORD: carbon sequestration, shoot and root biomass, tropical soil, coppice of *Eucalyptus robusta*, chronosequence, land use change, global warming

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE ET PROBLEMATIQUES	1
LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET LA FORESTERIE.....	1
Le réchauffement climatique et les gaz à effet de serre.....	1
Les gaz à effet de serre (CO ₂) et la foresterie.....	4
LES INITIATIVES INTERNATIONALES A L'ENCONTRE DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE	7
La Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique et le Mécanisme pour le Développement Propre	7
Le Mécanisme pour le Développement Propre en foresterie.....	8
GENERALITES SUR LES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS.....	9
Le genre Eucalyptus.....	9
Les plantations d'eucalyptus dans le monde	10
Les controverses sur les plantations d'eucalyptus.....	11
Eucalyptus et stockage de carbone	12
Modélisation et spatialisation des stocks de carbone sous eucalyptus.....	14
LES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS A MADAGASCAR ET CONTEXTE DE L'ETUDE.....	17
L'importance socio-économique des plantations d'eucalyptus à Madagascar	17
Le mode de gestion des anciens taillis d'eucalyptus des Hautes Terres Malgaches.....	18
La représentation simplifiée des plantations d'eucalyptus malgaches en vue de l'étude de son importance environnementale.	19
OBJECTIFS ET HYPOTHESES DE L'ETUDE	23
CHAPITRE I. MATERIELS ET METHODES ; RESULTATS INTRODUCTIFS	25
1.1. PRESENTATION DES MILIEUX D'ETUDE	26
1.1.1. Présentation générale	26
1.1.2. Présentation des Sites d'études	32
1.2. METHODOLOGIE GENERALE.....	36
1.2.1. Les situations étudiées	36

1.2.2. Méthode de quantification du C de la biomasse et de la nécromasse	36
1.2.3. Détermination du C et des autres caractéristiques physico-chimiques du sol	39
1.2.4. Etablissement des cartes de carbone.....	41
1.3. RESULTATS PRELIMINAIRES	44
1.3.1. Structure des peuplements d'eucalyptus.....	44
1.3.2. Densités apparentes et profils de carbone du sol.....	46
1.3.3. Détermination des teneurs en carbone du sol avec la spectroscopie en moyen infrarouge	49
1.3.4. Cartographies de la végétation et du sol de Sambaina.....	51
REFERENCES.....	55
CHAPITRE II. LA PRODUCTION DE BIOMASSE RACINAIRE ET LES EQUATIONS ALLOMETRIQUES DES TAILLIS DE PLANTATION D'EUCALYPTUS SUR LES HAUTES TERRES CENTRALES DE MADAGASCAR.....	58
ABSTRACT	59
2.1. INTRODUCTION.....	60
2.2. MATERIAL AND METHODS.....	61
2.2.1. Study area.....	61
2.2.2. Studied stands characteristics.....	62
2.2.3. Tree selection	63
2.2.4. Below-ground (BLG) biomass measurements.....	63
2.2.5. Above-ground (ABG) Biomass measurements.....	64
2.2.6. Allometric relationships	65
2.2.7. Statistical analysis.....	65
2.3. RESULTS	66
2.3.1. BLG regression equations.....	66
2.3.2. ABG regression equations	67
2.3.3. Biomass partitioning.....	68

2.3.4. Correlation between variables	69
2.4. DISCUSSIONS AND CONCLUSIONS	71
2.4.1. Allometry relations	71
2.4.2. Biomass production and partitioning	72
2.4.3. Biomass production over time	73
2.5. CONCLUSIONS	73
ACKNOWLEDGEMENTS	74
REFERENCES	74
CHAPITRE III. FONCTION DE PUIXS DE CARBONE DES TAILLIS D'EUCALYPTUS A MADAGASCAR ..	79
RESUME	80
3.1. INTRODUCTION	81
3.1.1. Contexte scientifique	81
3.1.2. Les plantations d'eucalyptus à Madagascar	83
3.2. MATERIELS ET METHODES	84
3.2.1. Les zones et les parcelles étudiées	84
3.2.2. Quantification des stocks de C	89
3.2.3. Analyses statistiques	93
3.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS	93
3.3.1 Les quantités de C de la biomasse	93
3.3.2. Les quantités de C du sol	96
3.3.3. Le stock total de C et l'évolution avec le temps du C des compartiments séquestrants	98
3.3.4. L'évolution avec le temps des stocks de C des compartiments séquestrants	98
3.4. CONCLUSION	100
3.5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	101
CHAPITRE IV. SPATIALISATION DES STOCKS DE CARBONE DES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS DES HAUTES TERRES CENTRALES DE MADAGASCAR: UNE APPROCHE DE REGRESSION MULTIPLE ...	107
4.1. INTRODUCTION:	109
4.2. MATERIALS AND METHODS	111

4.2.1. Study area.....	111
4.2.2. Carbon inventory.....	112
4.2.3. Spatial analysis	114
4.2.4. Modeling	117
4.2.5. Carbon mapping and quantification.....	118
4.2.6. Validation procedure.....	119
4.3. RESULTS AND DISCUSSIONS	119
4.3.1. Correlation between variables	119
4.3.2. Results of modeling	120
4.4. MAPPING OF C STOCKS AND THEIR VARIABILITY	125
4.5. CONCLUSIONS	128
ACKNOWLEDGMENT.....	129
REFERENCES	129
CHAPITRE V. CONCLUSIONS, LIMITES ET PERSPECTIVES DE L'ETUDE.....	138
5.1. CONCLUSIONS	139
5.1.1. Mesures des stocks de C dans le compartiment du végétal sous eucalyptus.....	139
5.1.2. Mesures des stocks de C dans le compartiment sol de l'eucalyptus	140
5.1.3. Potentialités de stockage de C des plantations d'eucalyptus	140
5.1.4. Modélisation et spatialisation des stocks de C des plantations d'eucalyptus	144
5.1.5. Comptabilisation du CO ₂ des plantations d'eucalyptus	146
5.2. LIMITES ET PRESPECTIVES	150
5.2.1. Limites d'étude.....	150
5.2.2. Perspectives et pistes de recherche.....	153
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	156
ANNEXES	170
LISTE DES TABLEAUX	177
LISTE DES FIGURES	178
LISTE DES PHOTOS.....	180

INTRODUCTION GENERALE ET PROBLEMATIQUES

LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET LA FORESTERIE

Le réchauffement climatique et les gaz à effet de serre

L'atmosphère est composée d'azote (78,1%) et d'oxygène (20,9%), avec un certain nombre de gaz à l'état de trace dont l'argon (0,93%), l'hélium et les gaz à effet de serre (GES) tels que le dioxyde de carbone CO_2 (379 ppmv¹) ou l'ozone. En outre, l'atmosphère contient également de la vapeur d'eau, dont la proportion est très variable, mais dont la quantité est généralement de 1% (IPCC, 2001 ; IPCC, 2007a). Ces composants de l'atmosphère contribuent à « l'effet de serre naturel » qui n'est autre que le processus permettant à l'atmosphère de se maintenir à une température de +15°C, condition indispensable à la vie sur Terre (-18°C sans effet de serre naturel). En effet, la Terre reçoit son énergie du soleil qu'elle (et l'atmosphère) absorbe en partie et renvoie le reste dans l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. Mais une partie de cette énergie est interceptée par les GES, permettant ainsi le réchauffement de la Terre.

Toutefois, si ces GES sont naturellement présents dans l'air, les activités anthropiques au cours de ces 200 dernières années (depuis la révolution industrielle), en produisent de plus en plus, particulièrement le CO_2 , la méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O) (Figure 0.1) ; d'autres gaz actuellement présents dans l'atmosphère (chloro-fluorocarbones et soufre en ppb²) sont uniquement issus des activités industrielles. La concentration atmosphérique de CO_2 a augmenté de 31% depuis 1750.

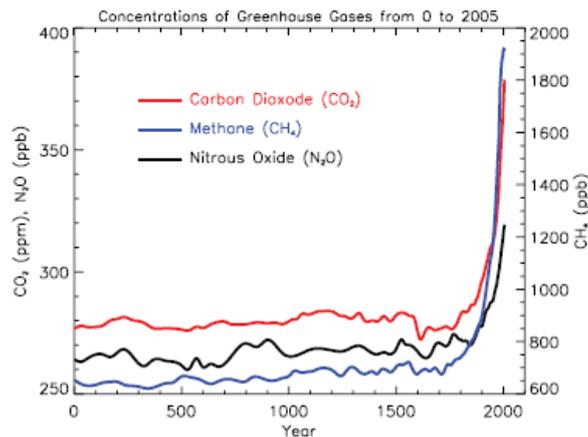


Figure 0.1 Evolution des concentrations³ atmosphériques globales de trois gaz à effet de serre. (IPCC, 2007a).

¹ Partie Par Million de Volume (= 1/ 1.000.000) : unité des concentrations de GES dans l'atmosphère

² Partie Par Billion (= 1/ 1.000.000.000)

³ ppm(partie par million) ou ppb (partie par milliard) : ratio entre le nombre de molécules de GES et le nombre total de molécules d'air sec

Selon la **Figure 0.2**, environ les trois quarts des émissions anthropiques de CO₂ dans l'atmosphère au cours des 20 dernières années sont dus à la combustion de combustibles fossiles. Le reste est imputable, pour l'essentiel, aux changements de mode d'usage, et plus particulièrement au déboisement. Plus de la moitié des émissions actuelles de CH₄ et un tiers des émissions actuelles de N₂O sont d'origine humaine (IPCC, 2007b). Elles sont dues à la combustion de combustibles fossiles, bétail, culture du riz, décharges pour le CH₄ et aux émissions dans les terres cultivées, aliments pour bétail et industrie chimique pour le N₂O.

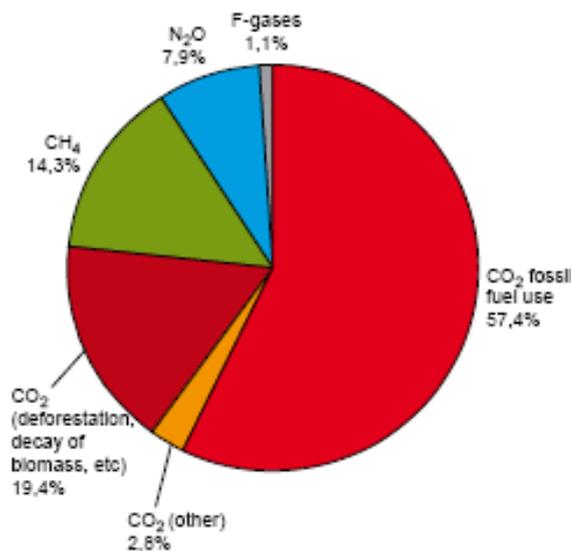


Figure 0.2 Emissions globales de GES anthropiques en 2004 (IPCC, 2007b).

Cette augmentation de la concentration atmosphérique en GES constitue un surplus artificiel de GES essentiellement d'origine anthropique qui serait responsable du réchauffement du climat. Ce dernier est donc attribué directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui vient s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables (CCNUCC, 1992).

De plus, on observe un lien direct entre l'augmentation de l'effet de serre et le réchauffement de la planète (**Figure 0.3**), lien montré par l'observation du réchauffement du climat de la Terre au cours de cette même période de temps (depuis la révolution industrielle) (Hansen and Sato, 2004). L'augmentation totale de température de 1850-1899 à 2001-2005 est de 0,76 °C ($\pm 0,19$). La vitesse moyenne du réchauffement au cours des cinquante dernières années, qui varie de 0,10 à 0,16 °C par décennie, est environ le double de la vitesse moyenne pour les cent dernières années (IPCC, 2007a). Ce phénomène est aussi accompagné par la fonte généralisée de la neige et de la glace, et l'élévation du niveau moyen mondial de la mer (IPCC, 2007).

A noter que, les GES responsables du changement climatique présentent des caractéristiques différentes⁴ et ne se conduisent pas de la même manière ; certains (CO_2 , CH_4 et NO_x) sont très efficaces même en petite quantité, donc retiennent davantage de rayonnement infrarouge (IPCC, 2007b).

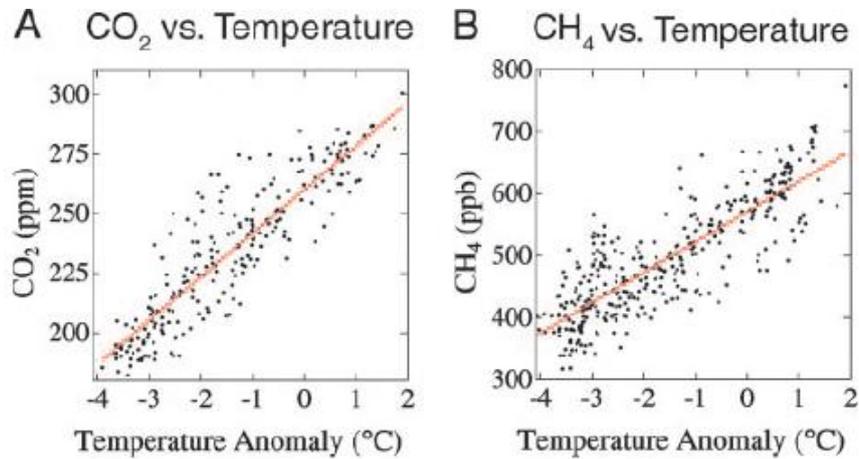
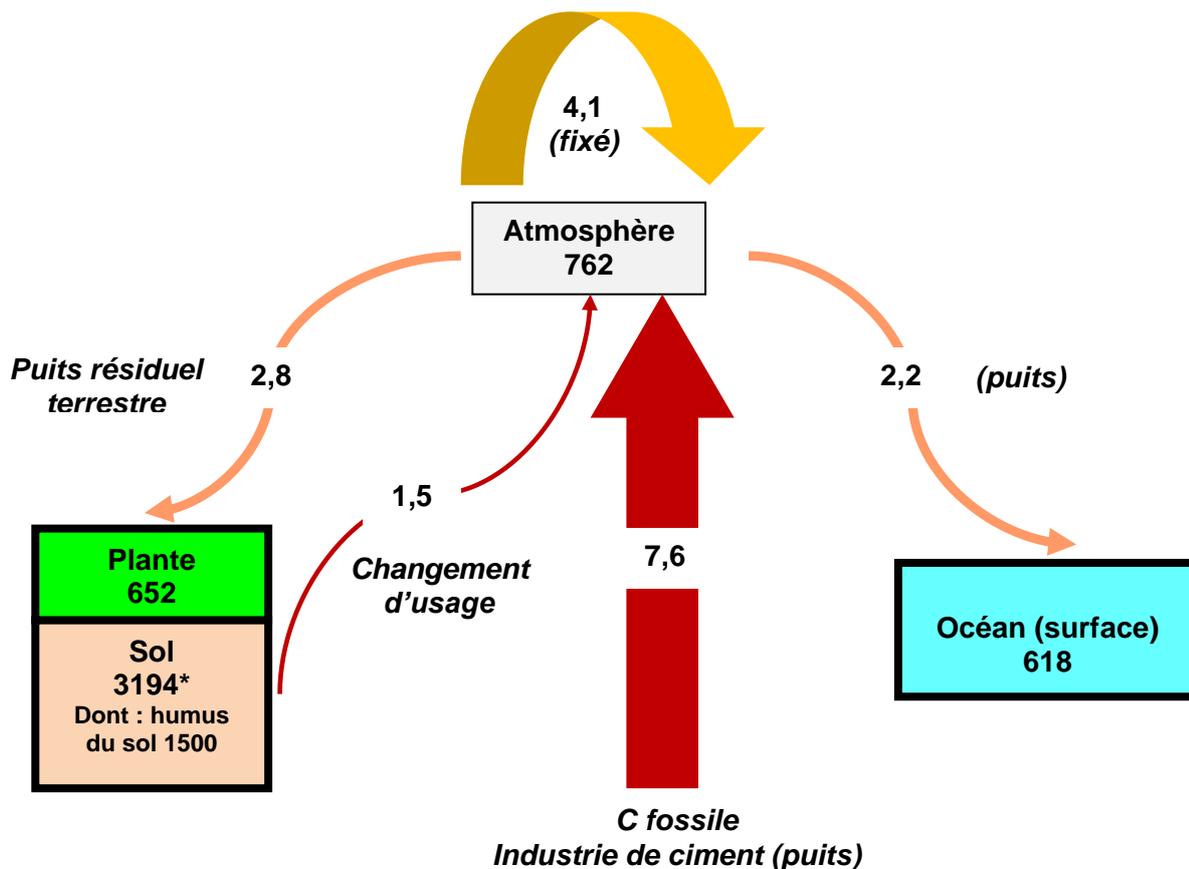


Figure 0.3 Relation entre la concentration de GES (CO_2 et CH_4) et température de la terre depuis le passé (Hansen and Sato, 2004).

De tout ceci, la quantité de CO_2 dans l'atmosphère et sa dynamique constituent l'un des focus des recherches à l'encontre du réchauffement global ; mais à noter que cette quantité est contrôlée par le cycle global de C du système terrestre, dont l'écosystème forestier.

⁴ Caractéristiques en termes de (IPCC, 2007):

- (i) concentration : ≈ 379 ppmv de CO_2 , 1,75 ppmv pour le CH_4 et 0,3 ppmv pour le N_2O .
- (ii) Durée de vie : 150 ans pour le CO_2 , 114 ans pour le N_2O et 12 ans pour le CH_4 .
- (iii) Potentiel de réchauffement global : 1 fois pour le CO_2 , 296 fois pour le N_2O et 23 fois pour le CH_4 .

Les gaz à effet de serre (CO₂) et la foresterie

**Incluant les zones humides et les *frozen soils*

▭ Réservoir de C (GtC)

↪ Flux annuels (GtC. An⁻¹)

Figure 0.4 Le cycle global du carbone (2000-2006), focus sur l'Agriculture, la Foresterie et les Autres Gestion des Terres (Canadell *et al.*, 2007; IPCC, 2007).

En considérant les éléments du bilan global du C (**Figure 0.4**), on observe que l'écosystème terrestre contribue beaucoup à la séquestration de C. Le compartiment plante renferme presque autant de C que l'atmosphère ; le sol, quant à lui, renferme deux fois plus de C que l'atmosphère (Schlensinger, 1990 ; Koskela *et al.*, 2000 ; FAO, 2001 ; Robert et Saugier, 2003). Il y a des échanges de carbone entre ces différents éléments du cycle global, que ce soit naturel ou à la suite des activités anthropiques, qui sont entre autres : la combustion de carbone fossile, la cimenterie et secondairement et, le changement d'usage des terres dont la déforestation (**Figure**

0.5 (Schimel *et al.*, 2001; Jandl *et al.*, 2007) ; les activités forestières (déforestation) est responsable de 17,4% d'émission de GES⁵ (dont le CO₂) dans l'atmosphère.

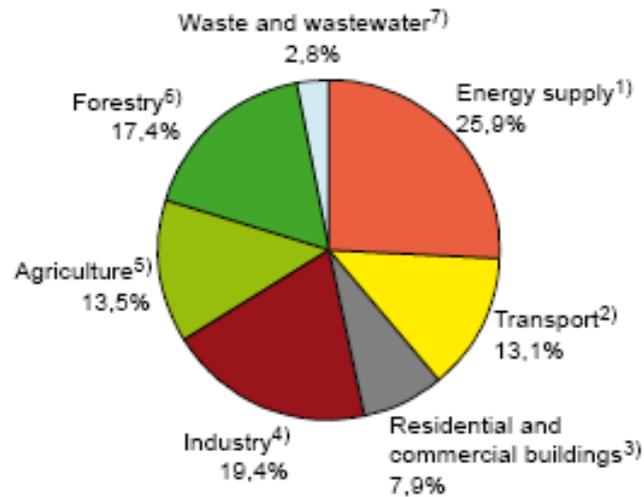


Figure 0.5 Emissions de GES par secteur en 2004 (IPCC, 2007b).

En d'autres termes, les forêts constituent un composant important dans le changement global parce qu'elles peuvent présenter, selon leur mode de gestion, un impact positif ou négatif du changement climatique induit par l'homme (Schimel *et al.*, 2001; Canadell *et al.*, 2007; Heimann and Treichstein, 2008). En effet, on observe une grande capacité de stockage de C due à l'absorption du CO₂ de l'atmosphère pour une forêt en croissance (fonction *puits* de C). Mais on pourrait aussi s'attendre à un retour d'une quantité considérable de C accumulées par une forêt âgée dans l'atmosphère si cette forêt a été perturbée (fonction *source*) (Locatelli and Lescuyer, 1999; Houghton and Goodale, 2004; Luysaert *et al.*, 2008).

Les processus naturels d'échange de C entre l'atmosphère, la végétation et le sol à l'échelle de la parcelle sont (**figure 0.6**): (i) la photosynthèse (réaction biochimique qui, grâce à l'énergie lumineuse, transforme des molécules d'eau et le CO₂ atmosphérique en molécules d'O₂ et de glucides ou matière organique) ,(ii) la respiration autotrophe (plante) et (iii) la respiration hétérotrophe (activité microbienne et tous les microorganismes) (Cao and Woodward, 1998; Malhi *et al.*, 1999). Le stock de C de la végétation d'un écosystème forestier résulte donc de la

⁵ Environ les trois quarts des émissions anthropiques de CO₂ dans l'atmosphère au cours des 20 dernières années sont dues à la combustion de combustibles fossiles. Le reste est imputable, pour l'essentiel, aux modifications de l'utilisation des sols, et plus particulièrement au déboisement. Un peu plus de la moitié des émissions actuelles de CH₄ sont d'origine humaine (par exemple : combustion de combustibles fossiles, bétail, culture du riz, décharges). Environ un tiers des émissions actuelles de N₂O sont d'origine humaine (par exemple : terres cultivées, aliments pour bétail, industrie chimique).

différence entre les taux de production et de décomposition de la biomasse (IPCC, 2007). Pour le carbone organique du sol, il existe aussi d'autres processus, tel le transfert de matière organique sous forme solide et soluble (dépôt, érosion, ruissellement, lixiviation) (Bernoux *et al.*, 2004). De ces processus, les écosystèmes forestiers ont un potentiel de stockage correspondant à un puits global de 2,8 GtC.an⁻¹ (figure 0.4).

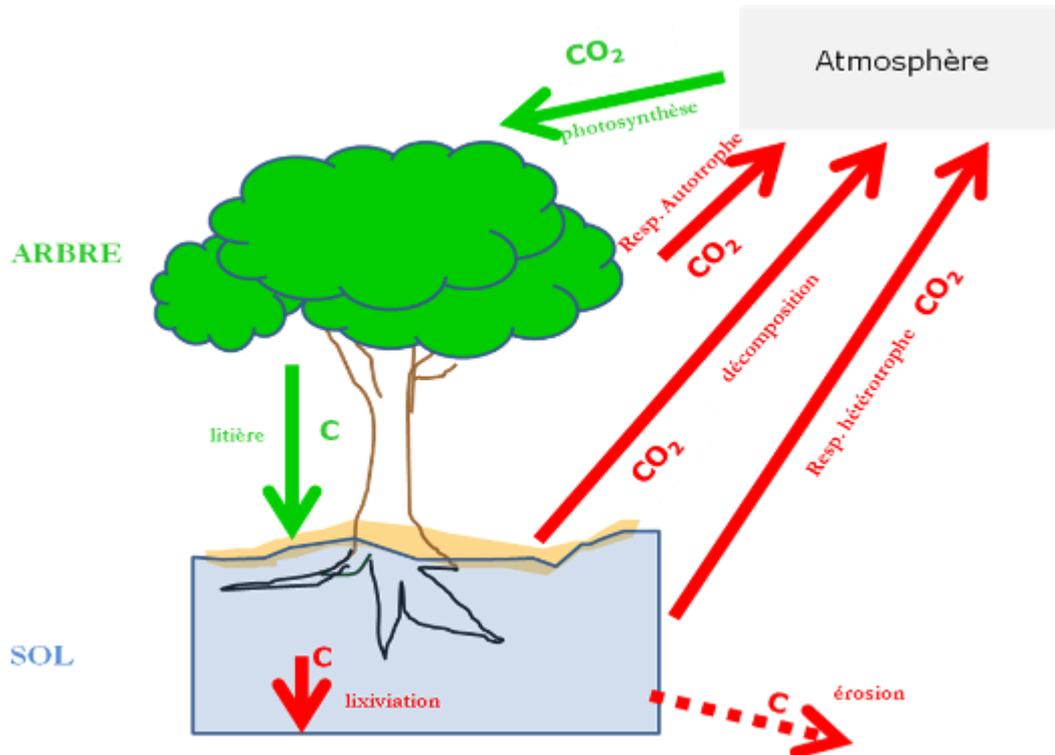


Figure 0.6 Cycle du C au niveau de la parcelle d'un écosystème forestier (adapté à partir de Malhi *et al.*, 1999 et IPCC, 2007).

Par ailleurs, le potentiel de stockage dépend du type de l'écosystème (Locatelli et Lescuyer, 1999 ; Koskela *et al.*, 2000 ; Robert et Saugier, 2003). Les plantations, selon leur âge, sont reconnues pour avoir un effet sur l'augmentation du stock de C à la fois dans la biomasse et dans le sol (Koskela *et al.*, 2000 ; Paul *et al.*, 2002 ; Guo et Gifford, 2002; Lal, 2005), quoi que, principalement pour le compartiment sol, les plantations à courte rotation semblent peu efficaces (Shea *et al.*, 1998). Le mode de gestion forestière influence dans la quantité et la dynamique de la matière organique aussi bien dans la végétation que dans le sol; via : l'exportation ou non des résidus de récolte (O'Connell *et al.*, 2004; O'Connell *et al.*, 2004), les éclaircies, la durée de rotation des exploitations forestières (Du Toit *et al.*, 2001, 2003; Corbeels *et al.*, 2005), les apports de la fertilisation, le drainage, l'espèce forestière utilisée, le contrôle des perturbations naturelles (Ranger *et al.*, 2002 ; Patzek et Pimentel, 2006 ; Jandl *et al.*, 2007 ; Satori *et al.*, 2007), et l'historique

de la parcelle avant la plantation (Lugo et Brown, 1993; Post et Known, 2000 ; Guo and Gifford, 2002).

Aussi, les écosystèmes forestiers représentent-ils un potentiel de stockage de C important. D'où les préoccupations et intérêts internationaux pour l'acquisition de connaissances précises sur ces potentialités de fonction de puits de CO₂ de ces plantations forestières.

LES INITIATIVES INTERNATIONALES A L'ENCONTRE DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE

La Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique et le Mécanisme pour le Développement Propre

La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) a été adoptée par le Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992 et est entrée en vigueur en 1994 et ratifiée par 192 pays (en Août 2007). Elle reconnaît l'existence du changement climatique d'origine humaine et impose aux pays industrialisés le primat de la responsabilité pour lutter contre ce phénomène (MIES, 2005b).

L'objectif ultime de la CCNUCC est de stabiliser, conformément aux dispositions pertinentes de la Convention, les concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il convient d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable (CCNUCC, 1992). Alors que la convention fixe les grandes lignes de la réponse aux changements climatiques, c'est la Conférence des Parties (CdP) – réunion des pays ayant signé la Convention - qui en détermine les modalités d'application lors de réunions régulières.

En 1997, la troisième réunion des CdP adopte le Protocole de Kyoto⁶ (PK) qui impose aux pays de l'Annexe I (les pays industrialisés) de réduire les émissions globales de gaz à effet de serre d'au moins 5% pendant une première période d'engagement (2008-2012) par rapport au niveau de 1990. Ce protocole est entré en vigueur en 2005 et est actuellement ratifié par 183 pays et une organisation économique régionale intégrée.

⁶ A la différence de la Convention, le Protocole de Kyoto (PK) est un instrument contraignant, à condition que plus de 55 pays le ratifient, parmi lesquels des pays de l'Annexe I représentant 55% des émissions de 1990 de l'Annexe I.

Pour faciliter les réductions d'émissions, trois types de mécanismes de flexibilité sont définis dans le PK :

- un système d'échange de droits d'émission entre pays de l'Annexe I,
- la Mise en Œuvre Conjointe (MOC),
- et le Mécanisme de Développement Propre (MDP).

Les deux derniers mécanismes permettent à des pays de l'Annexe I de financer des projets de réduction d'émission ou de stockage dans d'autres pays de l'Annexe I (pour la MOC) ou dans des pays hors Annexe I (pour le MDP) et de compter les réductions d'émissions pour atteindre leurs engagements.

Le MDP se matérialise par la réalisation de projets qui permettent à la fois de réduire les émissions de GES et/ou d'augmenter les capacités de séquestration de C des puits. Le MDP est le seul mécanisme prévu par le PK qui implique les pays du Sud, en leur permettant d'accueillir des projets de réduction d'émissions sur leur territoire (MIES, 2005a). En effet, grâce au MDP, des projets énergétiques ou forestiers réalisés dans les pays du Sud peuvent recevoir des financements par la vente de crédits carbone à des pays de l'Annexe I, proportionnellement à leur réduction d'émissions ou à leur stockage (Locatelli *et al.*, 2005; Jandl *et al.*, 2007).

Le Mécanisme pour le Développement Propre en foresterie

Le PK prévoit que, pour remplir leurs engagement, les pays peuvent prendre en considération les incidences de leurs activités de boisement, de reboisement et de déboisement ainsi que de leurs autres activités reconnues dans le secteur de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie (UTCF).

Pour la première période de 2008-2012, dans les types de projets UTCF, seules les activités de boisement et de reboisement sont éligibles pour le MDP en foresterie. L'éligibilité de certaines activités de boisement ou reboisement, telle l'agroforesterie, dépend de la définition qui est donnée à la forêt (cette définition peut changer d'un pays à l'autre selon le d'écosystèmes présents dans le pays et en vue d'optimiser les objectifs nationaux de développement).

Dans ce cadre, un marché international de « crédits carbone » a été mis en place. Selon les données diffusées par la Banque Mondiale (Capoor and Ambrosi, 2008), en 2007, ce marché international concernait presque 3 Mt CO₂e⁷ correspondant à une valeur de 64 milliards US\$.

Pour Madagascar, les projets MDP ou C en forêts sont tous en stade de développement et en phase de démarrage. Parmi ces activités, on trouve le boisement ou reboisement, la restauration des corridors forestiers et l'évitement des émissions de CO₂ par la déforestation (réduction des émissions de la déforestation dans les pays du Sud). Cette situation existe dans les nombreuses pays qui adoptent le MDP ; ceci, à cause des règles en général assez contraignantes dans la pratique des activités de UTCF sous MDP. Cependant, les discussions vont se poursuivre après cette 1^{ère} période d'engagement de PK et les règles futures considèreront sûrement tous les compartiments de C (dont le sol forestier ; (Ringius, 2002) ; et aussi les autres activités telles que l'évitement de la déforestation (Bernoux *et al.*, 2002; Höhne *et al.*, 2007).

GENERALITES SUR LES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS

Le genre *Eucalyptus*

Le nom *Eucalyptus* provient du grec *eu* (bien) et *kaliptos* (couvert). Il évoque l'opercule recouvrant étamines et pistil, dont les variations au sein du genre permettent de classer les espèces. Le genre *Eucalyptus* comprend 7 sous-genres et environ 700 espèces. Leur nombre précis évolue au fil des études taxonomiques. Il appartient à la famille des Myrtacées qui compte 90 genres et environ 3000 espèces. La description botanique des eucalyptus date de la fin du dix huitième siècle mais ce n'est qu'au début du vingtième qu'ils ont été utilisés en reboisement (Jacobs, 1982).

La plupart des espèces utilisées en plantation, dont *Eucalyptus robusta*, appartiennent au sous genre *Symphomyrthus* qui est le plus contrasté par la diversité des formes ainsi que par la variété des habitats (Cossalter *et al.*, 1999 ; in Laclau, 2001).

Les eucalyptus sont essentiellement des arbres austro-malais, dont l'aire s'étend entre 7° N et 43° 39' S et ils se développent vigoureusement en tant qu'espèce introduite depuis presque 150 ans dans plus de 100 pays. L'*E. robusta* considéré ici provient des régions côtières de la Nouvelle-Galles du Sud et du Queensland méridional en Australie (Jacobs, 1982) où les conditions climatiques sont diversifiées. En effet, cette espèce y croît avec :

⁷ CO₂e : équivalent en quantité de CO₂ des quantités de tous les GES autres que CO₂ : 1 t CH₄ = 23 t CO₂ et 1 t N₂O = 296 t CO₂.

- une pluviométrie annuelle de 1000 à 1500 mm et supporte jusqu'à 4 mois de saison sèche,
- Des températures moyennes annuelles entre 18 et 27°C (le maximum du mois le plus chaud étant 30-32°C et le mois le plus froid, de 3-5 °C).

Les plantations d'eucalyptus dans le monde

En général, les forêts et les arbres sont plantés dans de nombreux desseins et à un rythme croissant. La superficie de plantations forestières s'est accrue d'environ 2,8 millions d'hectares par an entre 2000 et 2005, et 87% d'entre elles étant des plantations destinées principalement à la production de bois et de fibres (FAO, 2006a ; FAO, 2007). Ainsi, dans le monde, les plantations forestières ont occupé 140 millions d'ha en 2005 contre 100 millions en 1990.

L'Eucalyptus est un des arbres forestiers les plus plantés au monde, en particulier en Asie et en Amérique Latine. En 2005, les plantations d'eucalyptus occupaient environ 8% des superficies plantées (**Figure 0.7**), soit environ 11 millions d'ha. Malgré la grande diversité du genre, peu d'espèces d'eucalyptus seulement sont les plus présentes dans le commerce. Selon Eldridge *et al.* (1993 in Laclau, 2001), les plus importantes sont au nombre de dix, entre autres : *E. grandis*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. urophylla*, *E. viminalis*, *E. saligna*, *E. deglupta*, *E. exerta*, *E. citriodora* et *E. robusta*.

L'eucalyptus est planté en général pour la protection des sols contre l'érosion et pour la production de bois à des fins différentes (bois de trituration pour la production de pâte à papier, bois d'énergie pour la production de bois de chauffe et du charbon de bois, bois de construction, bois d'œuvre surtout pour les espèces en Australie).

Par ailleurs, l'eucalyptus peut être géré sous courte rotation notamment pour la production de bois d'énergie (O'Connell *et al.*, 2004) ; tel est le cas de la grande majorité des plantations d'eucalyptus à Madagascar.

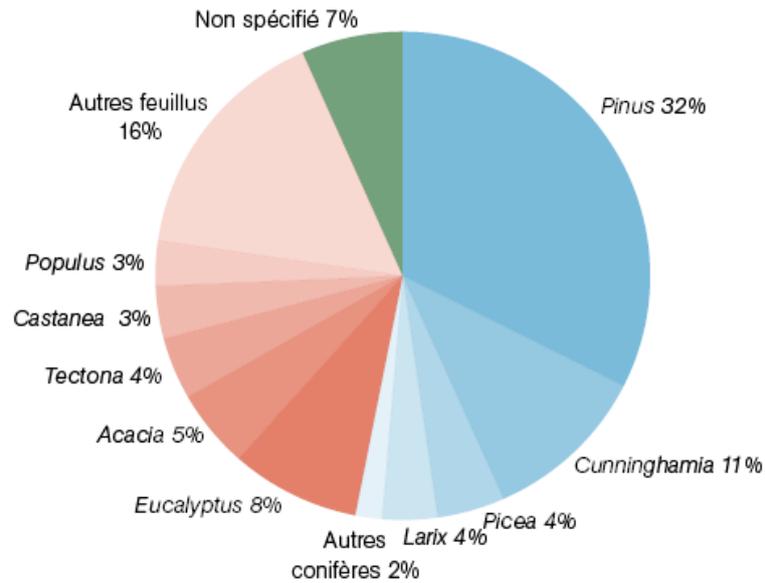


Figure 0.7 Forêts plantées productives en 2005: superficie par genre (FAO, 2007).

Les controverses sur les plantations d'eucalyptus

L'expansion des plantations d'espèces exotiques à croissance rapide a suscité de grandes discussions entre les « forestiers » et les environnementalistes. Tandis que les premiers ne voulaient considérer que les aspects positifs des reboisements en termes de fourniture de bois pour les populations, de réduction de la pression humaine sur les forêts naturelles et plus récemment de fixation de carbone, les seconds reprochaient à ces plantations leurs besoins hydriques importants et l'assèchement des nappes phréatiques, l'appauvrissement des sols, la suppression de la végétation de sous-bois favorisant l'érosion, et la réduction de la biodiversité (Martin, 2003; FAO, 2007). Aussi, des recherches scientifiques visant à caractériser l'incidence des plantations d'eucalyptus sur l'environnement, en comparant avec d'autres espèces forestières se sont-elles développées. Selon une synthèse effectuée par Laclau (2001) : (i) ils présentent des besoins en éléments minéraux équivalents à ceux des pins, mais qui peuvent être nettement supérieurs à ceux de la végétation d'origine (savane herbeuse), (ii) les plantations d'eucalyptus entraînent une réduction du débit des rivières (à l'exutoire) plus rapide que dans le cas de plantations de pins, en raison principalement de leur croissance initiale plus forte.

Les plantations d'eucalyptus doivent ainsi être réalisées dans le cadre d'un aménagement du territoire raisonné afin de minimiser leurs éventuels impacts négatifs sur l'environnement (Guo and Sims, 1999; Gonçalves *et al.*, 2004). Les eucalyptus peuvent toutefois contribuer à la

fertilisation et à l'amélioration d'un sol très pauvre en nutriments comme le cas observé au Congo (Loumeto and Bernhard-Reversat, 2001) et probablement le cas des plantations d'eucalyptus des Hautes Terres de Madagascar.

Par ailleurs, des recherches sont encore nécessaires afin d'accroître la production aérienne en biomasse ou en bois de ces espèces sans diminuer les réserves souterraines et sans augmenter les exigences d'apports de nutriments (Karp and Shield, 2008).

Eucalyptus et stockage de carbone

Les peuplements d'eucalyptus ont fait l'objet de diverses études que ce soit en relation avec leur production en bois (d'énergie, d'œuvre et de pâte à papier) ou en relation avec leurs potentialités de stockage de C (**Tableau 0.1**). Ces études peuvent donc inclure les mesures de la biomasse aérienne et racinaire et de la matière organique du sol selon différentes échelles spatiales (parcelle, bassin versant, régionale, nationale, ...) et temporelle (ici, de 3 à 60 ans, mais en moyenne vers 7 ans). Leurs principaux objectifs seraient : le développement de méthodes permettant de quantifier avec précision la production d'un peuplement soumis à certaines conditions environnementales et sylvicoles, l'analyse des impacts de l'afforestation en eucalyptus sur la fertilité du sol et le maintien de celle-ci en vue d'une production de bois soutenue et, la compréhension de l'influence des modes de gestion de l'eucalyptus sur les stocks de C aussi bien dans la biomasse (aérienne, racinaire, litière) qu'au niveau du sol en réponse au réchauffement climatique.

Tableau 0.1 Quelques chiffres sur les stocks de carbone ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) dans les peuplements d'eucalyptus.

<i>Espèce</i>	<i>Pays</i>	<i>Mode de gestion</i>	<i>Pool</i>	<i>C_Stock</i>	<i>Références</i>
<i>E. globulus*</i>	Ethiopie	Chronoséquence de 11 à 60 ans, gestion en taillis avec rotation tous les 5-7 ans, sélection de brins (1 à 3 par souche) ou non selon les objectifs	aérien (taillis de 4 ans)	16.1	Zewdie <i>et al.</i> , 2009
<i>E. saligna</i>	Brésil	Gestion en taillis (6-10 ans de 1944 à 1997) et replantation en 1998 avec apport de fertilisation	sol 0-30 cm	40 à 43	Maquere <i>et al.</i> , 2008
<i>E. Globulus</i>	Australie	Gestion en taillis	aérien racinaire	6 à 11.1 1.8 à 5.55	Sochacki <i>et al.</i> , 2007

<i>Espèce</i>	<i>Pays</i>	<i>Mode de gestion</i>	<i>Pool</i>	<i>C_Stock</i>	<i>Références</i>
<i>E. occidentalis</i>					
<i>E. urophylla</i>	Brésil	Chronoséquence (âge max 34.2 ans) établie sur un pâturage dégradé	sol 0-20 cm	44 à 68	Lima <i>et al.</i> , 2006
<i>E. camaldulensis</i> *	Cameroun	En jachère, âgé de 7 ans	aérien litière racinaire	17.5 2 6.9	Harmand <i>et al.</i> , 2004
Hybride d'E. PF1*	Congo	Chronoséquence d'une rotation de taillis (1 à 7 ans) et futaie	aérien litière racinaire sol (jusqu'à 6m)	≈11 à 16 3.3 4 à 7 pas explicite	Laclau, 2001
Forêts d'E. *	Australie	Forêts naturelles à grands arbres	racinaire		Eamus <i>et al.</i> , 2002
Forêts d'E. *	Australie	Forêts naturelles à grands arbres	aérien racinaire	12.5 à 207.5 ≈19	Snowdon <i>et al.</i> , 2000

Les valeurs des stocks de carbone des espèces accompagnées d'un astérisque indiquent une extrapolation en multipliant les valeurs des biomasses mentionnées dans la référence par le coefficient 0.5

De ces études, on peut conclure que :

- les diverses valeurs de stocks de C citées plus haut résultent de la combinaison de différents facteurs: la diversité spécifique associée à des physiologies différentes, la différence d'habitats et donc de conditions pédoclimatiques que subissent les plante, les modes de gestion qui sont en fonction des objectifs escomptés de ces peuplements ainsi que les moyens à disposition, les différences de l'état de développement (âge du peuplement) auquel les mesures sont effectués, etc. ;
- la plupart de ces études sont menées sur des peuplements naturels ou industriels, gérés en régime de futaie avec de longue période de rotation, contrairement aux peuplements à rotation courte ;
- selon les finalités et les moyens mis à disposition de l'étude, les compartiments de stockage de carbone (aérien, racinaire, litière, matière organique du sol) peuvent être

considérés ensembles ou non ; rares sont les investigations qui renseignent tous ces compartiments.

Toutefois, en tenant en compte les divers facteurs cités plus haut auxquels on ajoute la durée de vie des produits issus de ces peuplements, les biomasses et la matière organique des sols sous eucalyptus favorisent le stockage de C (Cowie, 2006 ; Mathews, 2008). Pour le sol, l'augmentation du stock de C dépend surtout du niveau de stock initial et elle est précédée par une diminution durant les premières décades de la mise en place de la plantation (Turner et Lambert, 1999 ; Paul *et al.*, 2003 ; Laganière *et al.*, 2009)

Modélisation et spatialisation des stocks de carbone sous eucalyptus

Les méthodes de comptabilisation du C sont indispensables pour effectuer les inventaires de gaz à effet de serre au niveau national et investir dans le commerce du C forestier. Cependant, les mesures directes et le suivi des changements du stockage de carbone dans les forêts, particulièrement dans le compartiment racinaire, sont difficiles et coûteux en termes financier et temporel. De même, le C du sol forestier contient un stock important dont le changement avec le temps est difficilement détectable (Polglase *et al.*, 2004 ; Laganière *et al.*, 2009). Ainsi, pour une meilleure compréhension de ces changements et de meilleures prédictions et estimations des quantités de C des plantations forestières à un temps t quelconque dans le futur, les approches de modélisation sont devenues indispensables.

Pour le végétal, divers modèles existent pour prédire la croissance des plantations forestières (Saint-André *et al.*, 2007) incluant : les modèles « process-based », architecturaux et de croissance-production .

- les modèles « process-based » qui se focalisent sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers (flux d'eau, de carbone et de nutriments et interaction entre ces éléments). Ils sont utilisés pour simuler (i) les échanges d'eau et de CO₂ entre le peuplement et l'atmosphère et (ii) la production primaire nette en utilisant des données météorologiques, pédologiques, physiologiques et de la structure de la canopée. Ex : Biomass, G'day, ProMod, 3PG, CenW, Triplex, Cabala, Castanea ;
- les modèles architecturaux qui traitent la croissance botanique des arbres : croissance des bourgeons, ramification et mortalité. En simulant l'architecture en 3D des plantes, ils sont utilisés pour différentes applications comme les biomécaniques et les études de paysage. Ex : Amap, L-Systems

- les modèles de croissance et de production qui sont utilisés dans la gestion des forêts naturelles et forêts plantées. Basés sur des relations basiques où l'accroissement du diamètre et en hauteur ainsi que la mortalité sont fonction de la potentialité du site et des pratiques sylvicoles, ils sont surtout destinés à la simulation de la croissance de l'arbre et du peuplement sous différents régimes sylvicoles. Ex : Ptaeda2, Nitgro, fagacees, Globulus, Eucalypt-Dendro. Ce dernier est un modèle de dynamique des peuplements, actuellement développé au Congo, visant à évaluer la productivité et la durabilité des plantations d'Eucalyptus. En l'état actuel (Saint-André, 2004), Eucalypt-Dendro est constitué par une chaîne de modèles qui comprend 3 sous-modules destinés à évaluer (i) la croissance des arbres, (ii) la biomasse et les propriétés du bois et, (iii) les teneurs en éléments minéraux dans le bois.

Pour le compartiment sol (synthèses dans Billet, 2005 et Saint-André *et al.*, 2007), des modèles de simulation de la matière organique du sol (MOS) et de prédiction de réponse possible de la MOS au changement global ou au mode d'usage des terres (dynamiques du carbone) ont été développés depuis les trente dernières années :

- certains modèles sont orientés vers les organismes (organism-oriented models) et simulent les passages de la matière ou de l'énergie à travers différents groupes d'organisme du sol. Ils décrivent plus précisément quelques mécanismes spécifiques dans le sol, dont les dynamiques des microorganismes. La biomasse microbienne est séparée en divers types fonctionnels ; ces biomasses sont considérées comme des compartiments de matière organique
- la plupart de ces modèles (process-oriented models) se focalisent sur le processus impliquant le mouvement et les transformations de la matière en énergie. Ces modèles fonctionnent à un pas de temps mensuel et considèrent différents compartiments de matière organique qui sont caractérisés par leur nature et vitesse de minéralisation. Les plus utilisés sont Century (Parton *et al.*, 1987 ; Parton et Rasmussen, 1994) et RothC (Jenkinson et Rayner, 1977 ; Jenkinson, 1990). Le premier a été développé pour des simulations à long terme (décade à siècle) de la dynamique de la matière organique du sol et des cycles de l'azote, du phosphore et du soufre. Originellement développé pour les prairies américaines, il a été depuis étendu aux autres cultures, aux forêts (même tropicales) et savanes. Century comporte des sous-modèles « sol », « hydrique » et « plante ».

RothC diffère peu de Century (même structure, légère différence entre les paramètres) et utilise un pas de temps mensuel pour calculer le C total, la biomasse microbienne sur une échelle de un an à un siècle. RothC divise le carbone du sol en quatre fractions actives et une petite dernière qu'est la fraction inerte de la matière organique (résistante à la décomposition). Ces fractions sont : le matériel décomposable de la plante (DPM), le matériel résistant de la plante (RPM), la biomasse microbienne (BIO) et la matière organique humifiée (HUM). Chaque fraction se décompose par un processus du premier ordre avec son propre taux de décomposition.

RothC et Century sont largement utilisés pour simuler les changements de stocks de C du sol à l'échelle nationale ou régionale ; cependant la disponibilité des données nécessaires limite souvent ces utilisations. Synthétiquement, les données de base utilisées regroupent : la végétation originelle, l'historique de l'utilisation des terres (ancien, récent, actuel et futur), le climat, le sol et la latitude.

Plus récemment, des intégrations d'une suite de modèles originellement basés sur des sous-modèles empiriques considèrent dans leur ensemble les modèles sur la croissance végétale et ceux sur la dynamique des matières organiques du sol ; parmi eux : *FullCAM* ou Full Carbon Accounting Model, développé par le National Carbon Accounting System en Australie. FullCAM est développé (et en cours d'amélioration) pour prédire les changements du stockage de C dans la biomasse, la litière et le sol des écosystèmes forestiers et agricoles (Paul et Polglase, 2004 ; Polglase *et al.*, 2004).

Si la modélisation des stocks de C est importante pour comprendre les facteurs contrôlant le stockage de C en vue d'une augmentation des puits de C forestiers, la spatialisation est intéressante pour améliorer les estimations de ces stocks de C. Effectivement, dans le cadre du marché du C, la cartographie des stocks de C permet de fournir des informations explicites sur leur distribution et aussi de réduire les incertitudes liées aux estimations issues des échantillonnages et inventaires. En général, les approches pour produire les cartes de stock de C recourent (i) soit en attribution une valeur moyenne par unité cartographique (de forêt ou de sol) et de la multiplier par la superficie de l'unité en question ; (ii) soit en considérant une certaine quantité de données (thématique et spatiale) utilisées dans une modélisation combinée à un système d'information géographique afin de produire plus précisément une distribution des stocks de C. La plupart des spatialisations du carbone forestier sont effectuées à de petite échelle cartographique (Batjes, 1996 ; Bourgeons *et al.*, 1999 ; FAO, 2002 ; Schwartz et Namri, 2002 ;

Easter *et al.*, 2007 ; Blackard *et al.*, 2008) et des études à plus grandes échelles cartographiques sont recommandées pour avoir plus de fiabilité dans la quantification du C.

LES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS A MADAGASCAR ET CONTEXTE DE L'ETUDE

L'importance socio-économique des plantations d'eucalyptus à Madagascar

Les eucalyptus ont été introduites à Madagascar au début du 20^{ème} siècle avec l'ouverture de la route de la côte Est malgache (Bigot *et al.*, 1992). Les plantations se sont poursuivies jusqu'en 1960, fin de la colonisation et même après pour diverses raisons : au début pour l'approvisionnement en bois de la locomotive à vapeur, ensuite pour les marquages fonciers à titre particulier ou collectif, en réponse aux devoirs nationaux et enfin pour la satisfaction en besoins énergétiques.

Avec une soixantaine d'espèces introduites à l'époque (Gueneau, 1969 ; Bertrand, 1999 ; (Carriere and Randriambanona, 2007), les superficies plantées n'ont cessé de s'accroître, estimées à 147 000 ha en 1999 (Randrianjafy, 1999) et à 150.400 ha en 2005 (communication interne de certaines ONG américaines partenaires du Ministère malgache de l'Environnement, des Eaux et Forêts), et regroupent plus de 180 espèces. Parmi ces diverses espèces d'eucalyptus, douze sont prouvées comme prometteuses pour la production de bois d'œuvre, d'industrie et énergie : *Eucalyptus robusta*, *E. camaldulensis*, *E. grandis*, *E. citriodora*, *E. cloeziana*, *E. corymbosa*, *E. eugenioides*, *E. macrorhyncha*, *E. maculata*, *E. microcorys*, *E. tereticornis* et *E. torelliana* (Randrianjafy, 1999). Mais, *E. robusta* a marqué une extension particulière grâce à sa faculté d'adaptation et d'aptitude à pousser avec vigueur sur des sols compacts, tout en résistant au feu (Jacobs, 1982; Randrianjafy, 1993). En effet, cette essence tient une place importante pour les communautés malgaches : elle fournit du bois de chauffe, du bois de construction et du charbon notamment pour les milieux urbains et, essentiellement, contribue à l'amélioration des conditions de vie des communautés rurales grâce aux revenus qu'elle génère (CIRAD, 2006; Carriere and Randriambanona, 2007). Les plantations peuvent être à titre particulier (héritage familial), villageoise (Ramamonjisoa, 1999) et rarement industrielles (Ramakavelo, 1999).

Selon les données de l'USAID en collaboration avec le Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts (USAID, 2006), la consommation actuelle de bois (incluant tous les types de produits : bois de chauffe, charbon, etc.) est importante à Madagascar. En 2005, elle est estimée à 21,7 millions de m³ par an pour une population de 17,1 millions versus une production potentielle annuelle de 23,5 millions de m³. Selon la disponibilité des données, presque 40% de la production

en charbon est assurée par les plantations d'eucalyptus. La consommation énergétique reposera certainement encore pendant quelques décennies sur le bois d'énergie (MEF, 2000).

Le mode de gestion des anciens taillis d'eucalyptus des Hautes Terres Malgaches

Les forêts à courte durée de plantation pour la production de biomasse bioénergie présentent des intérêts socio-économique et écologique dans différents pays (Sims *et al.*, 2001; Hoffmann and Weih, 2005). Ceci correspond au régime sylviculture de taillis qui constitue une des principales formes des peuplements forestiers. Ce type de peuplement est à mode de reproduction végétative, essentiellement par rejet de souche, ou parfois aussi par drageons.

De nombreuses plantes ont en fait élaboré des organes protecteurs souterrains qui permettent à l'individu de produire de nouvelles pousses si la partie aérienne est détruite par un quelconque type d'accident. La grande majorité des eucalyptus (dont *E. robusta*) ont développé un organe protecteur très efficace, appelé « lingotuber » qui leur permet d'émettre des rejets et géré en taillis (James, 1984). Plus la plante présente d'important lignotubers, plus elle peut vivre 200 ans ou plus (Jacob, 1982)

Sur les Hautes Terres de Madagascar, grâce à l'aptitude de l'*E. robusta* à rejeter, les souches sont coupées régulièrement (régime sylvicole de taillis) pour la production de charbon et de bois de chauffe. Suite à l'augmentation incessante de la demande en bois (charbon de bois, bois de chauffe et de construction), la durée de rotation est devenue très courte ; elle s'est réduite de 3 à 5 ans (selon les besoins financiers des propriétaires) si auparavant ce cycle était de 6 à 7 ans, il s'est réduit à 2 à 3 ans depuis quelques années (Bertrand, 1992). On doit dire que l'écosystème considéré est soumis à une exploitation intensive puisque :

- les pieds (dont certains sont âgés de plus d'un siècle) n'ont pas été renouvelés depuis leur mise en place,
- les peuplements restent livrés à eux-mêmes : aucune pratique d'entretien sylvicole
- la litière de feuilles décomposées d'eucalyptus (localement appelée « fongo ») sont récupérés ou vendus comme engrais de complément, sous forme de fumure organique qui sera épandue dans les rizières ou même au niveau des versants cultivés (Bertrand, 1999).

La représentation simplifiée des plantations d'eucalyptus malgaches en vue de l'étude de son importance environnementale.

Rappelons que les forêts et les plantations forestières jouent un rôle majeur dans la régulation des cycles de nutriments et de carbone, et il est d'un grand intérêt d'estimer précisément les potentialités de stockage de C de ce secteur forestier (Richards and Stokes, 2004), aussi bien dans leur biomasse que dans le sol.

Dans les études d'évaluations des stocks de C terrestre et au vu de l'évaluation de l'importance du service environnemental, la séquestration de C que l'écosystème forestier peut rendre, le C est partitionné en composantes vivantes, litière et sol (Roxburgh *et al.*, 2006). Cette partition se fait particulièrement en *pools* ou compartiments : biomasses (aérienne et racinaire), matière organique morte (bois mort et litière), matière organique des sols ; le choix des *pools* à estimer dépendant de l'importance du compartiment considéré (IPCC, 2006).

En conséquence, pour étudier d'une manière simplifiée l'écosystème terrestre (notamment dans le cadre du MDP), on adopte cinq compartiments du système au sein desquels des mesures d'évaluation sont réalisées ; ce sont : les feuilles, le tronc, les racines, la biomasse morte (litière) et le sol minéral.

L'une des méthodes d'évaluation des stocks de C préconisée dans le cadre du MDP-foresterie ou pour simple inventaire des GES dans le secteur de l'UTCF est la méthode de différences de stocks de C dans les cinq compartiments mentionnés ci-dessus (IPCC, 2006). Il s'agit en fait d'une estimation de la différence des stocks totaux de carbone de la biomasse à deux points temporels t_2 et t_1 . La méthode se base sur le fait que les variations des stocks de C dans l'écosystème se font généralement - mais non exclusivement - via un échange de CO_2 entre la surface de la terre et l'atmosphère : d'autres processus de transfert de C, comme la lixiviation, sont considérés comme négligeables.

Par ailleurs, rappelons qu'il existe des facteurs importants qui pourraient affecter la capacité de stockage de carbone de l'écosystème forestier, en particulier les plantations forestières. En outre, en considérant le mode de gestion local des plantations d'eucalyptus des Hautes Terres Malgaches en vue de l'étude de leur potentialité en termes de stockage de C, on doit tenir compte que :

- (i) le fait d'exporter tous les résidus d'exploitation, peut amener à la diminution de la concentration en matière organique du sol et affecterait donc la durabilité de la plantation

d'espèce à croissance rapide (Huntington and Ryan, 1990; Ranger *et al.*, 2002; Corbeels *et al.*, 2005; Merino *et al.*, 2005) car le retour des macroéléments au cours des rotations (Mendham *et al.*, 2003) est perturbé ;

- (ii) par rapport à l'existence d'un compartiment racinaire jugé important pour ces souches qui peuvent être âgées d'environ un siècle, on doit savoir que la partie racinaire des plantes représente une part importante des stocks de C (Robinson, 2007) mais que ce compartiment a toujours été sous-estimé (Albrecht *et al.*, 2002) . En effet, les forêts âgées accumulent du carbone pendant des siècles et contiennent de larges quantités de C (Luyssaert *et al.*, 2008). Mais le temps de résidence d'une unité de C varie d'un compartiment à l'autre, le plus longtemps étant pour la biomasse ligneuse et le sol (Roxburgh *et al.*, 2006).

En tenant compte du contexte des Hautes Terres malgaches sur la conduite des taillis d'eucalyptus relativement âgés et pour pouvoir étudier leur contribution au service environnemental (Martin, 2003) en termes de stockage de CO₂, une représentation simplifiée de ces taillis est proposée, selon la **figure 0.8**.

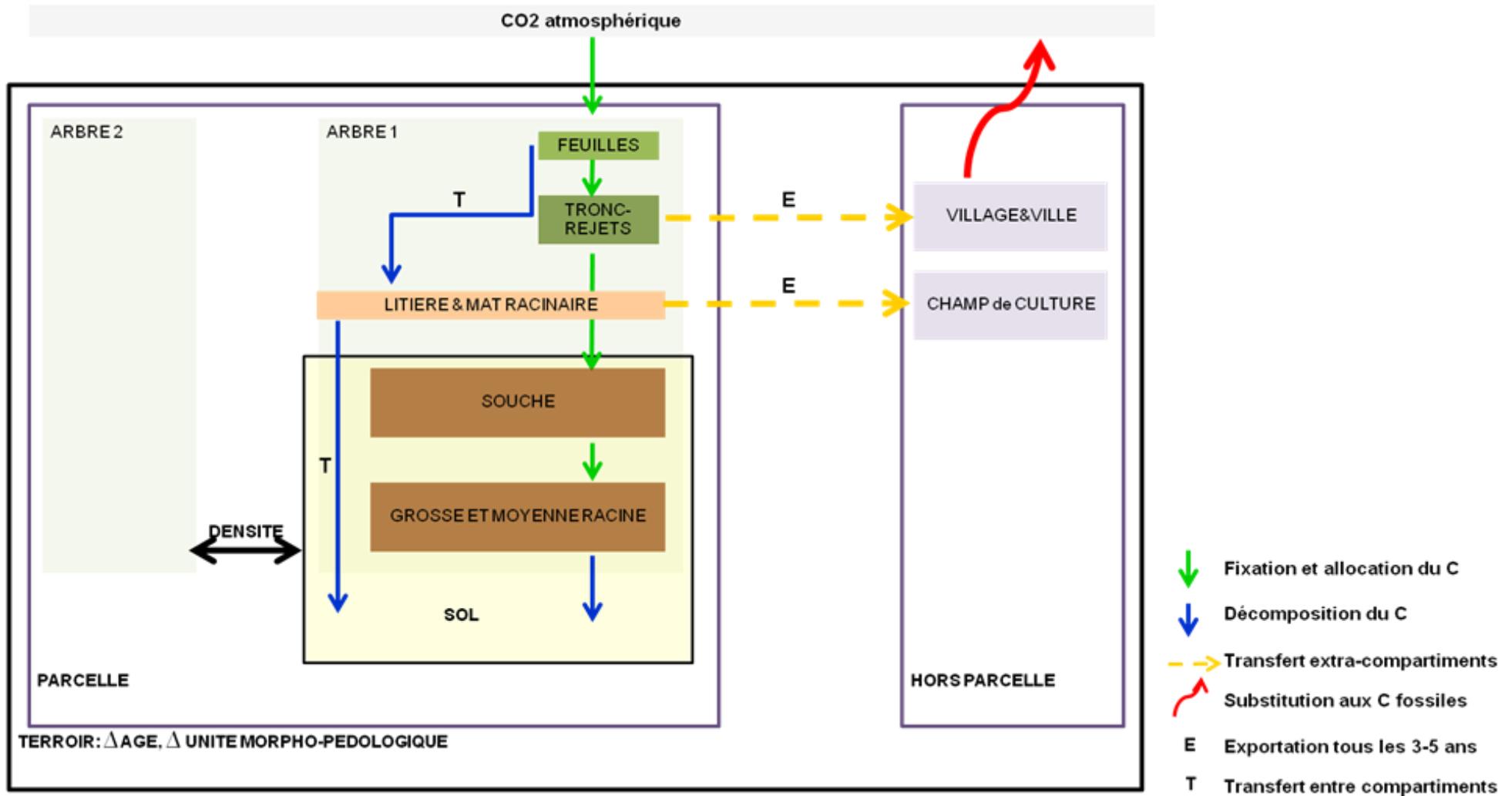


Figure 0.8 Représentation simplifiée du fonctionnement des taillis d'eucalyptus des Hautes terres Centrales Malgaches.

La représentation simplifiée de l'écosystème des taillis d'eucalyptus nous amène à considérer différentes échelles pour mieux appréhender le service environnemental :

- l'échelle de l'arbre où l'on peut distinguer deux catégories de compartiments :
 - les compartiments non pérennes : constitués par les feuilles et petites 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 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'ha qui peut varier,
 - la litière : qui se confond avec le mat racinaire ; rappelons qu'une certaine quantité de C de la litière est perdue au niveau de la parcelle et est exportée pour la valorisation en fumure organique,
 - le sol : approvisionné en C par la décomposition de la partie restante de la litière (après minéralisation et exportation hors parcelle) et aussi par les exsudations racinaires ainsi que la décomposition d'une partie de la biomasse racinaire après la récolte des rejets,
- à l'échelle du terroir où :
 - dans le cadre hors parcelle, on a la capacité de ces taillis d'eucalyptus en tant que bioénergie à éviter les émissions par la combustion des énergies fossiles,
 - on a la variation de l'âge des parcelles de plantation d'eucalyptus et aussi la variabilité morpho-pédologique.

L'évaluation des potentialités de stockage de C des taillis d'eucalyptus sera appréhendée en respectant cette représentation simplifiée de leur fonctionnement.

OBJECTIFS ET HYPOTHESES DE L'ETUDE

Les objectifs de la présente étude sont ainsi les suivants : (i) de mesurer les stocks de C dans le système biomasse-sol des plantations d'*E. robusta* pour une chronoséquence déterminée, (ii) d'analyser le potentiel des plantations d'Eucalyptus à stocker du C par rapport aux autres modes de gestion de la terre (pratiques traditionnelles de cultures annuelles et les pseudo-steppes à dominance d'*Aristida* et de *Philippia*), (iii) de comprendre et d'identifier les facteurs contrôlant le stockage de C dans la biomasse et dans la matière organique du sol des taillis d'eucalyptus, (iv) de caractériser les stocks de C (plante-sol) à l'échelle de la CR de Sambaina en établissant des cartes précises de la végétation et des sols, (iv) en se basant sur les investigations effectuées dans la Commune Rurale de Sambaina, essayer de développer un scénario MDP (Mécanisme pour un Développement Propre) dans la CR de Sadabe qui est considérée comme un front d'afforestation dans des conditions pédoclimatiques similaires à celles de la CR de Sambaina.

Les hypothèses testées au cours de cette étude se formulent comme suit :

- 1- des méthodologies adéquates peuvent être développées pour mesurer plus précisément les biomasses des taillis d'eucalyptus ;
- 2- les taillis d'eucalyptus permettent d'augmenter les stocks de C, dans leur biomasse et dans le sol, par rapport aux autres modes d'usage des terres (culture/jachère et pseudo-steppe) ;
- 3- les résultats des études sur la chronoséquence de plantation d'eucalyptus permettent d'identifier les facteurs contrôlant le stockage de C dans ce type d'écosystème et par la suite, de comprendre sa structure spatiale;
- 4- les études effectuées au niveau de la CR de Sambaina peuvent être répliquées dans la CR de Sadabe en vue d'un développement de scénario MDP.

Après avoir présenté les méthodologies générales recourues au cours de cette étude (chapitre 1), l'hypothèse 1 a été testée par le développement d'approches adéquates pour la mesure de la biomasse de plantation d'eucalyptus en taillis où des mesures directes ont donc été effectuées sur un certain nombre de situations (Chapitre 2).

L'hypothèse 2 a été ensuite testée par la mesure des stocks de C de la biomasse et le sol des taillis d'eucalyptus (avec application des méthodes développées dans le chapitre 2) en comparaison avec les situations sous culture/jachère et pseudo-steppe (chapitre 3).

Les résultats des chapitres 2 à 4 ont été par la suite considérés pour vérifier la possibilité de modéliser et de comprendre la distribution spatiale de ces stocks de C de ces taillis d'eucalyptus (hypothèse 3, Chapitre 4).

Finalement, la répliquabilité des résultats de l'étude de la chronoséquence des plantations d'eucalyptus de la CR de Sambaina (hypothèse 4) a été testée en les appliquant sur les données disponibles de la CR de Sadabe (partie incluse dans le chapitre 5).

Cette étude comprend en conséquence 5 chapitres :

- **Chapitre 1** : Méthodologies générales pour étudier le stockage de C de la biomasse et du sol des taillis d'eucalyptus des Hautes Terres Centrales de Madagascar ;
- **Chapitre 2** : Méthodologie pour la quantification de la biomasse aérienne et racinaire des plantations d'eucalyptus des Hautes Terres de Madagascar ;
- **Chapitre 3** : Analyse de la fonction puits de C des plantations d'eucalyptus des Hautes Terres de Madagascar ;
- **Chapitre 4** : Modélisation et distribution spatiale des stocks de C dans les plantations d'eucalyptus des Hautes Terres malgaches : approches de régression multiple ;
- **Chapitre 5** : Conclusions, limites et perspectives sur les résultats obtenus au cours de cette étude.

Le chapitre 2 a été rédigé en anglais et a été soumis à la revue internationale « Biomass & Bioenergy ».

Le chapitre 3 a été soumis et accepté comme article à la revue « Bois et Forêts des Tropiques ».

Le chapitre 4 a été rédigé en anglais : le résumé a fait objet d'une soumission à une conférence internationale prévue pour l'année 2010 (Leicester, UK) intitulée « Ninth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences » et le papier entier sera soumis très prochainement à la revue « Geoderma ».

**CHAPITRE I. MATÉRIELS ET MÉTHODES ; RESULTATS
INTRODUCTIFS**

1.1. PRESENTATION DES MILIEUX D'ETUDE

1.1.1. Présentation générale

Madagascar, troisième île du monde par sa superficie (587041 km²), est située dans l'Océan Indien entre 43° et 50° longitude Est et 12° et 25° latitude Sud. Elle est séparée de la côte orientale de l'Afrique par le canal de Mozambique, large de 400 à 1000 km. L'île est constituée, pour les 2/3 environ, de socle ancien composé de roches granito-gneissiques principalement sur les Hautes Terres. A part quelques zones à roches volcaniques, le 1/3 restant sont des roches sédimentaires qui se trouvent principalement le long de la côte Ouest (Bourgeat et Zebrowski, 1973 ; Segalen, 1994 ; Randriamboavonjy, 1996).

1.1.1.1. Relief

Il existe différentes classes d'altitude et de types de paysages à Madagascar (Figure 1.1a). Les reliefs accidentés liés au socle ancien se rencontrent sur la façade orientale (entre 200 et 900 m, elle-même séparée des Hautes Terres par une falaise abrupte) et s'étendent jusque sur les Hautes Terres. Des plateaux, vastes bassins, collines (800 à 1800 m), reliefs culminant à plus de 2000 m du Nord au Sud se rencontrent sur ces Hautes Terres. La façade occidentale présente une pente plus douce et est dominée par de vastes plaines et plateaux calcaire à 900 m d'altitude.

1.1.1.2. Climat

En raison de sa position dans l'Océan Indien, Madagascar est soumise à la double influence de l'alizé du Sud-Est et de la mousson du Nord-Est (à l'exception de la partie Sud-Ouest de l'île). L'île offre donc une diversité de types de climats (**Figure 1.1b**), allant du perhumide au semi-aride en passant par le tropical des montagnes de haute altitude. La moyenne annuelle des températures varie de 24 et 27°C et les précipitations diminuent d'Est en Ouest et on rencontre généralement deux saisons: la saison sèche et fraîche (d'avril en octobre) et la saison de pluie chaude (de novembre à mars). On distingue cinq régions climatiques avec le gradient Est-Ouest :

- La région de la littorale orientale (incluant l'extrême Nord-Ouest du bas de Sambirano) sous l'influence de l'alizé où se rencontre le climat perhumide (chaud et humide) avec une courte saison sèche : température et pluviosité moyennes annuelles de 24°C et 1100 mm respectivement ;

- La région centrale des Hautes Terres présentant un climat humide à sub-humide (tropical d'altitude) où les deux saisons sont bien distinguées (hiver frais et sec+été chaud et humide). Les températures et pluviosités moyennes annuelles sont de 16 à 22°C et 900 à 1100 mm respectivement ;
- La région occidentale à climat de type tropical, moins arrosée avec une saison sèche très marquée (température moyenne annuelle de 24 à 27°C et pluviosité de 1650 à 400 mm suivant le gradient Nord-Sud) ;
- La partie méridionale (Sud-Ouest et Extrême-sud, région à climat semi-aride à aride avec une température moyenne annuelle de 24°C et une pluviosité moyenne de 400 (ou même moins) à 700 mm.

1.1.1.3. Pédologie

En relation avec la diversité de roches mères au niveau de l'île, une large gamme de types de sols existe dans l'île (**Figure 1.1c**). Selon la classification française des sols (CPCS, 1960), ces sols sont principalement : les sols ferrallitiques, les sols ferrugineux, les sols hydromorphes et les sols alluvionnaires (Roeder et Bourgeat, 1971 ; Ségalen, 1994). Leurs répartitions et caractéristiques sont résumées comme suit :

- Versant oriental : prédominance des sols ferrallitiques jaunes sur rouge, fortement désaturés, parfois riches en concrétions et en résidus d'altération gibbsitiques, associés à la kaolinite, faiblement micacés et taux de saturation n'excédant pas 30%. On y rencontre aussi les sols tourbeux et des podzols de nappe ;
- Hautes Terres : prédominance des sols ferrallitiques rouges fortement désaturés, à kaolinite et gibbsite. Il existe aussi des sols formés sur alluvions à caractères d'hydromorphie (sols à gley et pseudo-gley) et les sols tourbeux ;
- Versants occidental et méridional : les sols ferrugineux tropicaux y prédominent à kaolinite et les vertisols. On note toutefois la prédominance de sols peu évolués bien saturés et fortement micacés sur les dépôts alluviaux et au large des grandes fleuves se trouvent les sols hydromorphes. Il existe aussi des sols formés sur roche volcanique et des sols calcomagnésiformes.

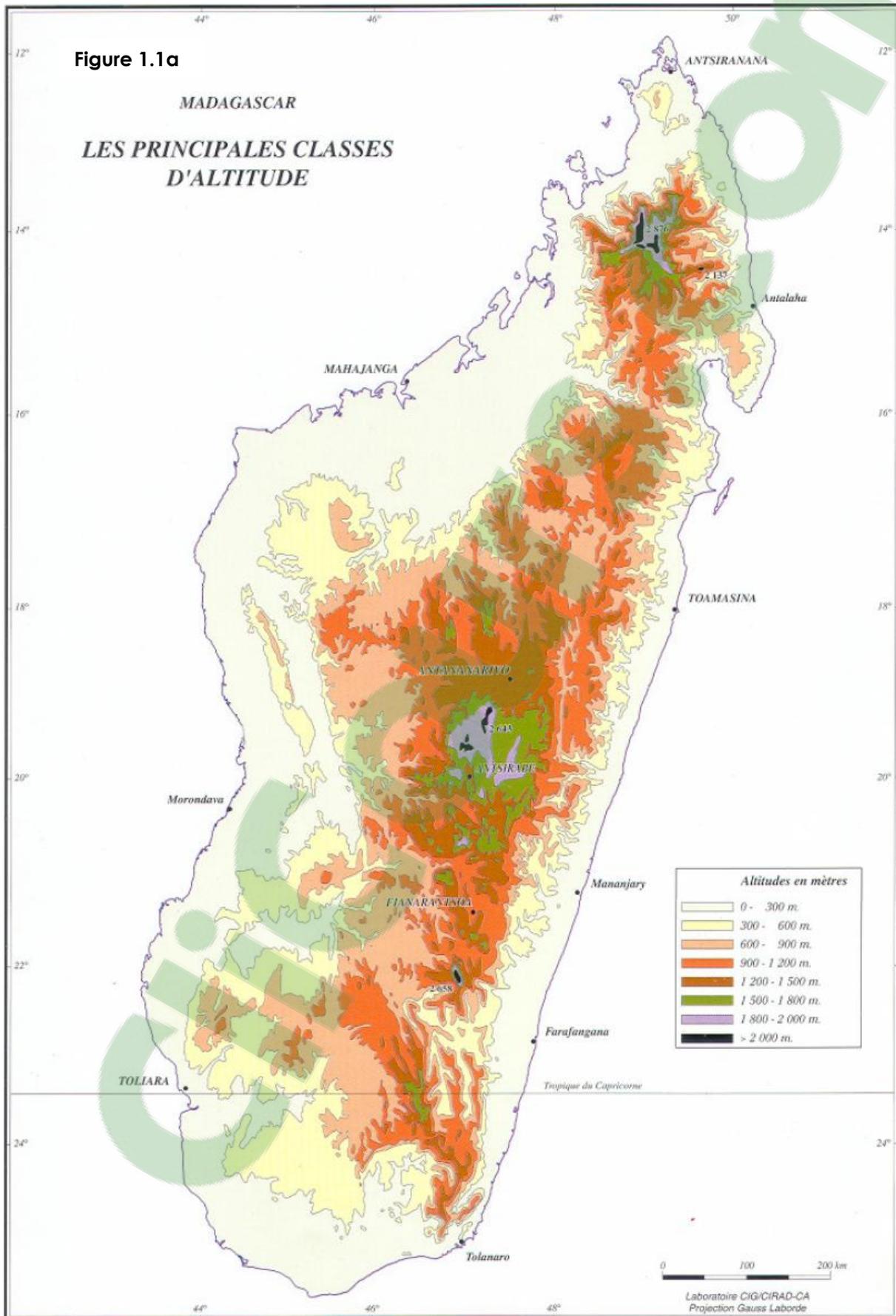


Figure 1.1 Aperçus des cartes sur Madagascar ; (a) relief, (b) climat, (c) pédologie, (d) végétation

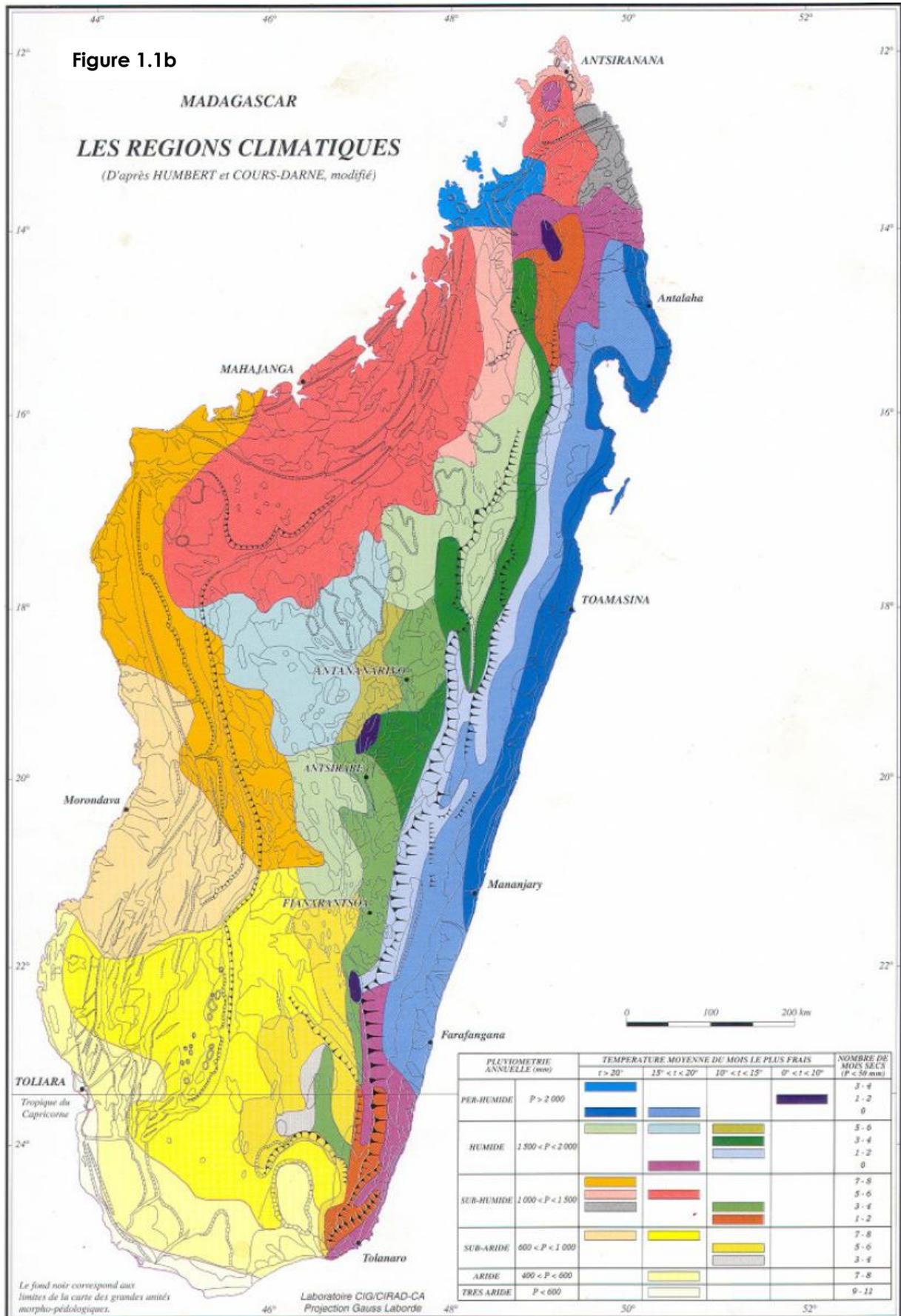


Figure 1.1 Aperçus des cartes sur Madagascar ; (a) relief, (b) climat, (c) pédologie, (d) végétation

Figure 1.1c
PÉDOLOGIE

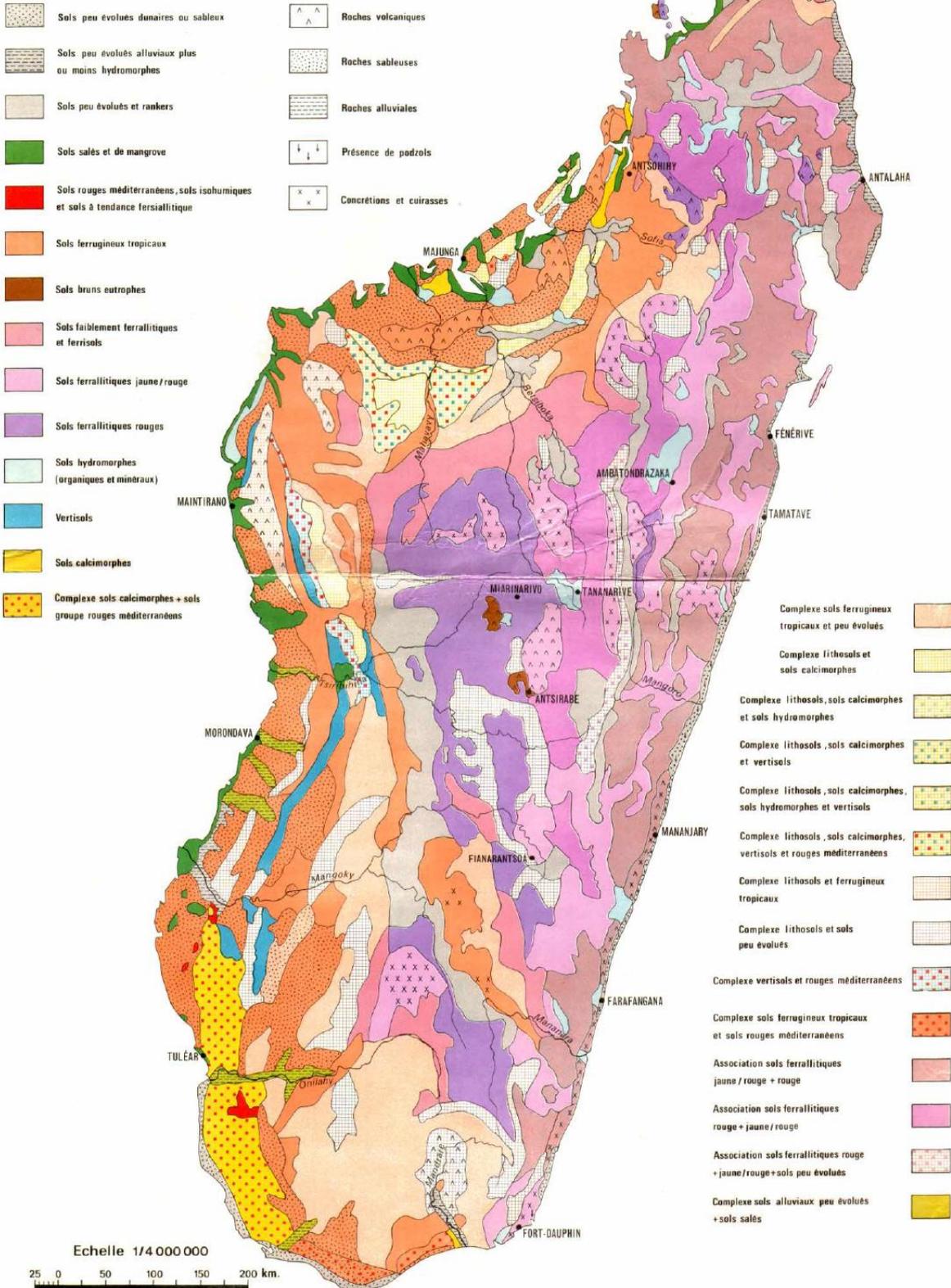


Figure 1.1 Aperçus des cartes sur Madagascar ; (a) relief, (b) climat, (c) pédologie, (d) végétation

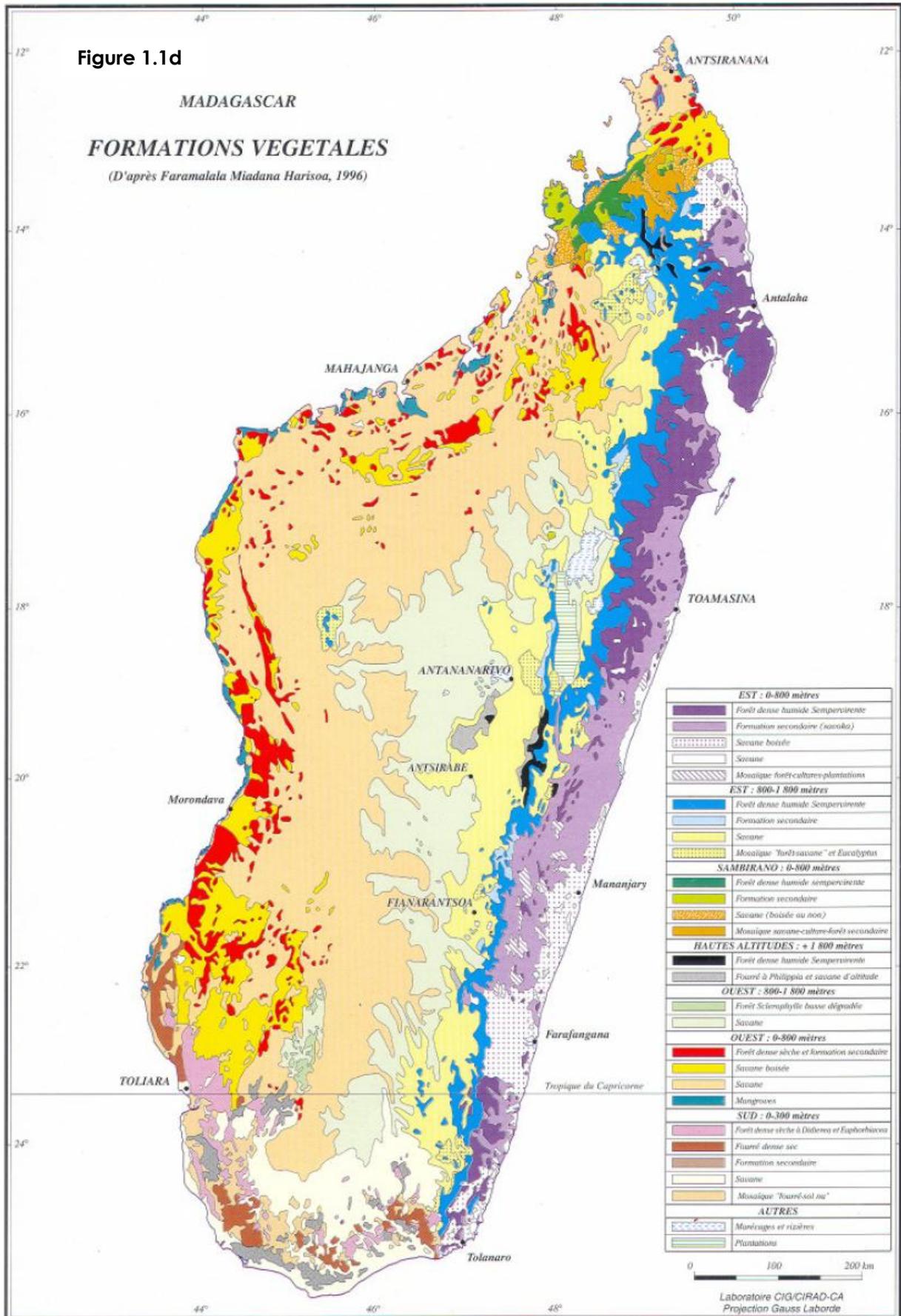


Figure 1.1 Aperçus des cartes sur Madagascar ; (a) relief, (b) climat, (c) pédologie, (d) végétation

1.1.1.4. Végétation

La situation insulaire ancienne fait que Madagascar soit constituée d'espèces végétales d'une haute endémicité, entre 22 et 38% des genres et 82 à 89% des espèces (Humbert, 1959 ; Myers *et al.*, 2000). En fonction du climat et de l'altitude, on rencontre les principales formations végétales suivantes (Figure 1.1d) :

- Forêt dense humide sempervirente : sur le versant Est (Sambirano inclus) avec les familles des Meliaceae, Burseraceae, Combretaceae, Leguminoseae, Ebenaceae, etc. ;
- Forêts dense sèche de l'Ouest où on trouve les Meliaceae, Leguminoseae et essentiellement Uapacaceae ;
- La forêt épineuse Sud qui est une formation végétale spéciale en raison des conditions climatiques arides, caractérisée par des Didieraceae et les Euphorbiaceae.

En outre, on rencontre des formations herbeuses ou pseudo-steppes qui sont très répandues sur les Hautes Terres (nombre d'espèces assez faible parmi lesquelles les plus connues sont *Loudetia simplex*, *Aristida similis*, *A. rufescens*, *Hyparrhenia rufa*, *Heteropogon contortu*) et les formations buissonnantes (sur les zones d'altitude). D'autres formations climatiques-édaphiques existent dans l'île dont les plus importantes sont les mangroves (colonisant les estuaires le long de la côte occidentale) et les forêts littorales le long de la côte Est. Il existe aussi les forêts reliques, notamment de moyennes altitudes et les plantations forestières présentes majoritairement sur les Hautes Terres.

1.1.2. Présentation des Sites d'études

L'étude est menée à Madagascar dans la région Nord-Est d'Analamanga dans le district de Manjakandriana qui est situé à 40 jusqu'à 100 km d'Antananarivo (Figure 1.2). La zone se trouve à une altitude moyenne de 1440 m et présente des moyennes annuelles de 16°C pour la température et 1620 mm pour la pluviosité (Figure 1.3). Le climat est du type tropical d'altitude, caractérisé par deux saisons :

- la saison perhumide ou très humide: de Novembre à Mars où la moyenne mensuelle des précipitations dépasse 100 mm
- la saison fraîche et humide : d'Avril en Octobre, durant laquelle les crachins et les brouillards persistent

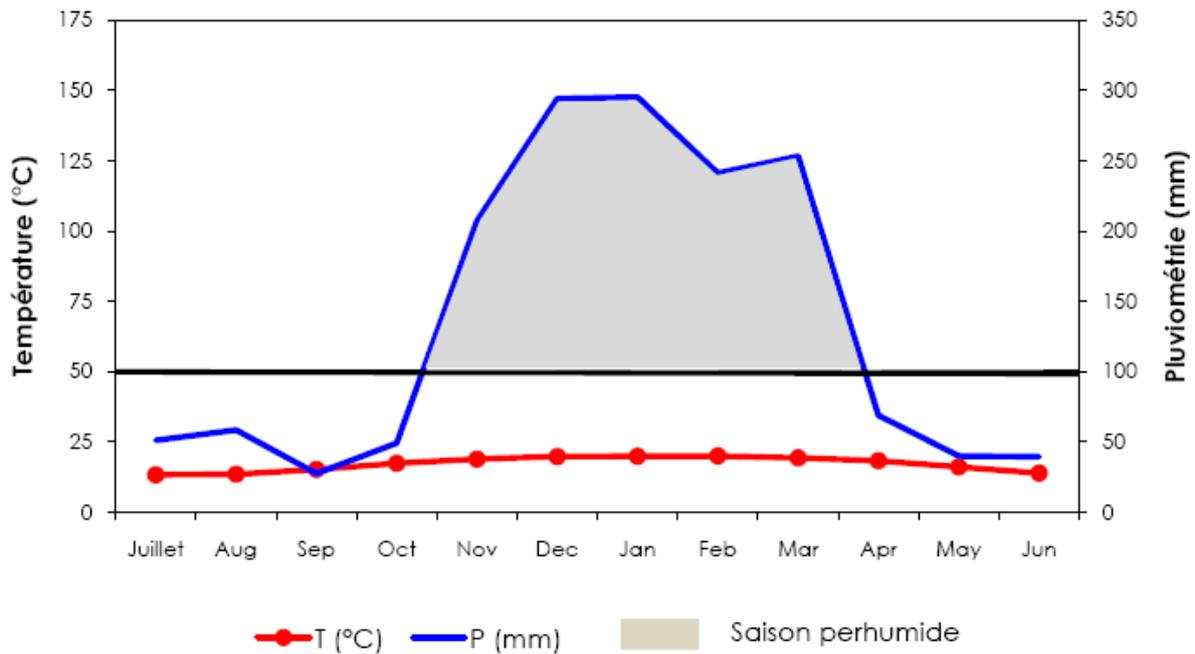


Figure 1.3 Courbes de la température et de la pluviométrie de la région de Manjakandriana (données de 1951 – 1980), Service de la Météorologie, Antananarivo.

Deux sites du district de Manjakandriana, caractéristiques des Hautes Terres malgaches sont concernés par l'étude : ce sont les Communes Rurales (CR) de Sambaina et de Sadabe. Toutes deux sont proches d'Antananarivo (distances de moins de 55 km, Figure 1.3), cependant, l'accessibilité dans chacune fait que les ressources en bois issues des plantations d'eucalyptus ne présentent pas les mêmes stades d'évolution. La CR de Sambaina est bien desservie par la Route Nationale et la voie ferrée qui mènent à Tamatave, une ville d'intérêt économique depuis l'ère coloniale. Ainsi, cette CR témoigne de l'histoire des plantations d'eucalyptus à Madagascar telle qu'il a été mentionné dans le chapitre précédent. Par contre, l'accès à la CR de Sadabe se fait via de pistes secondaires généralement en très mauvais état, lui attribuant la qualité de zone à front d'afforestation.

Des études liées aux modes de gestion des taillis d'eucalyptus ont déjà été effectuées par l'équipe CIRAD-FOFIFA département Forêts dans les années 1990 (CIRAD-FOFIFA Forêts, 1990-1994) pour la CR de Sambaina en menant des expérimentations relatives à la conduite rationnelle des taillis d'*Eucalyptus robusta* dans la région de Manjakandriana ; contrairement à Sadabe où il n'y a eu des premières prospections (communication personnelle de Alain Bertrand, chercheur du CIRAD-Forêt, Madagascar). Les caractéristiques de ces deux sites sont synthétisées dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 Descriptions synthétiques des deux sites d'étude.

	<i>CR Sadabe</i>	<i>CR Sambaina</i>
Coordonnées	Lat. 18° 30-40' S, Long. 47° 41-45' E	Lat. 18° 51-56' S, Long. 47° 45-48' E
Distance % à la capitale	53 km, direction Nord	40 km, direction Nord-est
Superficie	23.100 ha, avec 24 villages	3.000 ha, avec 15 villages
Relief	Chaînes montagneuses espacées des étroites vallées ; ≈1200 à 1500 m d'altitude	Crête, flanc de colline et bas de pente bien individualisés, 1350 à 1750 m d'altitude
Sols	Sols ferrallitiques jaune sur rouge	
Végétation	Les savanes arbustives avec les plantations d'eucalyptus se situent à l'Est de la CR et les savanes herbeuses (à <i>Aristida sp.</i> et <i>Imperata sp.</i>) à l'Ouest.	A part les peuplements d'eucalyptus qui occupent plus de la moitié de la surface de la CR, le paysage comprend des pseudo-steppes qui sont des savanes herbeuse et arbustive à <i>Aphloia theaeformis</i> , <i>Psiadia altissima</i> , <i>Helichrysum sp.</i> , <i>Loudetia sp.</i> , <i>Imperata sp.</i> et <i>Phillipia sp.</i>)
Démographie	18016 habitants	7800 habitants
Socio-économie	<p><u>Agriculture</u> : Riz, manioc, taro, maïs, pomme de terre, ail, tomates et arachides. Rendement très faible, auto-consommation 90 à 98%</p> <p><u>Elevage</u> : bovin, porc ; aviaire</p> <p><u>Foresterie</u> : la fabrication de charbons de bois et de bois de chauffe d'eucalyptus constitue la principale ressource de revenus de la majorité des paysans (notamment à Sambaina), on y rencontre aussi de la menuiserie et de la fabrication de charrettes.</p>	

Source : Rambeloarisoa, 1983 ; Randraianjafy, 1993 ; Randriamboavonjy, 1996 ; PNUD, 2004 ; PSDR UPEP, 2006.

1.2. METHODOLOGIE GENERALE

1.2.1. Les situations étudiées

Des situations ($N = 54$) ont été identifiées pour chaque site à la suite d'enquêtes menées sur le terrain, complétées par des travaux de photo-interprétation (Figure 1.2). Elles représentent les principaux modes d'usage des sols des sites d'étude (tableau 1.2), entre autres : le système originel constitué par la pseudo-steppe et savane (B comme *bozaka*), la rotation culture-jachère (**CJ**) et le taillis d'eucalyptus (E). D'une part, les situations autres qu'eucalyptus ont été utilisées afin d'étudier l'effet du mode d'usage des terres sur le stock de C. D'autre part, les situations sous eucalyptus ont été identifiées pour définir une chronoséquence et analyser l'effet de la durée de plantation sur le stock de C. Les parcelles d'eucalyptus sont âgées de 17 à 111 ans (âge des souches) et sont traitées en régime sylvicole de taillis pour des objectifs de production de bois d'énergie et du charbon de bois. Elles ont courte durée de rotation (5 ans) et subissent des coupes rases à chaque fin de rotation.

1.2.2. Méthode de quantification du C de la biomasse et de la nécromasse

Pour les parcelles sous eucalyptus :

- réalisation d'inventaires dendrométriques dans les parcelles (trois placettes de 10 m x 10 m par parcelle): mesure de la circonférence à la base des souches (Cir), de la circonférence à la hauteur de poitrine de chaque rejet (CHP) sur une souche ainsi que sa hauteur (H) ;
- prise des coordonnées (x , y) des souches de certaines parcelles pour établir les cartes des souches ($n = 9$; Figure 1.4 ; Annexe 1.1) et définir les surfaces d'occupation ou polygone de Voronoï de chaque souche. Le polygone de Voronoï est la surface occupée par une souche en tenant compte de sa distance par rapport aux souches voisines (Photo 1.1).
- étude de la structure du peuplement tout en tenant compte des divers acquis lors des études du CIRAD/FOFIFA-Forêts sur ces taillis et, choix des souches cibles ($n = 27$) qui sont analysées d'une manière destructive. Pour chaque souche cible par placette : (i) coupe de la biomasse de la partie aérienne vivante (feuille, branche et tronc des rejets), (ii) excavation jusqu'à 1m de profondeur de toute la biomasse racinaire (souche proprement dite, grosses racines à $\varnothing \geq 10$ mm, racines moyennes $10 \text{ mm} > \varnothing \geq 2$ mm) contenue dans le polygone de Voronoï.

Tableau 1.2 Caractéristiques des situations étudiées dans les deux sites.

Mode d'usage	N	Espèces	Mode de gestion	Caractéristiques
Eucalyptus	41 (<i>n</i> = 35 à Sambaina et 6 à Sadabe)	<i>Eucalyptus robusta</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Propriétés privées (héritage familiale) à surface variable : de quelques ares à une dizaine d'hectare - chronoséquence (année de référence: 2006) 47 à 111 ans pour les parcelles de Sambaina et 17 à 61 ans pour celles de Sadabe - régime sylvicole en taillis : durée de rotation de 3 à 5ans, sans renouvellement de souches, sans soins sylvicoles, sans apport de fertilisation, exportation de la litière en fin de rotation dans certaines zones (pour la production de fumure organique en substitution des herbes) 	<p>Souche :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Densité de plantation : 700 à 5.200 N.ha⁻¹(moyenne de 2.838 N.ha⁻¹) - Circonférence moyenne par parcelle : 98.5 à 196.6 cm (moyenne de 141.8 cm) <p>Taillis :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Densité des rejets : 7.933 à 24.800 N.ha⁻¹(moyenne de 15.485 N.ha⁻¹) avec en moyenne 6 rejets par souche - Circonférence à Hauteur de Poitrine moyenne par parcelle : 4 à 14.3 cm (moyenne de 7.1 cm) avec une hauteur moyenne de 4.5 m.
Culture/Jachère	6 (<i>n</i> = 4 à Sambaina et 2 à Sadabe)	Manioc, Patate douce, maïs, taro	1 à 3 années de culture suivies de 1 à 2 ans de jachère selon la disponibilité du terrain. Rarement de fertilisation minérale, par contre, apport de fumure organique (fumiers de vache+litière d'eucalyptus)	
Pseudo-steppe	7 (<i>n</i> = 2 à Sambaina et 5 à Sadabe)	<i>Imperata cylindrica</i> <i>Aristida adescensionis</i> <i>Philipia sp.</i> <i>Hyparrhenia sp.</i>		

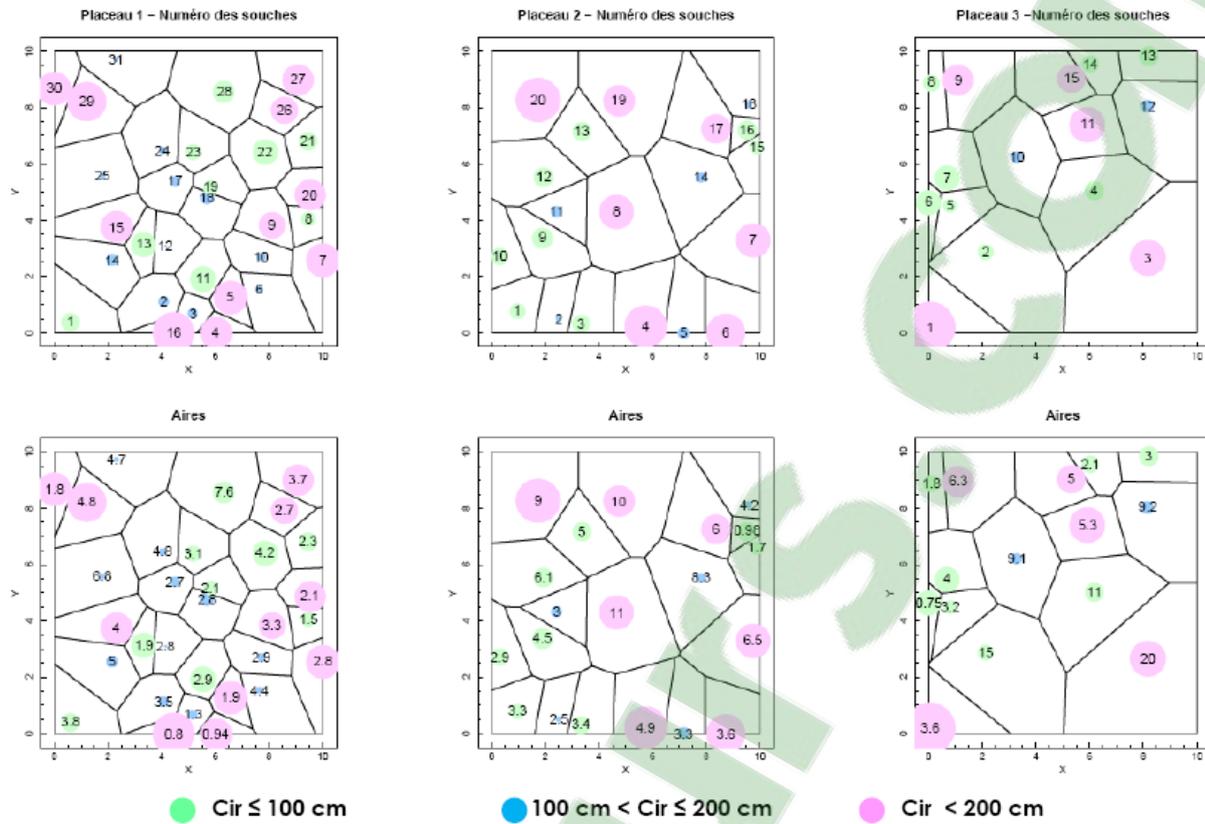


Figure 1.4 Carte des souches d'une parcelle d'eucalyptus âgée de 4è ans. Dessus : circonférence des souches, dessous : valeur des surfaces du polygone de Voronoï.



Photos 1.1 Polygone de Voronoï. Gauche : délimitation, droite : excavation.

La quantification des raines fines ($\varnothing < 2$ mm) est effectuée par prélèvement au cylindre ($\varnothing = 8$ cm et hauteur = 10 cm) jusqu'à 50 cm de profondeur, en raison d'un prélèvement par placette (entre els souches) ;

- pesées de toutes les biomasses fraîches aérienne et racinaire sur le terrain et mesure de la quantité de matière sèche correspondante après échantillonnage et passage à l'étuve à 70°C ;
- établissement du tarif de biomasse et élaboration des équations allométriques qui mettent en relation la quantité de biomasse d'un compartiment défini avec une variable dendrométrique facilement mesurable sur terrain (circonférence) ;
- prélèvement, pesée et détermination de la biomasse de la litière à l'intérieur de chaque placette à l'aide d'un cadre métallique (0,44 cm x 0,44 cm, $n = 3$). Le compartiment de la litière a été séparée en deux couches : O_1 ou litière de l'année (débris végétaux facilement reconnaissable) et O_f+O_h litière ancienne déjà fragmentée et humifiée (confondue avec le mat racinaire) ;

Pour les autres modes d'usage des terres, toute la matière fraîche se trouvant dans une surface définie (0,5 m x 0,5 m, $n = 4$) a été prélevée, pesée et échantillonnée afin de déterminer la teneur en matière sèche.

Pour calculer le stock de carbone pour une unité de surface ($Mg \cdot ha^{-1}$), la densité de biomasse évaluée pour chaque parcelle de mode d'usage est multipliée par le coefficient 0.5.

1.2.3. Détermination du C et des autres caractéristiques physico-chimiques du sol

Les prélèvements de sol sur chaque parcelle, avec 4 répétitions par parcelle, sont effectués à l'aide de cylindre (528 cm^3) et de carottier (Cobra TT Hammer de 8.6 cm de diamètre, Photo 1.2) à 0-10, 10-20, 20-30 et 30-40 cm de profondeur. Chaque horizon prélevé est pesé et mis en sachet hermétique pour leur transport. Au laboratoire, une aliquote est passé à l'étuve sous 105°C pour la détermination de l'humidité et ensuite la densité apparente ; le reste des échantillons est séché à l'air et à l'ombre, tamisé à 2mm et archivé en vue des analyses physico-chimiques (Pansu et Gautheyrou, 2003). Considérant à la fois la quantification du carbone du sol et l'établissement des cartes de carbone selon le paragraphe qui va suivre, ces analyses physico-chimiques regroupent :



Photos 1.2 Manipulation du carottier sur le terrain.

- la mesure du carbone et de l'azote par combustion par voie sèche au microanalyseur élémentaire CHN (Carlo Erba NA 2000),
- la détermination de la teneur en carbone d'un certain nombre d'échantillons via la spectrométrie en moyen infrarouge avec un spectromètre à Transformée de Fourier (Nicolett 6700 FT-IR) (Janik and Skjemstad, 1995 ; Masserschmidt *et al.*, 1999 ; Reeves *et al.*, 2002 ; Coûteux *et al.*, 2003 ; Janik *et al.*, 2007 ; Artz *et al.*, 2008),
- l'étude isotopique du carbone par la méthode de traçage par les abondances naturelles en ^{13}C : analyses effectuées avec l'autoanalyseur EA Eurovector et le spectromètre de masse Isoprime,
- la détermination du pH eau et KCl sur un mélange sol/solution selon le rapport $\frac{1}{2}$,
- la granulométrie, réalisée selon la méthode de pipette après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée à chaud dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium,
- la détermination du complexe d'échange et l'acidité par la méthode de chlorure de cobaltihexammine,
- l'extraction des formes du fer, de l'aluminium et de la silice à l'aide de réactifs sélectifs : (i) le citrate-bicarbonate-dithionite qui permet d'extraire les formes cristallisées et amorphes, notées Fe, Al, Si, (ii) l'oxalate d'ammonium tamponné à pH3 qui extrait les formes

amorphes et microcristallines, notées Fe_{ox} , Al_{ox} , Si_{ox} , et (iii) le pyrophosphate de sodium qui concerne les formes liées à la matière organique (complexes organo-métalliques) notées Fe_p , Al_p . L'indice oxalfe ($oxalfe \% = Al_{ox} + 1/2 Fe_{ox}$) a été éventuellement calculé pour détecter le caractère andique ou non de ces sols.

1.2.4. Etablissement des cartes de carbone

Diverses étapes ont été effectuées afin d'établir les cartes de carbone de la biomasse et du sol de la CR de Sambaina :

- (i) Préparation des données spatiales sur la végétation :
 - des travaux de photo-interprétation ont été effectués à l'aide de la stéréoscopie. Ils concernent trois dates de photos aériennes (1949, 1965 et 1995) issues de l'Institut Géographique de Madagascar (Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara) et qui couvrent la CR de Sambaina. Les différentes classes d'occupation de sol, incluant les âges de plantation d'eucalyptus, sont ensuite interprétées et vectorisées pour être exploitées (sous ArcGIS),
 - des images satellites multi-spectrales sont aussi traitées avec ArcGIS. Elles regroupent des images SPOT à 20 m de résolution (datées de 1999, 2003 et 2006) et une image Quickbird datée de 2006. Elles servent notamment à la détermination des différentes classes de taillis d'eucalyptus.
- (ii) Préparation des données spatiales sur le sol (Bourgeat et Zebrowski, 1973 ; Randriamboavonjy, 1996 ; Legros, 2006) :
 - l'inventaire et l'analyse des données disponibles sur les acquis en géomorphologie et pédologie des zones d'étude ont d'abord été effectués,
 - l'expertise sur terrain combinée aux analyses spatiales utilisant un modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 10 m et l'image satellite Quickbird ont permis de délimiter les principaux types de modelés (Figure 1.5),
 - différents types d'observation directe sur terrain ont été menés :
 - descriptions des sondages à la tarière jusqu'à 120 cm de profondeur et le long d'un certain nombre de transects ($n = 13$, Figure 1.5), à raison d'un sondage tous les 100 m, avec 4 à 9 points de sondages selon la longueur du versant. Les caractéristiques relevées sont particulièrement: la texture, la couleur du sol et profondeur d'apparition des minéraux primaires ;

- descriptions de fosses pédologiques jusqu'à 100 cm de profondeur ($n = 32$) où, en plus des caractéristiques ci-dessus, sont notées au niveau de chaque horizon : la structure, la compacité, la présence d'éléments biologiques (racine, faune) et la transition entre horizons.
 - constitution d'un pédocomparateur (Photo 1.3) présentant la séquence des horizons prélevés pour un profil donné lors des sondages à la tarière, permettant ainsi une amélioration de leur caractérisation physique ;
- des analyses thématiques et spatiales sur les différentes couches spatiales produites ont été par la suite effectuées en recourant au Système d'Information Géographique (SIG),
- (iii) Modélisation et spatialisation des stocks de C sous eucalyptus
- analyse des corrélations entre les valeurs de stocks de C dans les différents compartiments de l'eucalyptus et les diverses variables disponibles qui peuvent les influencer. Ces variables correspondent aux facteurs biophysiques qui caractérisent les parcelles d'eucalyptus, à savoir : âge des souches (Age 1), âge des rejets (Age 2), densité des souches, densité des rejets, Cir, CHP, interaction entre la taille des souches et leur densité (NhaCir), altitude et pente. Cette analyse permet d'identifier les facteurs déterminants le stockage de C dans chaque compartiment de l'eucalyptus ;
 - diverses approches de modélisation ont été testées sur les mesures des stocks de C dans les compartiments végétaux et sol. Ces approches incluent la régression linéaire simple (SM ou simple linear regression model), la régression linéaire multiple (MLM ou multiple linear regression model) et la version améliorée d'arbre de régression (BRT ou boosted regression tree).

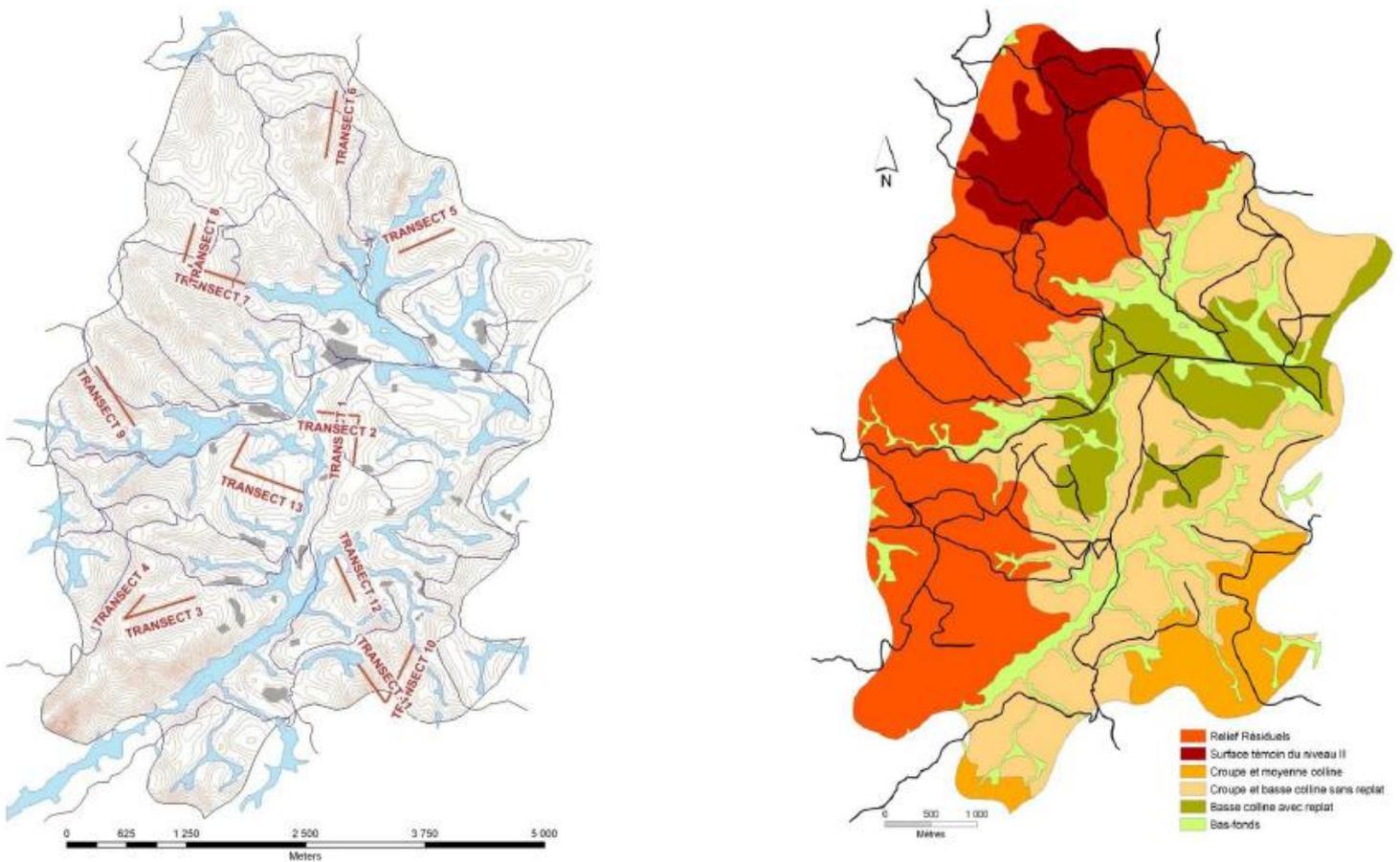
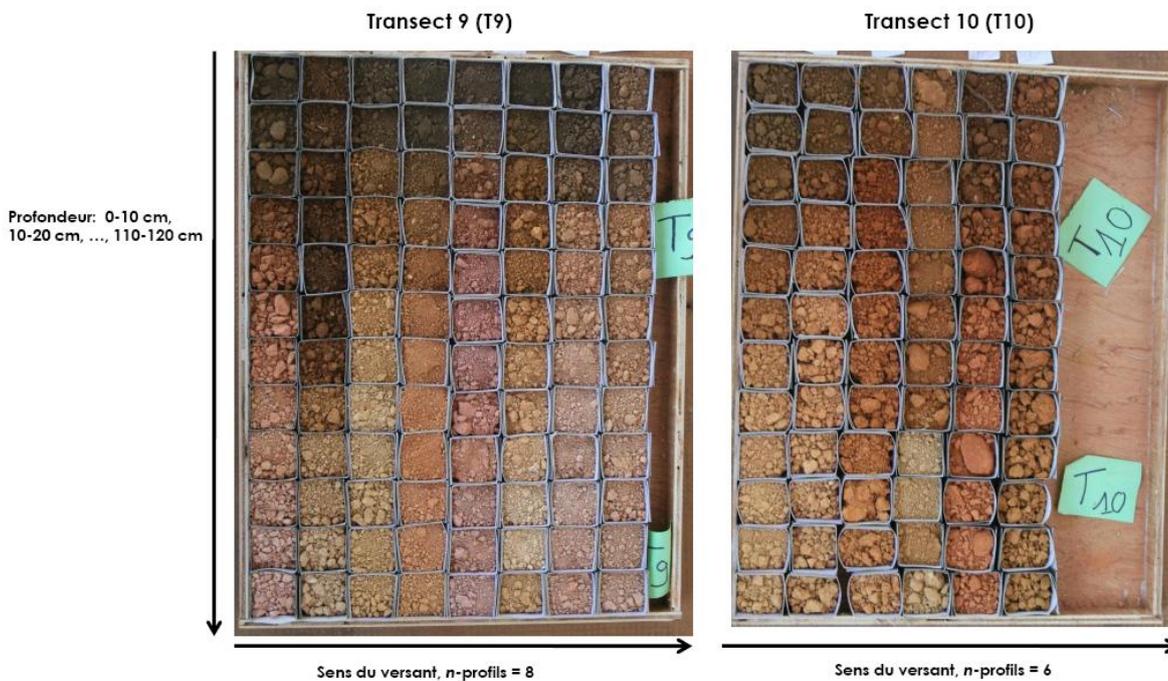


Figure 1.5 Carte des emplacements des transects étudiés lors de l'établissement de la carte des modelés (gauche). Carte des modelés de la CR de Sambaina (droite).



Photos 1.3 Pédocomparateurs issus des prospections sur les transects n° 9 (gauche) et n° 10 (droite).

- pour chaque approche, diverses structures de modèles (considérant un ou plusieurs facteurs) sont développées pour avoir une bonne relation entre les facteurs et les stocks de C d'un compartiment. Le modèle qui présente une meilleure prédiction de valeur de stock pour chaque compartiment de l'eucalyptus est retenu afin d'établir la carte du C à l'échelle de toute la commune,
- en utilisant les logiciels R-stat et ArcGIS, les modèles retenus pour les prédictions de stock de C dans chaque compartiment de l'eucalyptus (aérien, racinaire, sol) sont appliqués sur les couches spatiales (de la végétation, du sol et des facteurs concernés) préalablement établies.

Ces travaux ont été menés au niveau de la CR de Sambaina. Les résultats seront utilisés sur la CR de Sadabe pour une simulation de stockage de carbone ; présentés dans le chapitre VI (conclusions, limites et perspectives) de cette thèse.

1.3. RESULTATS PRELIMINAIRES

Sont présentés dans les paragraphes suivants les principaux résultats préalables à la rédaction des articles correspondants aux chapitres II, III et IV de cette thèse.

1.3.1. Structure des peuplements d'eucalyptus

Sur les neuf parcelles ayant été considérées lors de l'établissement des relations allométriques, la moyenne des circonférences des souches (Cir) est de 141.2 cm (Figure 1.6). Pour les 828 souches inventoriées, seulement une vingtaine présentent des Cir supérieures à 300 cm et environ moins de soixante-dix présentent des circonférences (Cir) en dessous de 50 cm. Le nombre de rejets par souche varie de 1 à plus de 20 rejets.souche-1 (moyenne de 6 rejets.souche-1) correspondant à une circonférence à hauteur de poitrine (CHP) moyenne de 8.7 cm (Figure 1.7). Les dimensions des rejets sont celles de parcelles à taillis âgés de 3 à 5 ans.

Les classifications des souches selon les études du CIRAD-FOFIFA-Forêts dans les années 1990 (Cirad-Fofifa-forêts, 1990-1994) ont été reprises dans le cadre de cette étude : petites (Cir \leq 100 cm), moyennes (100 cm < Cir \leq 200 cm) et grosses souches (Cir > 200 cm). L'analyse de l'évolution des pourcentages de ces différentes classes en fonction de la durée de plantation n'est pas concluante (Figure 1.8) ; l'effet de la densité de plantation semble masquer cette évolution temporelle.

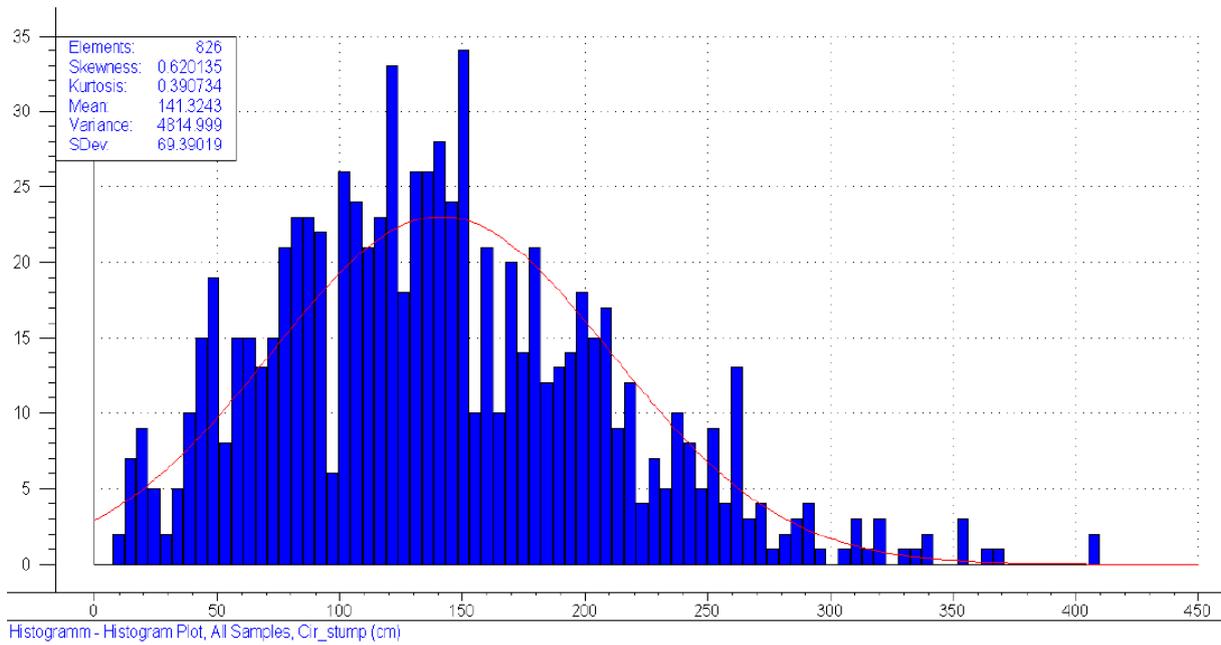


Figure 1.6 Histogramme de fréquence des circonférences des souches (Cir, cm) dans les neuf parcelles considérées lors de la mesure destructive de la biomasse.

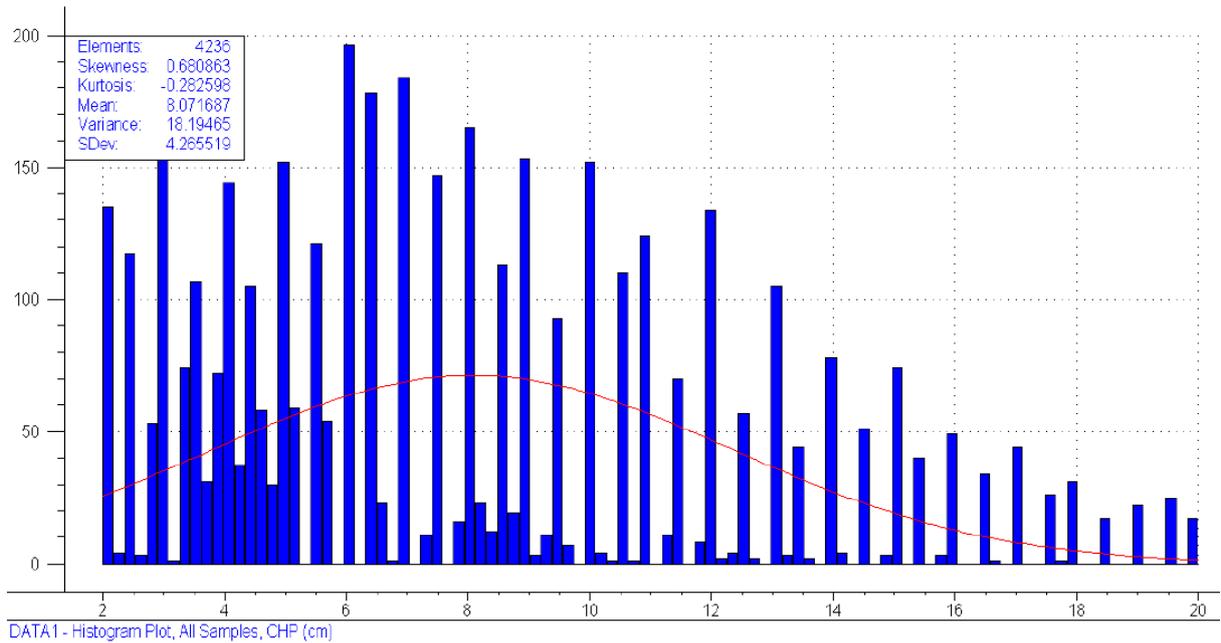


Figure 1.7 Histogramme de fréquence des circonférences à hauteur de poitrine des rejets (CHP, cm) dans les neuf parcelles considérées lors de la mesure destructive de la biomasse.

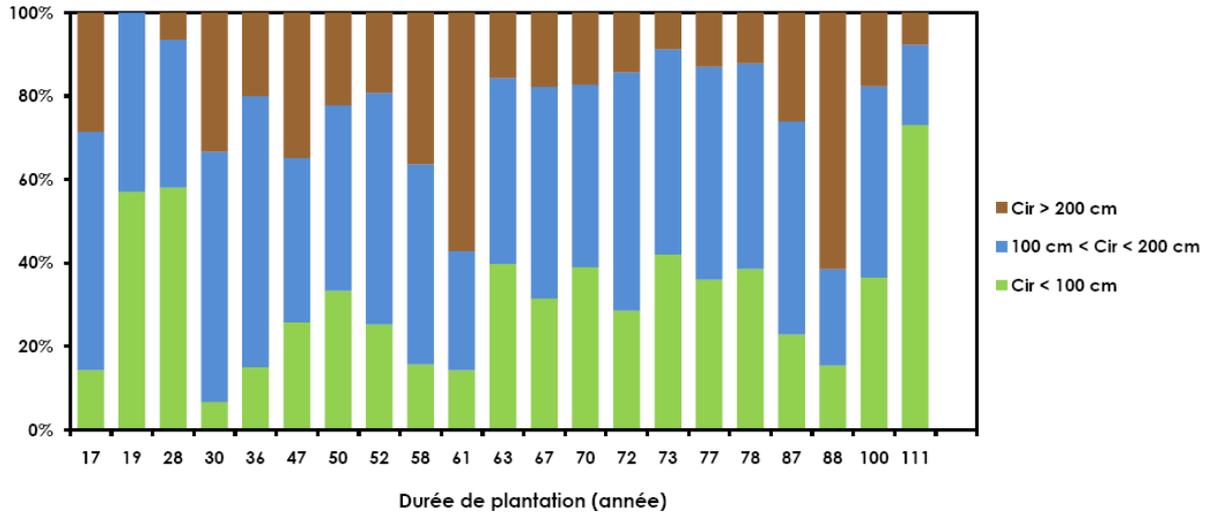


Figure 1.8 Structure totale des neuf parcelles considérées lors de la mesure destructive de la biomasse.

1.3.2. Densités apparentes et profils de carbone du sol

Tous modes d'usage confondus, les densités apparentes (D_a) des sols au niveau de deux sites d'étude ont une moyenne de 1.3 g.cm^{-3} (tableau 1.3). Pour un mode d'usage donné et sur tout le profil, les D_a des sols de Sambaina sont plus faibles que ceux de Sadabe, bien que cette différence ne soit pas significative. Une tendance non significative s'observe aussi entre les D_a des modes d'usage avec : 1.04 à 1.48 g.cm^{-3} et 1.12 à 1.49 sous eucalyptus et culture/jachère, contre 1.16 à 1.56 g.cm^{-3} sous système originel. La présence de racines en profondeur sous eucalyptus ainsi que l'effet du labour sous culture peuvent être une explication à cette tendance. Par contre, pour la chronoséquence, il n'existe pas de tendance générale des valeurs de D_a selon la durée de plantation.

Concernant les teneurs en carbone du sol, pour tous modes d'usage dans les deux sites, elles sont relativement élevées en surface (supérieures à 20 mg C.g^{-1} sol) (Figure 1.9). Généralement, les teneurs sous les situations de Sambaina sont supérieures à celles à Sadabe probablement du fait de l'ancienneté des plantations d'eucalyptus mais aussi des microclimats pour les situations en altitude (sous l'effet des crachins et d'une température encore plus fraîche). Les différences significatives s'affichent uniquement pour les situations sous eucalyptus et pseudo-steppe à Sambaina (élevées sur tout le profil).

Tableau 1.3 Densités apparentes du sol (g.cm^{-3}) sur les sites d'étude: Sambaina et Sadabe (moyenne \pm écartype, $n = 4$).

	0-10 cm			10-20 cm			20-30 cm			30-40 cm		
Sites												
Sambaina												
Eucalyptus (E)	1.04	\pm 0.14	a	1.12	\pm 0.13	a	1.20	\pm 0.13	a	1.31	\pm 0.13	a
Culture/jachère (CJ)	1.15	\pm 0.13	b	1.12	\pm 0.12	a	1.20	\pm 0.13	a	1.29	\pm 0.14	a
Pseudo-steppe (B)	1.16	\pm 0.11	b	1.20	\pm 0.12	a	1.30	\pm 0.12	a	1.37	\pm 0.09	a
Sadabe												
Eucalyptus (E)	1.28	\pm 0.15	a	1.40	\pm 0.11	a	1.49	\pm 0.11	a	1.48	\pm 0.20	a
Culture/jachère (CJ)	1.21	\pm 0.15	a	1.34	\pm 0.21	a	1.49	\pm 0.14	a	1.49	\pm 0.11	a
Pseudo-steppe (B)	1.39	\pm 0.10	b	1.52	\pm 0.09	b	1.56	\pm 0.12	a	1.50	\pm 0.16	a
Chronoséquence												
17	1.25	\pm 0.19	bcd	1.40	\pm 0.16	de	1.38	\pm 0.17	bcde	1.33	\pm 0.18	abc
19	1.16	\pm 0.17	acd	1.29	\pm 0.08	cde	1.48	\pm 0.09	de	1.55	\pm 0.05	bc
28	1.38	\pm 0.08	d	1.52	\pm 0.03	e	1.49	\pm 0.08	de	1.30	\pm 0.28	abc
30	1.30	\pm 0.16	cd	1.41	\pm 0.08	de	1.62	\pm 0.07	e	1.62	\pm 0.01	c
36	1.22	\pm 0.15	bcd	1.32	\pm 0.08	cde	1.47	\pm 0.05	de	1.56	\pm 0.04	bc
47	0.97	\pm 0.09	ab	0.99	\pm 0.10	a	1.08	\pm 0.12	a	1.17	\pm 0.12	a
50	1.23	\pm 0.03	bcd	1.23	\pm 0.14	abcd	1.24	\pm 0.11	abcd	1.24	\pm 0.15	ab
52	1.00	\pm 0.04	ab	0.99	\pm 0.06	a	1.17	\pm 0.08	abc	1.35	\pm 0.06	abc
61	1.35	\pm 0.10	d	1.46	\pm 0.07	de	1.48	\pm 0.09	de	1.54	\pm 0.24	bc
67	1.04	\pm 0.14	abc	1.14	\pm 0.15	abc	1.19	\pm 0.15	abc	1.31	\pm 0.17	abc
72	0.92	\pm 0.06	a	1.01	\pm 0.12	a	1.12	\pm 0.06	a	1.29	\pm 0.11	ab
77	0.96	\pm 0.14	ab	1.04	\pm 0.06	ab	1.14	\pm 0.07	ab	1.30	\pm 0.09	abc
87	1.11	\pm 0.19	acd	1.12	\pm 0.06	abc	1.15	\pm 0.09	ab	1.27	\pm 0.10	ab
88	1.18	\pm 0.09	bcd	1.26	\pm 0.02	bcd	1.41	\pm 0.09	cde	1.42	\pm 0.05	abc
100	1.05	\pm 0.13	abc	1.17	\pm 0.13	abc	1.23	\pm 0.15	abc	1.31	\pm 0.13	abc
111	1.03	\pm 0.07	abc	1.13	\pm 0.11	abc	1.27	\pm 0.09	abcd	1.39	\pm 0.12	abc

Pour les sites, les moyennes suivies d'une lettre différente à l'intérieur d'une même colonne sont significativement différentes ($p > 0.05$). Pour la chronoséquence de plantation d'eucalyptus (série d'âges de plantation), les moyennes suivies d'une lettre différente à l'intérieur d'une même colonne sont significativement différentes ($p > 0.05$)

Dans la chronoséquence (**Figure 1.9**), les moyennes des teneurs varient de 36.25 à 15.65 mg C.g^{-1} sol suivant la profondeur. A l'exception d'un certain nombre de situations, on note une tendance à l'augmentation de la teneur avec la durée de plantation.

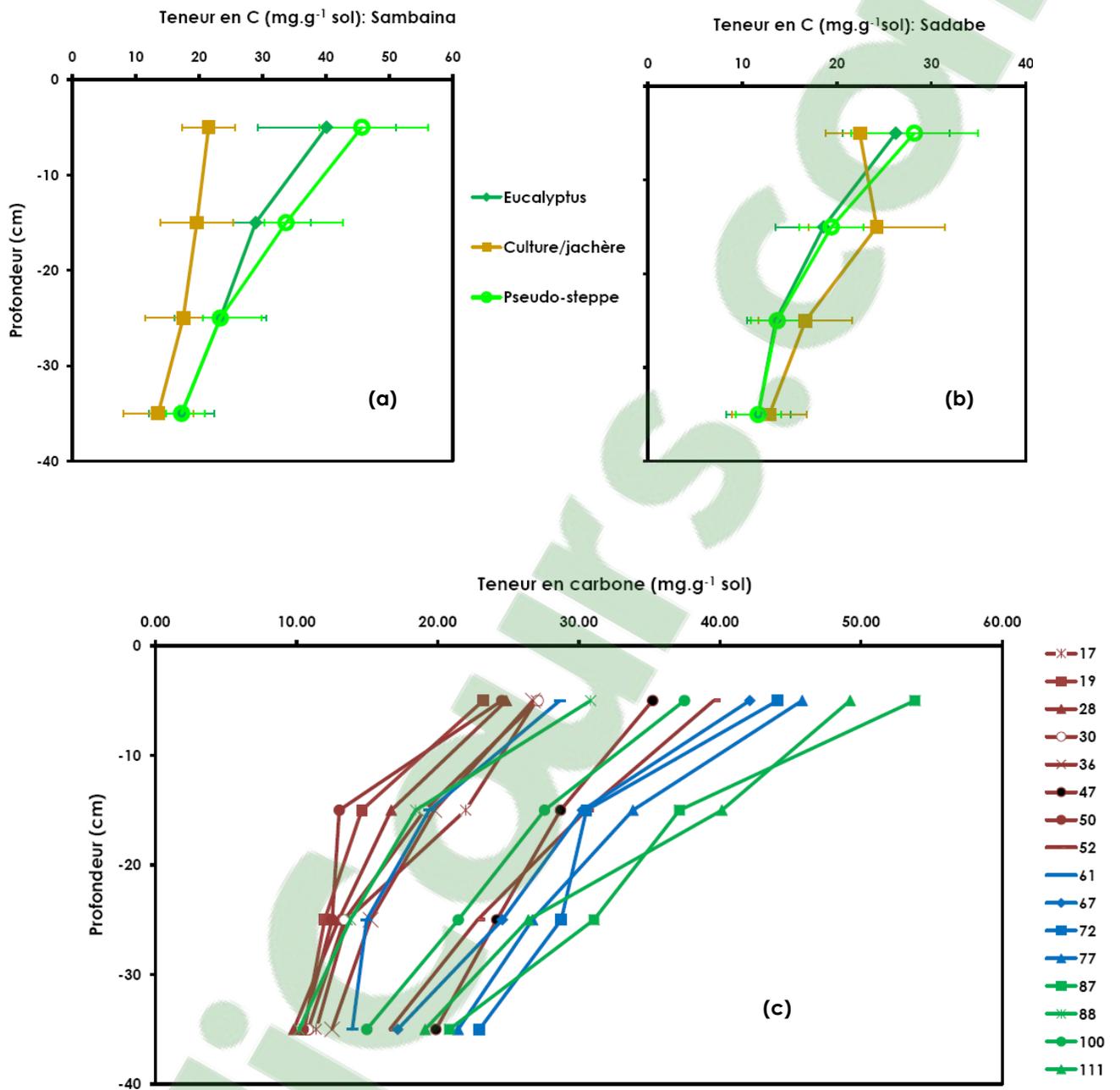


Figure 1.9 : Profils des teneurs en C des situations : (a) sous différents modes d'usage dans le site de Sambaina, (b) sous différents modes d'usage dans le site de Sadabe et, (c) sous la chronoséquence de plantations d'eucalyptus.

1.3.3. Détermination des teneurs en carbone du sol avec la spectroscopie en moyen infrarouge

Les échantillons de sol prélevés pour chaque site sont broyés à 0.2 mm et passé au spectromètre en moyen infrarouge pour acquérir leurs données spectrales. Ces données sont divisées en deux sets : (i) set de calibration ($n= 200$ pour Sambaina, $n = 40$ pour Sadabe), sur lequel les valeurs de références de teneur en carbone vont être utilisées pour élaborer un modèle et, (ii) un set de validation ($n= 80$ pour Sambaina, $n = 40$ pour Sadabe) sur lequel le modèle de calibration a été appliqué pour analyser ses qualités de prédiction.

Les données spectrales sont traitées sous Unscrambler (version 9.2) en recourant aux analyses statistiques multivariées, entre autres : l'analyse en composantes principales (ACP) et la régression du moindre carré partiel (PLS). Selon les propriétés de sol étudiées, des transformations sont effectuées sur les données : une transformée en logarithme décimale des teneurs en carbone ou $\log C$ (afin de contourner le problème de la non-normalité de la distribution liée au mode de prélèvement de ces teneurs) et des prétraitements mathématiques appliquées sur les spectres des deux sets d'échantillon afin d'optimiser les modèles. Les prétraitements mathématiques regroupent le lissage 3,2 (taille de la fenêtre =3, second degré pour le polynôme utilisé) et une normalisation des variables (standard normal variate ou SNV).

Les critères statistiques utilisés pour analyser la qualité des modèles de prédiction sont : le coefficient de détermination r^2 de la droite de régression entre les valeurs de $\log C$ de référence et celles prédites et le ratio entre l'écart-type des valeurs de référence et la précision (erreur standard) du modèle de calibration (ratio noté comme RPD ou *residual of prediction deviation*). De ces deux critères, d'après la littérature, les modèles de prédictions présentant un $r^2 > 0,8$ et un $RPD > 2$ permettent de bonnes prédictions quantitatives.

Considérant les données issues des deux sites d'étude, les valeurs de r^2 et de RPD sont de 0,9 – 3,01 et 0,93 – 3,14 respectivement pour Sambaina et Sadabe (Figure 1.10). Ces valeurs montrent que les modèles développés ici peuvent être utilisés pour la prédiction de la teneur en carbone sur de nouveaux échantillons de sol prélevés au niveau des sites d'étude.

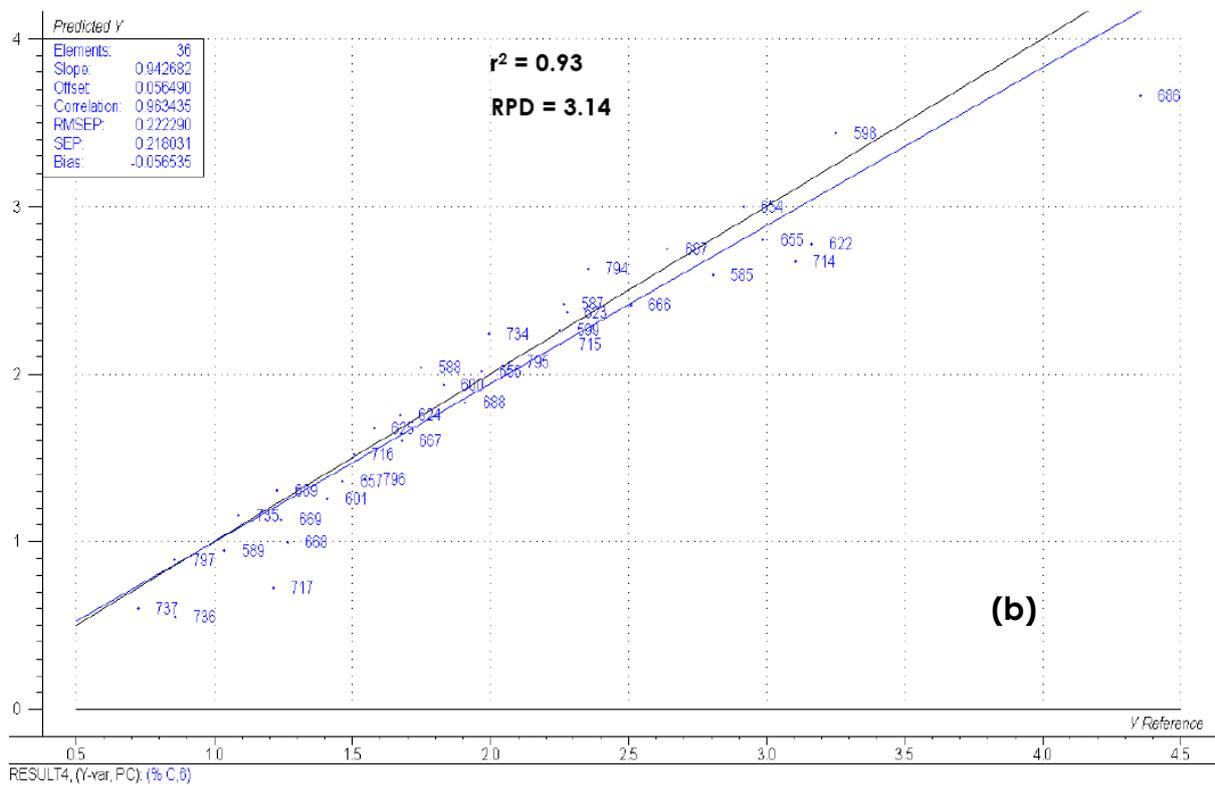
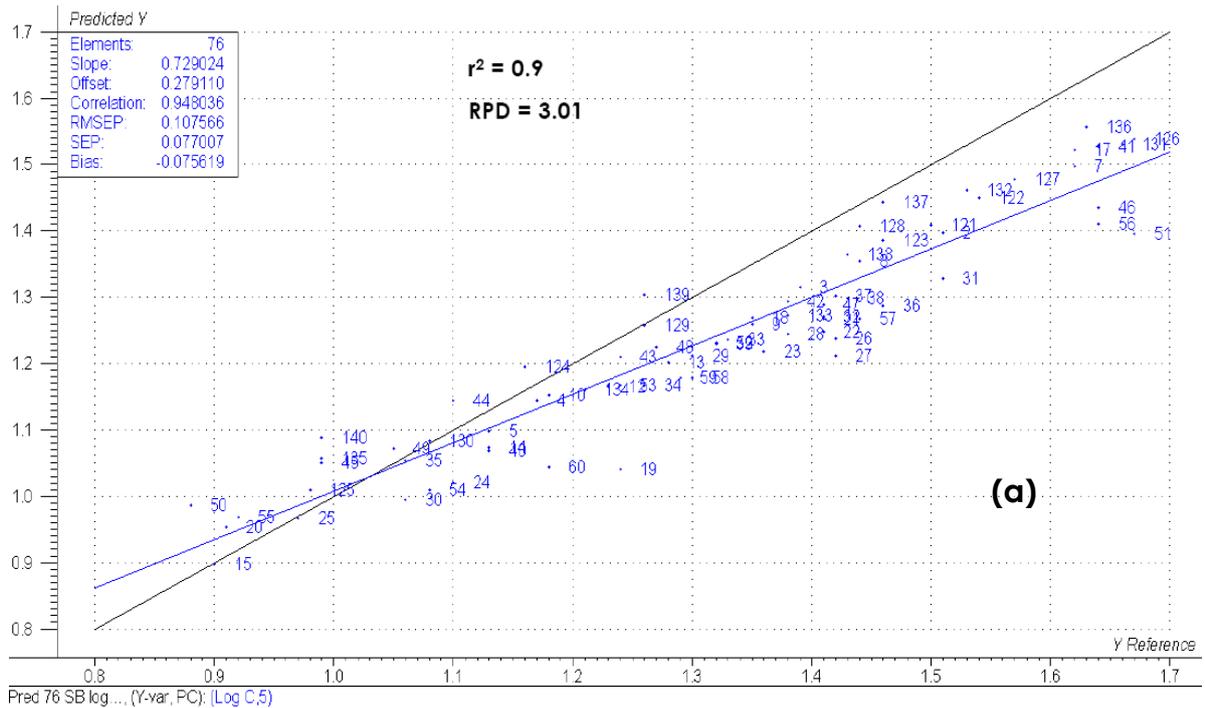


Figure 1.10 : Résultats des prédictions en spectroscopie en moyen infrarouge (teneur en carbone mesurée vs prédite) au niveau du site de : (a) Sambaina, (b) Sadabe

1.3.4. Cartographies de la végétation et du sol de Sambaina

1.3.4.1. Cartographie de la végétation

Les principales cartes thématiques élaborées sont: la carte des âges de plantation d'eucalyptus et la carte des âges de taillis (**Figure 1.11**).

L'étude chronologique des photo-interprétations a montré une conversion importante (environ 20% de la superficie de la CR) des pseudo-steppes en plantation d'eucalyptus pendant la période de 1949 à 1965, ce qui confirme ce qui a déjà été trouvé par l'équipe du CIRAD/FOFIFA-Forêts dans les années 1990 (CIRAD /FOFIFA-Forêts, 1990-1994). Cette dynamique de boisement (37 ha.an^{-1}) a par la suite connu un ralentissement (7 ha.an^{-1}) après 1965, essentiellement en raison de la saturation du paysage et de la faible disponibilité en terre encore non exploitée (4% de pseudo-steppe).

Par ailleurs, malgré des confusions importantes enregistrées entre les pseudo-steppes et les champs de culture, les travaux de traitement d'images satellites ont abouti à l'identification d'une certaines classes d'âge de taillis. Ils ont aussi montré que les surfaces recépées pour les trois dates à disposition (1999, 2003 et 2006 ; intervalles pouvant correspondre à une rotation) sont similaires et avoisinent les 200 ha.

1.3.4.2. Cartographie du sol

Les caractérisations morphologiques et physico-chimiques des profils pédologiques suite aux observations directes sur terrain et aux analyses au laboratoire ont permis d'identifier trois types de sol (Figure 1.12, Annexe 1.2). Rappelons que l'existence ou non de l'horizon pédologique B et la profondeur d'apparition et l'abondance des minéraux primaires ont été les principaux facteurs de la différenciation de ces types de sol. Les résultats des analyses chimiques des profils types (Tableau 1.4) rejoignent ceux des études ponctuelles antérieures dans cette zone (Rambeloarisoa, 1987 ; Ratsimandresy, 1997 ; Randrianjafy, 1999).

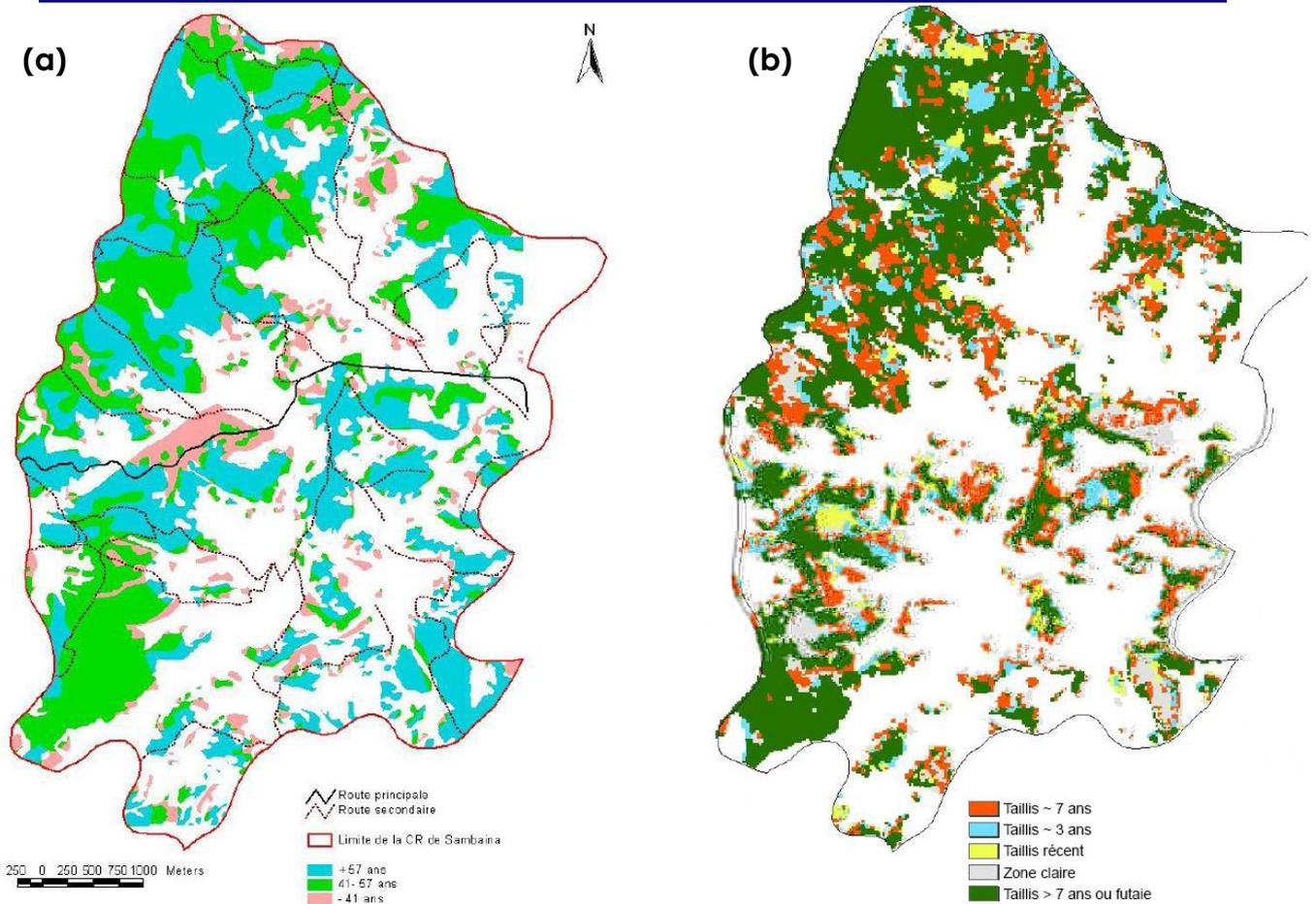
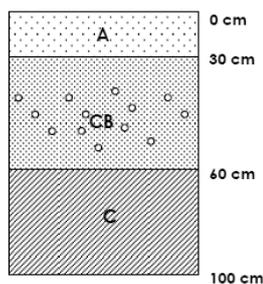


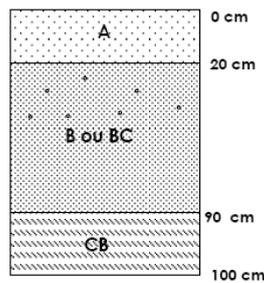
Figure 1.11 Aperçus des cartes des plantations d'eucalyptus dans la CR de Sambaina : (a) âge de plantation et (b) âge des taillis.

Sol fortement rajeuni



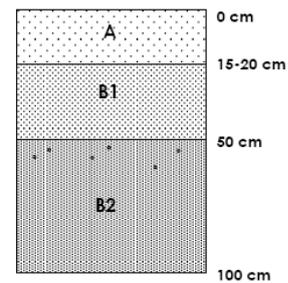
Présence d'un horizon limono argileux avec des traces de minéraux primaires à moins de 60 cm, l'horizon d'altération ou la roche mère apparaît avant 120cm. L'horizon humifère est généralement peu épais. La partie en haut de profil est plus ou moins enrichie en minéraux peu altérables (litho-reliques) qui s'apparentent à des résidus gibbsitiques. La couleur du profil peut être rose ou jaune. La structure est polyédrique ou massive. Les horizons sont peu compacts à compacts.

Sol rajeuni



Présence d'un horizon limono argileux avec des traces de minéraux primaires entre 60 cm et 100cm, L'horizon d'altération peut apparaître avant 120 cm. Les minéraux altérés apparaissent généralement sous forme de reliques jaunes ou blanches friables ou sous forme de taches diffuses, La couleur du profil est jaune ou orange. La structure est polyédrique ou massive. Les horizons sont peu compacts à compacts.

Sol typique



Horizon B argilo limoneux à argileux profond (sup 100cm). Il y a présence en général d'un horizon plus ou moins compact (B1). La structure est polyédrique à massive. La couleur du profil varie entre le rouge et l'orangé. Des litho-reliques peuvent apparaître dans le profil à des profondeurs variables.

Figure 1.12 Profils pédologiques des principaux types de sol observés à Sambaina.

Ces analyses confirment leur appartenance à la classe des ferralsols et leur caractéristique sont (FAO, 2006b ; FAO, 2008) : (i) la présence d'un horizon ferrallic (horizon d'accumulation d'argile) résultant d'une longue et intense altération où la fraction d'argile est dominée par de l'argile à faible activité (présence de kaolinite et/ou de gibbsite montré par la spectroscopie en moyen infrarouge) et les lithoreliques sont enrobés par les sesquioxides de Fe et d'Al ; (ii) leur capacité d'échange cationique CEC est moins de 16 me/100g argile (=16 cmole.kg-1 argile) ; (iii) l'inexistence de propriétés andiques (indice d'oxalfe $Al_{ox} + 1/2 Fe_{ox}$ inférieur à 2%) et (iv) des pH et taux de saturation du complexe d'échange (TS) sont relativement bas.

Tableau 1.4 Caractéristiques physico-chimique et minéralogique des horizons des profils types à Sambaina.

	fortement rajeuni		rajeuni			typique			
	A	C	A	B	CB	A	B1	B2	
	0-40 cm	40-100 cm	0-20 cm	20-90 cm	90-100 cm	0-15 cm	15-50 cm	50-100 cm	
pH eau	5.46	5.38	5.21	5.20	5.04	4.62	5.34	5.58	
pH KCl	4.74	4.87	4.73	5.45	4.59	4.54	4.98	5.58	
Granulométrie									
Argiles	%	12.69	26.71	51.45	46.77	27.22	42.60	35.36	51.36
Limons fins	%	16.97	14.85	6.54	7.42	16.79	8.92	8.68	6.98
Limons grossiers	%	7.99	5.77	4.07	7.34	3.97	2.92	6.47	4.05
Sables fins	%	14.40	12.36	11.47	12.22	15.30	12.70	17.07	12.20
Sables grossiers	%	47.95	40.31	26.47	26.25	36.72	32.87	32.43	25.42
Matière organique									
C total	%	57.13	9.74	19.95	10.22	1.36	24.58	13.80	7.78
N total	%	3.78	0.47	1.09	0.45	0.03	1.45	0.65	0.26
C/N		15.13	20.65	18.38	22.51	45.65	17.01	21.40	30.55
Complexe d'échange (Co(NH₃)₆Cl₃)									
Ca éch	me/100g	0.06	0.15	0.03	0.10	0.03	0.05	0.10	0.13
Mg éch	me/100g	0.07	0.03	0.03	0.02	< 0.01	0.04	0.02	0.03
K éch	me/100g	0.07	0.01	0.02	0.01	< 0.01	0.03	0.01	0.02
Na éch	me/100g	0.07	0.08	0.03	0.03	0.02	0.05	0.04	0.06
Al éch	me/100g	0.39	0.03	0.42	0.07	0.61	0.44	0.07	< 0.01
Mn éch	me/100g	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
H éch	me/100g	0.05	0.02	0.07	0.05	0.08	0.09	0.05	0.03
S(Ca,Mg,K,Na)	me/100g	0.26	0.27	0.11	0.17	0.05	0.16	0.17	0.23
CEC	me/100g	1.09	0.36	1.06	0.67	1.37	0.82	0.44	0.42
CEC par 100 g d'argile	me/100g argile	8.59	1.35	2.06	1.43	5.03	1.93	1.24	0.82
TS	%	24.3	76.3	10.4	25.2	3.3	19.2	39.3	53.1
Dissolution sélective Extraction au citrate-bicarbonate-dithionite									
Fe	%	29.88	30.86	51.13	53.26	61.23	52.29	55.94	59.02
Al	%	18.28	15.74	20.00	16.17	6.55	19.51	17.54	12.27
Si	%	1.97	1.99	0.85	0.45	1.20	0.29	0.23	0.09
Extraction à l'oxalate d'ammonium pH 3.0									
Fe _{ox}	%	10.63	4.74	1.66	0.96	0.39	1.75	1.19	0.58
Al _{ox}	%	14.11	8.26	5.24	3.69	2.39	4.80	5.15	2.45
Si _{ox}	%	1.13	1.14	0.31	0.36	0.46	0.16	0.22	0.16
Al _{ox} + 1/2 Fe _{ox}	%	1.94	1.06	0.61	0.42	0.26	0.57	0.57	0.27
Fe-Al Pyrophosphate									
Fe _p	%	13.81	6.81	23.83	13.13	0.02	23.48	17.91	6.30
Al _p	%	15.42	7.01	16.56	6.93	0.71	19.62	10.57	3.66

La combinaison de ces caractérisations des types de sol avec les analyses orthométriques du MNT ont aboutis à la carte morphopédologique de la zone (**Figure 1.13**). A noter que les seuils des variables orthométriques retenus lors de la définition des modelés sont de :

- pour l'altitude : <1450 m pour les basses collines, entre 1450 et 1520 m pour les moyennes collines et >1520 m pour els reliefs résiduels ;
- pour la pente : <8% pour les moins pentus, entre 8 et 16% pour les moyennement en pente et >16% pour les terrains en grande pente.

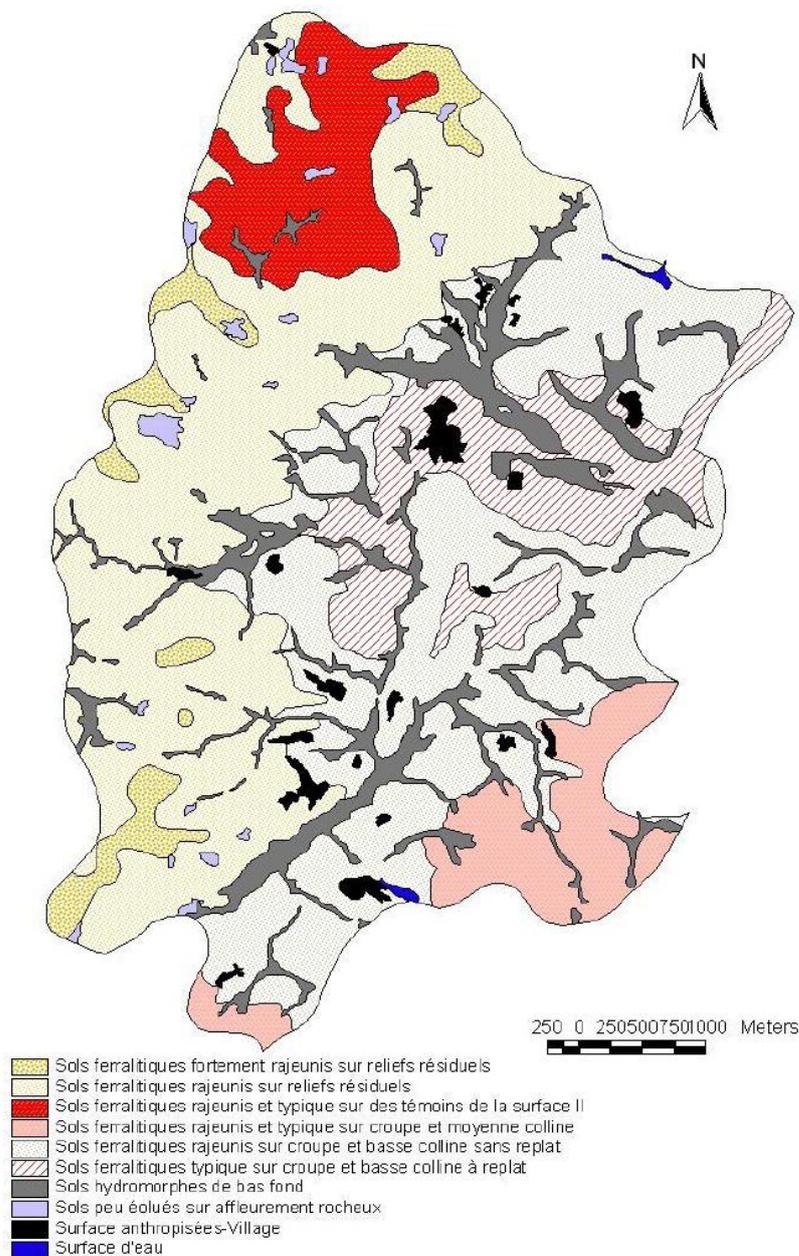


Figure 1.13 Aperçu de la carte morphopédologique de la CR de Sambaina.

REFERENCES

- Artz, R.R.E., Chapman, S.J., Robertson, A.H.J., Potts, J.M., Laggoun-De'farge, F., Gogo, S.b., Comont, L., Disnar, J.-R., Francez, A.-J., 2008. FTIR spectroscopy can be used as a screening tool for organic matter quality in regenerating cutover peatlands. *Soil Biology & Biochemistry* 40, 515–527.
- 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.
- Coûteaux, M.-M., Berg, B., Rovira, P., 2003. Near infrared reflectance spectroscopy for determination of organic matter fractions including microbial biomass in coniferous forest soils. *Soil Biology & Biochemistry* 35, 1587–1600.
- 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.
- Humbert H., 1972. La destruction d'une flore insulaire par le feu. Principaux aspects de la végétation à Madagascar. *Mémoire de l'Académie malgache*, 14 : 77-78.
- Janik, L.J., Skjemstad, J.O., 1995. Characterization and analysis of soils using mid-infrared partial least-squares .2. Correlations with some laboratory data. *Australian Journal of Soil Research* 33, 637 – 650.
- Janik, L.J., Skjemstad, J.O., Shepherd, K.D., Spouncer, L.R., 2007. The prediction of soil carbon fractions using mid-infrared-partial least square analysis. *Australian Journal of Soil Research* 45, 73–81.
- Legros J.P., 2006. *Mapping of soil*, by J.P. Legros (translated by V.A.K. Sharma). Science Publishers, Enfield (2006). ISBN 1-57808-363-X, 409 pp.

Masserschmidt, I., Cuelbas, C.J., Poppi, R.J., de Andrade, J.C., de Abreu, C.A., Davanzo, C.U., 1999. Determination of organic matter in soils by FTIR/diffuse reflectance and multivariate calibration. *Journal of chemometrics* 13, 265 - 273.

Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., Da Fonseca G.A.B., Kent J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403 : 853-858.

Pansu M. et Gautheyrou J., 2003. *L'analyse du sol : minéralogique, organique et minérale*. Springer-Verlag, France.

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

PNUD, 2004. Programme PNUD MAG/97/007-DAP1 « Gouvernement et politiques publiques pour un développement humain durable ». Plan Communal de Développement : Commune Rurale de Sambaina. 40p

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.

Randrianjafy, H., 1999. Les plantations d'Eucalyptus à Madagascar : Superficie, rôle et importance des massifs. In. *Projet FAO GCP/INT/679/EC, Madagascar*, p. 80.

Rapport de campagne du CIRAD-FOFIFA dans le cadre du projet « Gestion et Protection des Forêts », 1990-1994

Ratsimandresy J., 1999. Contribution à la connaissance pédologique des rizières de submersion des Hauts Plateaux Malagasy, cas de Sambaina-Manjakandriana. Mémoire de DEA en Géochimie-Pédologie, Faculté des Sciences-département des Sciences de la Terre. Université d'Antananarivo : 58p.

Reeves, J., McCarty, G., Mimmoc, T., 2002. The potential of diffuse reflectance spectroscopy for the determination of carbon inventories in soils. *Environmental Pollution* 116, S277-S284.

Roederer P. et Bourgeat F., 1971 - Atlas de Madagascar. Tananarive, BDPA, Bureau pour le Développement de la Production Agricole, IGN, Institut Géographique National

Ségalen P., 1994. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique. Tome I, II et III. Introduction générale: les sols ferrallitiques, leur identification et environnement immédiate. Editions de l'ORSTOM, Collection ETUDES et THESES, 579 p.

CHAPITRE II. LA PRODUCTION DE BIOMASSE RACINAIRE ET LES EQUATIONS ALLOMETRIQUES DES TAILLIS DE PLANTATION D'EUCALYPTUS SUR LES HAUTES TERRES CENTRALES DE MADAGASCAR

Ce chapitre a été rédigé en anglais pour soumission à la revue internationale Biomass and Bioenergy

**Below-ground biomass production and allometric relations of eucalyptus coppice
plantation in the central highlands of Madagascar**

Ramarson H. Razakamanarivo^{1,2}, Ando Razakavololona¹, Grinand Clovis², Marie-Antoinette Razafindrakoto¹, Alain Albrecht²

¹ Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques – Département des Eaux et Forêts, Université d'Antananarivo, BP 175, Madagascar

² IRD, UMR 210 Eco&Sols et Laboratoire des RadioIsotopes – Département de la RadioAgriculture, Route d'Andraisoro, BP 3383, 101 Antananarivo, Madagascar

ABSTRACT

Short rotation of *Eucalyptus* plantations are extensively managed for wood production in Madagascar. Nevertheless, little is known about their biomass production and partitioning and their potential in terms of carbon sequestration. If above-ground (ABG) biomass is well estimated based on established allometric relations, below-ground (BLG) estimates are much less common. The aim of this work was to develop allometric relations to estimate biomass density of these plantations, mainly for the root components. Data from 9 *Eucalyptus robusta* stands (47 - 87 years of plantation age, 3 - 5 years of coppice-shoot age) were collected and analyzed. Biomass of 3 sampled trees per stand was determined destructively. Dry weights of ABG components (leaves, branches and stems) were estimated as a function of basal area of all shoots per stump and dry weight for BLG components (mainly stump, coarse CR and medium MR roots) were estimated as a function of stump circumference. Biomass density was then calculated using these equations in the data from stand inventory. Total biomass ranged from 102 to 130 Mg ha^{-1} with more than 77% contained in the BLG components. The highest dry weight was allocated in the stump and in the CR (51% and 42% respectively) for BLG parts and in the stem (69%) for ABG part. Allometric relations developed herein could be applied to other *Eucalyptus* plantations which present similar density and tree size conditions; anyhow, more is needed to be investigated in understanding biomass production and partitioning over time for this kind of forest ecosystem.

Keywords: Root biomass; short rotation forestry; *Eucalyptus robusta* Smith.; chronosequence; carbon sequestration.

2.1. INTRODUCTION

Forests comprise the largest carbon pool of all terrestrial ecosystems thanks to the potential of to sequester carbon (Malhi *et al.*, 2002; Robert and Saugier, 2003; Jandl *et al.*, 2007). This important role in regulating carbon cycle is of major concern today in relation to the continuous increase of CO₂ in the atmosphere which contributes to global warming (Fearnside, 2000; Malhi *et al.*, 2002). In fact, as incited by the Kyoto Protocol in relation with the United Nations Framework on Climate Change, reducing the release of carbon stored in vegetation (i.e. reduce deforestation) or establishing vegetation sinks (i.e. enhance afforestation and reforestation) are among the several methods for reducing the net emissions of CO₂ in the atmosphere (IPCC, 2007a). The Clean Development Mechanism (CDM) in the Kyoto Protocol will allow afforestation and reforestation projects to be established and financed in the developing countries to assist industrialized countries reach their emission reduction targets. Thus, there is much interest in estimating biomass of forests and tree plantations and this implies a need to explore all biomass components.

As in many countries (FAO, 2006c; FAO, 2007), short rotation forestry (SRF) using fast growing exotic species such as Eucalyptus genus is a major forestry practice in the central highland of Madagascar for energy purposes. *Eucalyptus robusta* plantations are well known to the people who are living in the central highland of Madagascar. This practice contributes to alleviate the natural forests' decline which is mainly caused by increasing population and economic pressures (Carriere and Randriambanona, 2007)(Carriere and Randriambanona, 2007). These plantations have been in place since the beginning of the last century (Gueuneau, 1969; Bertrand, 1999) and are pursued with the increased demand for wood and fuel wood but also for ecological services and future incomes from CDM projects.

In SRF a variety of established methods exists for estimating the biomass in aboveground tree components for not only a direct measure of productivity, but also for nutrient accumulation and distribution. For instance, Senelwa and Sims (1998) with *Eucalyptus ovata*, *E. saligna*, *E. globulus* and *E. nitens* in New Zealand, Nordh and Verwijst (2004) with *Salix sp.* in Sweden and more recently Zewdie *et al.* (2009) with *E. globulus* in Ethiopia assessed the relationship between above-ground biomass (ABG) production and tree dimensions (height and diameter) to determine a non-destructive sampling equation and demonstrated that a pooled equation could be applicable to a variety of eucalyptus.

Besides, a very limited part of the research was focused in root compartment because, as in any forest ecosystem, biomass of root systems is difficult to measure (Cairns *et al.*, 1997; Robinson, 2007). This is mainly because excavating root systems is a difficult task (measurements are tedious and very time-consuming) but also because there is a lack of adequate method to study the dynamics and functions of this part of the ecosystem (Santantonio *et al.*, 1977; Ranger *et al.*, 2002). Therefore, below-ground biomass (BLG) was generally assessed indirectly by using the Root:Shoot ratio (R:S) which corresponds to the relative biomass allocation between roots and above-ground parts (Cairns *et al.*, 1997). For SRF, there are few investigations on belowground biomass measurement such as those conducted by: Misra *et al.* (1998) and Wildy and Pate (2002) in Australia when studying spatial distribution of below-ground biomass of *Eucalyptus nitens* and describing the general biology of coppices respectively, and by Bouillet *et al.* (2002) et Saint-André *et al.* (2005) in Congo for their works on spatial distribution of root systems and eucalyptus biomass equations, respectively. But understanding root system is especially important for SRF of eucalyptus because these systems are based on coppice regeneration, it is then necessary to provide an accurate below-ground biomass. The objective of the present study was therefore: (i) to assess the relationship between BLG production (and also the ABG) and tree dimension (stump circumference or basal area) and (ii) to estimate the biomass production and partitioning in different components of these old *E. robusta* coppices in the central highland of Madagascar, namely across total plantation age.

2.2. MATERIAL AND METHODS

2.2.1. Study area

The study was conducted at Sambaina-Manjakandriana, in Malagasy Highlands (47°45' - 47°50' East and 18°50'- 18°56' South and 1350-1750 m elevation). Average annual rainfall and temperature were 1,600 mm and 14.5°C respectively. The geological substratum is composed of granites, and soils are Ferralsols according to the FAO classification (FAO, 2006b) with 1:1 clay content of a mean of 55 %.

The eucalyptus plantation in this area shows the historical setting of eucalyptus plantations in the whole central highland of Madagascar. These plantations cover 150,000 ha that is to say 46.5% of all plantation forestry in Madagascar and where *E. robusta* is the most widespread species thanks to its aptitude in rough stony soil and bush fire conditions (Randrianjafy, 1999). *E. robusta* shows the natural ability to sprout, so it could be adopted as a coppicing system of renewal as existing in

our study area; actually, since their first plantation in 1900, most of all stools have not been renewed. Being planted first along the railway for locomotive fuel wood supply, eucalyptus plantations were used for landed property and mainly for energy purposes from now (Carriere and Randriambanona, 2007). Stands have variable areas (from a few hundred of square meter to less than 10 ha) are privately managed and usually harvested at the age of 3-5 years and stumps cut on ground level are left to resprout. No silvicultural treatments are practiced, all stems (shoots) are left after coppicing for natural thinning.

2.2.2. Studied stands characteristics

Nine stands of *E. robusta* (Table 2.1) were identified and selected to study belowground (BLG) and aboveground biomass (ABG) production and partitioning in relation to total plantation age which ranged from 47 to 87 years. Plantation age and coppice-shoot age were obtained by means of interviews with elderly and officials local people and of use of aerials photo interpretation. According to the small size of the stands, three plots (10 m x 10 m) were randomly located in each stand. Inventory was made in each plot where all stools (stocking 1) and shoots (stocking 2) density were counted and some variables directly measured: stump circumference of all stools (Cir), circumference at breast height (CBH) and height (H) of all shoots.

Table 2.1 Stand characteristics of the selected *Eucalyptus robusta* plantations in the central highlands of Madagascar ($n = 9$).

Plot	Stumps			Coppice shoot			
	Plantation age (year)	Stocking 1 (stumps.ha ⁻¹)	Cir (cm)	Coppice age (year)	Stocking 2 (stems.ha ⁻¹)	CBH (cm)	H (m)
1	47	2200	168.5 (91.8)	3	13200	9.1 (4.3)	4.8 (1.5)
2	77	3333	126.1 (67.5)	5	16967	8.7 (6.8)	4.3 (1.6)
3	52	2767	146.2 (64.9)	3	24800	5.8 (3.6)	3.2 (1.2)
4	72	3033	142.6 (57.2)	5	16500	9.9 (6.6)	5.2 (2.6)
5	53	2867	144.6 (56.8)	3	18167	6.5 (4.2)	3.8 (1.6)
6	67	3067	147.3 (65)	5	15567	9.7 (6.7)	4.7 (2.1)
7	72	3733	124.6 (66.8)	5	17700	9.5 (5.8)	4.8 (1.9)
8	67	3500	130.6 (77)	3	17800	7 (3.4)	3.7 (1.3)
9	87	3067	155.5 (68.7)	5	17033	8.2 (5.7)	4.2 (2.1)

Values in brackets represented the standard deviation. Plantation age is the date of first eucalyptus plantation, Stocking 1: stump density corresponding to the number of stumps per unit of area, Cir: mean circumference of all stumps in a stand, Coppice age: the date of the last cutting shoots, Stocking 2: shoot density corresponding to the number of shoots per unit of area, CBH: mean circumference at breast height of all shoots in a stand, H: mean height of all shoots in a stand

2.2.3. Tree selection

Distribution of the circumference of stumps per plot was determined and one tree per plot proportionally distributed over the range of circumference in each stand was chosen for destructive sampling and in order to cover the full range of circumference variation within each stand (in total 27 trees). Classes of circumference defined by CIRAD researchers on coppice management in the 90s were considered ($Cir \geq 200$ cm, $200 > Cir \geq 100$ cm and $Cir < 100$ cm). For reminding, this restricted number of tree to fall down was because of the difficult task of root system and more because of owners' reservation for the loss of their production and the environmental damage (a stool is doomed to death as soon as it is excavated). But, all trees were used for below- and above-ground biomass evaluations.

2.2.4. Below-ground (BLG) biomass measurements

BLG part of each tree was subdivided into four components: stump, coarse (CR), medium (MR) and fine (FR) roots. Stump was the tree part between above-ground point where the stem was cut and the below-ground points where the roots could be clearly individualized (Wildy and Pate, 2002; Saint-André *et al.*, 2005). For the actual root system, root diameter was used to classify its subcomponents: diameter ≥ 10 mm, $10 \text{ mm} < \text{diameter} \leq 2 \text{ mm}$ and diameter $< 2 \text{ mm}$ for CR, MR and FR respectively. According to the component size, different methods were applied: the first was designed for the larger component (stump, CR and MR) and the second for the smaller (FR).

2.2.4.1. First method: stump, CR and MR biomasses

A sampling unit known as Voronoi polygon is defined for each sampled tree. The Voronoi polygon (Figure 2.1) is the polygon of occupancy and the elementary space which is formed by the intersection of the perpendicular lines that pass through the midpoints of the lines connecting the center of the sampled tree to the center of the nearest neighboring trees (Santantonio *et al.*, 1977; Saint-André *et al.*, 2005)(Santantonio *et al.*, 1977; Saint-André *et al.*, 2005). The whole polygon area was excavated for BLG biomass evaluation where all excavations were done manually to a 1 m depth. This limit was chosen because of the fact that, generally, most of tree root are located in the top 15-60 cm of the soil (Harmand *et al.*, 2004; Lucot *et al.*, 2008)(Harmand *et al.*, 2004; Lucot *et al.*, 2008). Stump was separated from individualized roots with use of chain saw and CR and MR were sorted manually and sieved to be separated from soil.

The excavated root system was weighted and aliquots were sampled for determining dry weight. Moisture samples were oven-dried to a constant weight at 70°C and weighted.

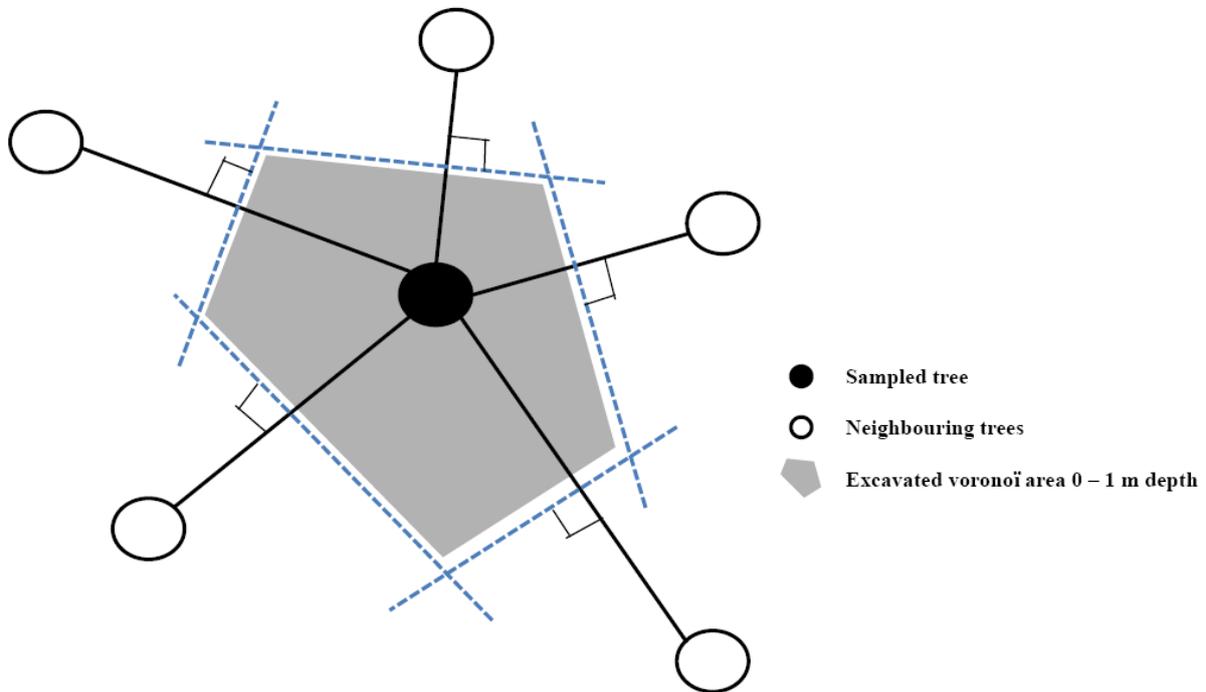


Figure 2.1 Voronoi polygon for stump, CR and MR extractions.

2.2.4.2. Second method: FR biomass

Root density decreased sharply with depth, with most fine roots in the surface layers 0-25 cm (Bouillet *et al.*, 2002). Reminding that dense mats of shallow fine roots were mostly presented in eucalyptus plantation floor in Malagasy Highlands where fine roots are mixed with plant debris to give a thick (5-10 cm) mat of roots. Thus, FR biomass in soil per stand were evaluated by core sampling near each sampled tree with metallic cylinder (diameter = 8 cm) to 50 cm depth, assuming that this was the depth were FR proliferated (Crow and Houston, 2004). FR were collected from sampled soils by series of washing and sieving. After being oven-dried at 70°C to a constant weight, FR biomass density were calculated on an area basis.

2.2.5. Above-ground (ABG) Biomass measurements

The same 27 sampled trees for BLG measurements were used for ABG measurements. All stems or shoots per selected stool were fallen down and the following compartments were considered according to local people' harvest practice: stems, branches and leaves. For each compartment, all elements of all shoots were gathered, weighted and sampled for oven-dried to determine dry weight matter of the whole compartment.

2.2.6. Allometric relationships

Regression models or allometry equations are widely used for forest biomass assessment. They relate tree biomass with other dendrometric variables which are directly measured in the field in inventories. For ABG parts, relations between dry weight with diameter are well known (Antonio *et al.*, 2007) and good relationships were developed. In SRF, the principles are the same (Senelwa and Sims, 1998; Heinsoo *et al.*, 2002; Saint-André *et al.*, 2005; Zewdie *et al.*, 2009), but the difference with conventional forestry is the fact that there are many stems per tree instead of a single stem. In our case, individual tree component model was developed by relating dry weight of each ABG compartment (leaves, branches, stems) with the shoots basal area per tree (G) (Snowdon *et al.*, 2000; Burrows *et al.*, 2002). The basal area summarizes the number and the size of trees in a stand which corresponds to the area of the cross section of a stem at breast height; it is calculated from circumference measurements. For a stool or tree containing a number of n shoots, its basal area is calculated following the formulae:

$$G = \sum_{i=1}^n (\text{CBH}_i)^2 / 4\pi \quad (1)$$

where G (in $\text{m}^2 \text{ tree}^{-1}$) the basal area of all shoots of the selected tree, n the number of shoots per stool or tree, CBH (cm) the circumference of each shoot. In the present study, only stump circumference which was the only visible and measurable variable after coppicing could be used for establishing relationship with larger parts of the BLG components (stump, CR, MR).

The biomass of the components and of the whole BLG and ABG was determined through allometric regressions and calculated on an area basis from tree dendrometric parameters and stand density.

2.2.7. Statistical analysis

Correlations between dry weight and dendrometric variables were determined by using the *Pearson's* rank correlation coefficient (r) and model performance was assessed on the basis of the coefficient of determination (R^2) and on *p-value*. A principal component analysis (PCA) was performed to study relationship between variables that may control BLG and ABG biomass production and partitioning. Coefficient of correlation between those variables was also determined by using r . Statistical analysis was performed using XLSTAT 2008 and R software.

2.3. RESULTS

2.3.1. BLG regression equations

Stump dry biomass varied from 1.6 to 82.2 kg tree⁻¹ (Figure 2.2a), CR dry biomass ranged from 2 to 52.6 kg tree⁻¹ (Figure 2.2b) and MR dry biomass varied between 0.2 to 8.6 kg tree⁻¹ (Figure 2.2c). Consequently, total BLG biomass (FR not included) ranged from 4.5 to 134.4 kg tree⁻¹ (Figure 2.2d). Individual tree components in BLG part expressed as a function of the stump circumference had enough high R² values and, except for MR, generally accounted for more than 55% of the variance (Table 2.2).

For these old coppices of *E. robusta* in Malagasy Highlands, the zero-intercept form of the power function of the BLG regression model proved to be the model with the best fit.

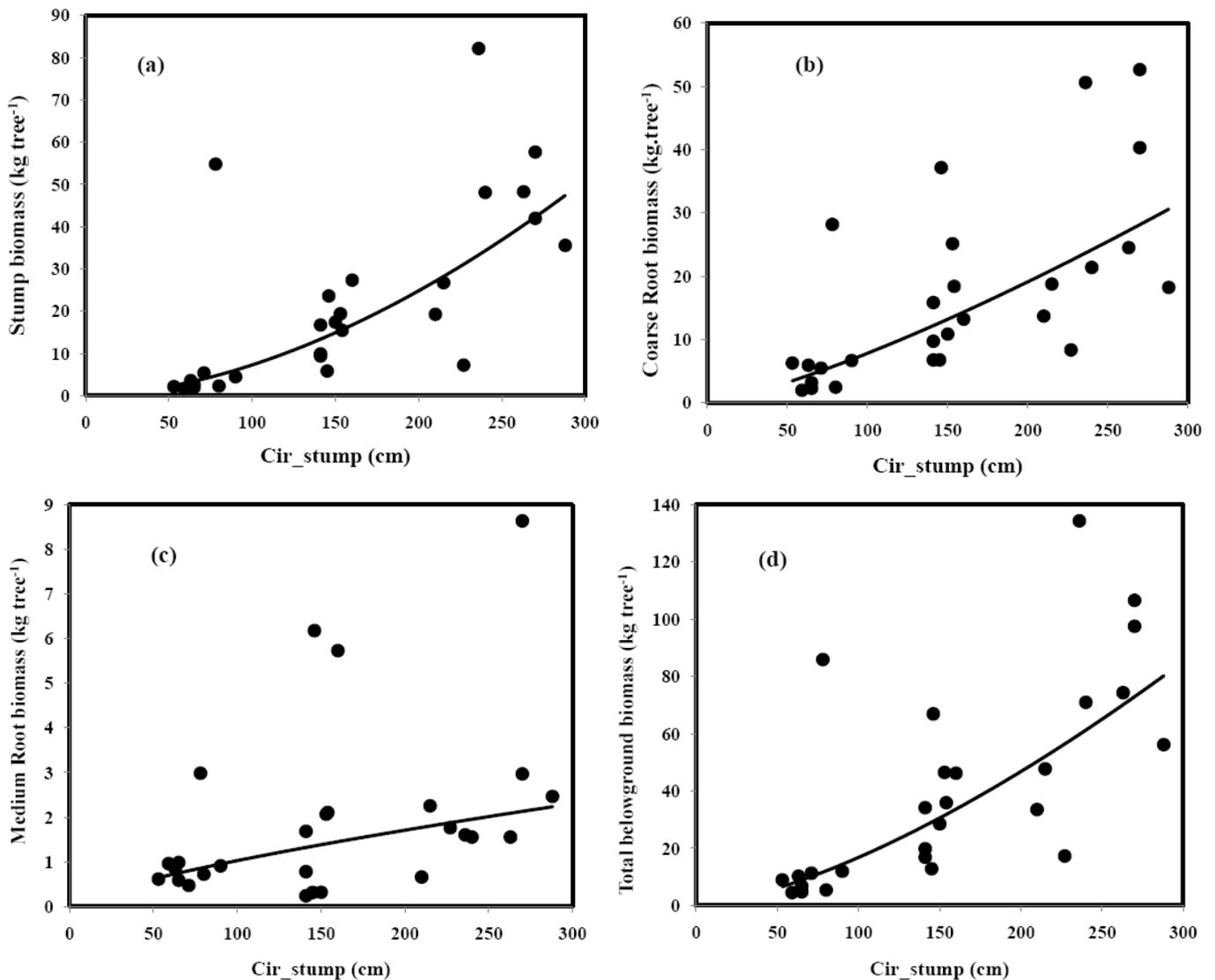


Figure 2.2 Relationships between stump circumference (cm) and dry weight below-ground biomass components of (a) stumps, (b) coarse roots (CR, with diameter ≥ 10 mm), (c) medium roots (MR, $10 \text{ mm} > \text{diameter} \geq 2 \text{ mm}$) and (d) total below-ground dry biomass ($N = 27$).

Table 2.2 Below and above-ground allometry equations.

Component	Equation	R ²	p-value	
Stumps	$0.002 * Cir ^{1.774}$	0.66	< 0.0001	(2)
Coarse Root (CR)	$0.02 * Cir ^{1.29}$	0.56	0.0003	(3)
Medium Root (MR)	$0.034 * Cir ^{0.736}$	0.19	0.037	(4)
Total Belowground	$0.018 * Cir ^{1.478}$	0.62	< 0.0001	(5)
Leaves	$362,4 * G ^{1,028}$	0.85	< 0.0001	(6)
Branches	$196,2 * G ^{0,877}$	0.7	< 0.0001	(7)
Stems	$1073 * G ^{0,934}$	0.76	< 0.0001	(8)
Total Aboveground	$1582 * G ^{0,930}$	0.8	< 0.0001	(9)

Dry mass of below-ground components of *Eucalyptus robusta* in the central highlands of Madagascar ($N = 27$) are expressed in $kg\ tree^{-1}$ and related with the stump circumference (Cir) which is expressed in cm. Above-ground components are related to the basal area of shoots per stool (G) expressed in $m^2\ tree^{-1}$; p-values were calculated at $\alpha = 5\%$.

2.3.2. ABG regression equations

Regarding all shoots that each stool supported, leaf dry biomass ranged from 0.1 to 9.5 $kg\ tree^{-1}$ (Figure 2.3e), branch dry biomass varied between 0.2 and 7.9 $kg\ tree^{-1}$ (Figure 2.3f) and stem dry biomass ranged from 0.6 to 38.9 $kg\ tree^{-1}$ (Figure 2.3g). Total ABG varied then between 1.2 and 51.5 $kg\ tree^{-1}$ (Figure 2.3h).

When expressed as a function of the basal area of all shoots per stool, individual components in ABG part showed high R² values (Table 2.2). The relationships accounted generally for more than 75% of the variance expect for the branches component.

As for BLG part, the zero-intercept form of the power function of the ABG regression model was to be the model with the best fit. Because of the weakness of basal area values (0.001 to 0.027 $m^2\ tree^{-1}$), slope values in allometry equations for each individual tree component in ABG part are high.

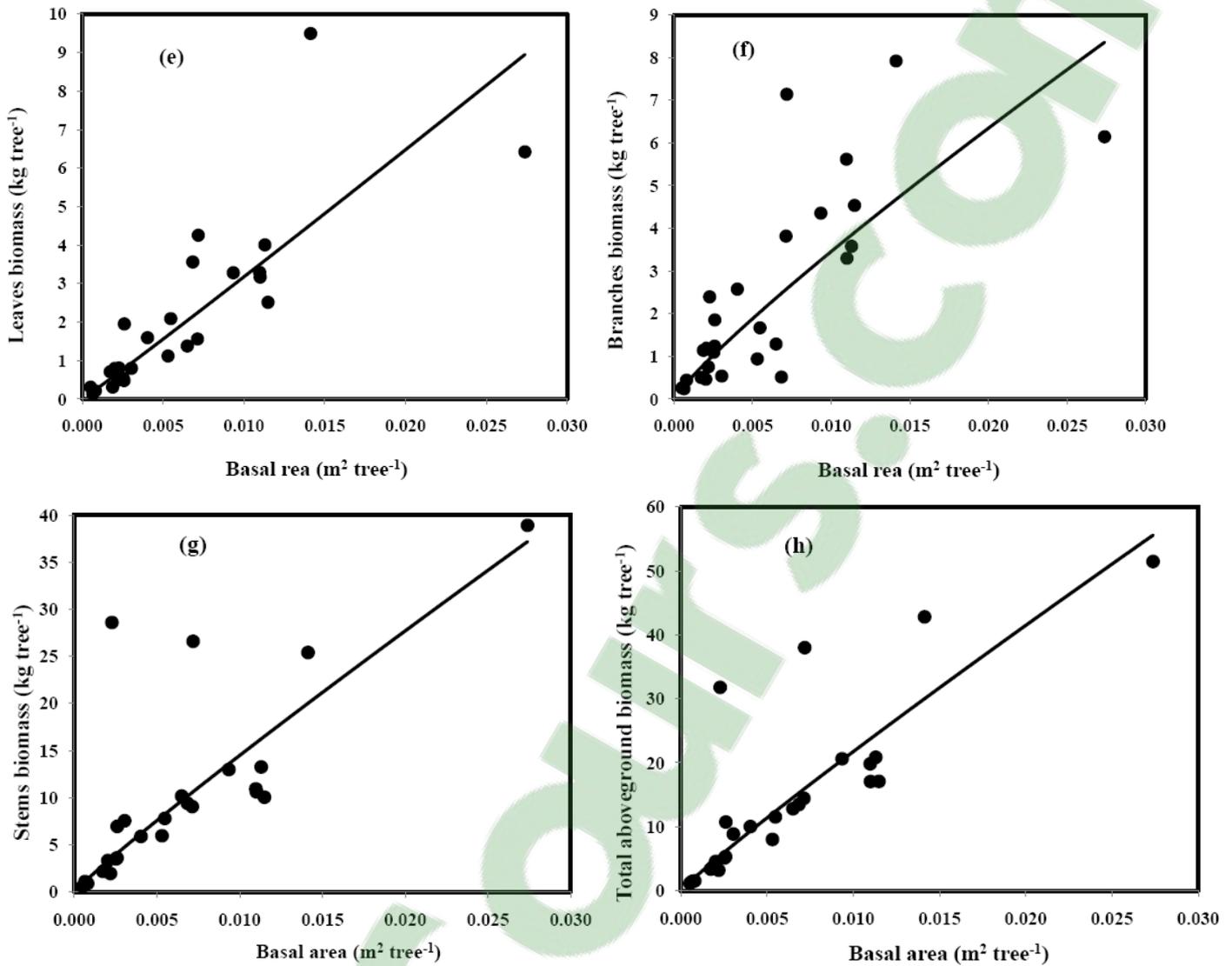


Figure 2.3 Relationships between shoots basal area (g in $m^2 \cdot tree^{-1}$) and dry weight above-ground biomass components of (e) leaves, (f) branches, (g) stems and (h) total above-ground dry biomass ($N = 27$).

2.3.3. Biomass partitioning

FR biomass which were directly assessed by core sampling and reported in $Mg \ ha^{-1}$ is included with BLG biomass production (Table 2.3). Overall, BLG biomass ranged from 82.3 to $100.9 \ Mg \ ha^{-1}$. The stump component was the largest part of the BLG production (Fig. 3i); it alone contained $46.5 \pm 3.6 \ Mg \ ha^{-1}$ of biomass. By descending order after the stumps, CR contains $38.2 \pm 2.7 \ Mg \ ha^{-1}$; MR and FR were the smallest components with $3.9 \pm 0.3 \ Mg \ ha^{-1}$ and $3 \pm 2.5 \ Mg \ ha^{-1}$ respectively.

Regarding the ABG part (Fig. 3j), it's the stem biomass which represented the largest production with $19.9 \pm 5.9 \text{ Mg ha}^{-1}$ against $4.2 \pm 1.3 \text{ Mg ha}^{-1}$ and $4.8 \pm 1.4 \text{ Mg ha}^{-1}$ for leaves and branches production respectively. Total ABG biomass varied hence from 19.3 to 39.8 Mg ha^{-1} .

2.3.4. Correlation between variables

PCA on data presented here lead to certain noteworthy results (Figure 2.4). Concerning relationships between variables (presented beforehand in table 1): (i) there were significant and positive correlations between ABG biomass and coppice age, ABG biomass and shoot dimensions (mean CBH and H) with $r = 0.9$ and 0.8 respectively; (ii) significant and negative correlation were found between stump density (nb. stump.ha⁻¹) and stump circumference ($r = -0.9$); shoot density (nb. shoot ha⁻¹) and shoot dimensions (always mean CBH and H; $r = -0.8$), and mean CBH and the number of shoots per stump (Nb shoot/stump in Fig. 4; $r = -0.7$). (iii) Despite a coefficient correlation of 0.5 between BLG biomass and plantation age, this correlation was not significant, as between BLG biomass and all the other variables. Regarding the principal components (PCs), PC#1 showed 53.4% of the variance of our data and was linked should to the ABG parts (ABG biomass, shoot dimensions and coppice age (Figure 2.4i) with $r = 0.9$ for each of them; PC#2 with 22.9% of the variance was linked with the BLG variables (stump circumference and stump density; $r = -0.8$ and 0.8 respectively), and the third PC with its 12.7% (Figure 2.4j) represented mainly the BLG biomass ($r = 0.9$).

Table 2.3 Biomass production (Mg ha⁻¹) for the selected stands of *Eucalyptus robusta* in the central highlands of Madagascar (N= 9).

Plot	Age	Leaves	Branches	Shoot	ABG	Stump	CR	MR	BLG	Total
1	47	3.3 (0.4)	3.8 (0.6)	15.8 (2.4)	22.9 (3.4)	47.1 (12.1)	34.8 (9.7)	3.2 (1.0)	85.0 (22.7)	107.8 (26.0)
2	77	5.3 (1.5)	5.8 (1.3)	24.4 (5.9)	35.5 (8.7)	42.3 (6.4)	36.1 (6.4)	3.9 (0.7)	82.3 (13.5)	117.4 (21.8)
3	52	2.9 (0.7)	3.5 (0.7)	14.0 (3.1)	20.4 (4.5)	43.5 (5.0)	35.9 (1.9)	3.6 (0.5)	83.0 (6.2)	103.0 (10.6)
4	72	5.9 (0.9)	6.5 (0.8)	27.3 (3.5)	39.8 (5.1)	44.7 (0.7)	37.9 (1.4)	3.9 (0.3)	86.5 (2.4)	125.8 (2.8)
5	53	2.7 (1.1)	3.3 (1.1)	13.4 (4.8)	19.4 (7.0)	43.0 (5.7)	36.2 (4.0)	3.7 (0.4)	82.9 (9.8)	101.9 (14.9)
6	67	5.5 (0.8)	6.1 (0.7)	25.3 (3.1)	36.8 (4.6)	48.7 (6.4)	40.0 (5.8)	4.0 (0.7)	92.8 (12.8)	129.1 (9.3)
7	72	5.5 (1.1)	6.2 (0.9)	25.6 (4.3)	37.3 (6.4)	46.4 (8.3)	39.8 (4.2)	4.3 (0.5)	90.6 (12.2)	127.5 (14.7)
8	67	2.7 (0.3)	3.4 (0.2)	13.3 (1.0)	19.3 (1.5)	48.8 (12.9)	40.0 (5.0)	4.2 (0.3)	93.0 (17.6)	112.1 (19.1)
9	87	4.3 (1.7)	5.0 (1.7)	20.3 (7.4)	29.6 (10.7)	53.7 (10.4)	43.0 (7.2)	4.2 (0.6)	100.9 (18.0)	130.0 (28.6)

Values in bold are the mean of biomass production for each component in each stand; components are: leaves, branches and shoots for ABG part and stump, coarse roots (CR), medium roots (MR) for the BLG part. Values in brackets represented the standard deviation, and **Age** corresponds to the date of first eucalyptus plantation.

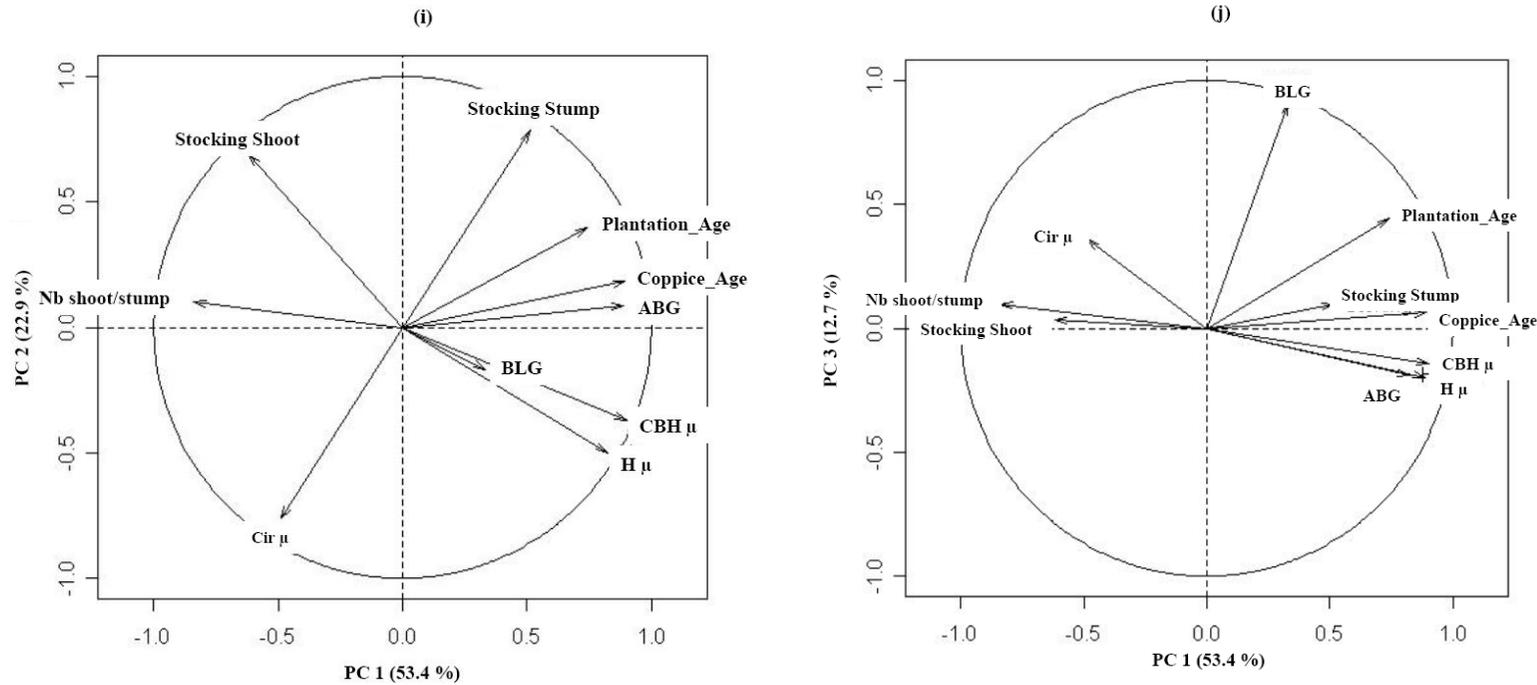


Figure 2.4 Projections of the measured and calculated variables in the principal component spaces: (i) for the space (1, 2) and (j) for the space (1, 3). Abbreviations of variables are given in Table 2.1.

2.4. DISCUSSIONS AND CONCLUSIONS

2.4.1. Allometry relations

In high forest of eucalyptus (another management regime which consists of succession of plantation, harvest and re-plantation after a long rotation), BLG biomass, or coarse root biomass particularly, is often highly correlated with stem size and biomass (Misra *et al.*, 1998; Forrester *et al.*, 2006). Nevertheless, with these old coppices of eucalyptus plantations in the current study, stump circumference could predict properly BLG biomass. In fact, the stump is the only measurable component left after each coppicing event and then it should reflect BLG production. Anyway, if allometry equation could explain about 87% of overall BLG parts, the explained variance decreased with BLG component size (90% for the stump against only 25 % for MR).

In regard to the ABG part, allometry equations developed here were closed to those used for classical ABG biomass assessment (Senelwa and Sims, 1998; Verwijst and Telenius, 1999; Zewdie *et al.*, 2009). Instead of establishing allometric relations between each shoot diameter or circumference and the dry weight of its component, it was the whole biomass of the considered component for a tree which was directly related with the basal area of all shoots per tree. Actually, diameter or CBH of all shoots per tree was highly variable and the basal area (expressed from CBH; see *formulae (1)*) seemed to be the best predictor for ABG biomass. The use of CBH alone (expressing the basal area) for ABG biomass estimation is common to many studies that showed that diameter at breast height (DBH) is one of the universally used predictors, because it shows a high correlation with all tree biomass components and easy to obtain accurately (Heinsoo *et al.*, 2002; Antonio *et al.*, 2007; Zianis, 2008). But many studies demonstrated too that tree diameter (or circumference), tree height and a combination of these variables could be also used as predictor variables for this ABG biomass estimation (Montagu *et al.*, 2005; Zewdie *et al.*, 2009). Yet, field work for obtaining reliable height to develop allometry regression is time-consuming. We agree then with their conclusion which stipulated that developing regression models based only in stem diameters (and basal area), for practical purposes allowed a minimized inventory cost to estimate ABG while still being sufficiently accurate.

2.4.2. Biomass production and partitioning

First, about ABG biomass per tree (and ABG tree component partitioning), values ranged among those from the other studies. For instance: (i) Senelwa&Sims (1998) in New Zealand found that total ABG varied from 0.6 to 102 kg tree⁻¹ for coppices of eucalyptus of 3-5 years, (ii) Antonio *et al.* (2007) in Portugal from 0.2 to 254.1 kg tree⁻¹ for coppices of *E. globulus* between 2.5 and 13 years old (duration of plantation not precised) and (iii) Zewdie *et al.* (2009) reported 0.5 to 123.4 kg stem⁻¹ for greater stools of *E. globulus* in Ethiopia. ABG production per unit of area were within the range reported by other authors (Laclau *et al.*, 2000; Guo *et al.*, 2002; Zewdie *et al.*, 2009).

Besides, there is lack of references which could be compared with estimation investigated herein. Studies in eucalyptus plantations (5 -6 years after planting, corresponding to one cycle) in Portugal and in Cameroon (Madeira *et al.*, 2002; Harmand *et al.*, 2004; Saint-André *et al.*, 2005) reported 13.8 to 26.8 Mg ha⁻¹. These BLG biomasses are very smaller regarding the BLG assessed in our study (75 to 94 Mg ha⁻¹) due to the difference of system management (multiple stems versus single stem of high forest) and the duration of plantation (from 47 to 87 years herein, corresponding to more than nine cycles). In fact, in coppicing species such as eucalyptus, there is an underground lignotuber which contains a large store of potential bud-forming sites capable of producing several individual shoots (Wildy and Pate, 2002). After each cutting cycle, this part of the tree is recovered by cambium for emerging new shoots and constitutes the stump. Stump is the woody base of the trees as left after coppicing and they included a large part of the root system (Saint-André *et al.*, 2005) before CR biomass (Misra *et al.*, 1998): 51% and 42% respectively in our case. Besides, FR biomass represented only a small part of this root system, which is similar with the result reported by Girdiana and Ryan (2002).

In terms of biomass partitioning between ABG and BLG part, the root:shoot (R:S) ratios found in our study ranged from 2.2 to 5. These values were inverse of those in regarding all types of biomes to study root biomass allocation in the world's upland forests which varied from 0.05 to 0.7 with tendency values of 0.2 to 0.3 (Cairns *et al.*, 1997; Snowdon *et al.*, 2000; Leuschner *et al.*, 2007). If R:S ratio shows that the lower root mass, the lower the ratio and higher aerial biomass production (Harmand *et al.*, 2004) that is usually exist in conventional forest regime, R:S found in our study (with old coppices) do not rather reflect this natural allocation of biomass where the proportion of BLG is higher in younger tree (Misra *et al.*, 1998; Forrester *et al.*, 2006). Actually, when ABG part is removed every cutting cycle, the BLG part left in the stand continuously

increases and stores nutrient reserve for new resprouting. We agree then with the statement that BLG had to be estimated directly, rather than by using R:S ratio (Cairns *et al.*, 1997).

2.4.3. Biomass production over time

An attempt of studying relations between duration of plantation and tree compartments (ABG and BLG) was performed. Results showed that there were no significant (at $\alpha = 0.05$) relationships between plantation age and ABG (*p-value* = 0.07) in the one hand and with BLG (*p-value* = 0.06) in the other hand. These findings fitted and emphasized the PCA results (Figure 2.4). In short rotation forestry, coppice-shoot age was found to be a significant factor influencing allometry relationships (Telenius and Verwijst, 1995; Heinsoo *et al.*, 2002; Saint-André *et al.*, 2005; Zewdie *et al.*, 2009). But for BLG part, only plantation age could not explain biomass production over time. In fact, PCA results showed BLG biomass production was independent from ABG production as there was found in other studies (Paukkonen and Kauppi, 1998) and may be from only the plantation age. Actually, Figure 2.4 pointed out that BLG, ABG and plantation age were in perpendicular positions which proved that they are not correlated. Thus, other variables that may influence BLG and ABG production should be considered or combined to well characterize BLG dynamic such as distribution of stump circumference, spacing between stumps and site characteristics (mainly, soil variability).

2.5. CONCLUSIONS

As a conclusion, this work demonstrated that BLG biomass could be estimated by allometric relations established on accurate destructive measurements and use of proper dendrometric variable (which is stump circumference herein). For ecosystems such as these old coppices of *Eucalyptus robusta* in the Central Highlands of Madagascar, the BLG part was pointed out to constitute major components for biomass accumulation. Actually, BLG biomass contributed greatly (more than 77%) in the 102 to 130 Mg ha⁻¹ of the whole biomass density. This important contribution of the BLG part has to be explored in developing Clean Development Mechanism (CDM) projects, because, added to wood energy supplies, incomes which can be generated from carbon sequestration activities could be profitable for rural people. Nevertheless, more investigation is needed to well understand biomass production over time and the question of ecosystem sustainability. Other factors (mainly soil variability) have to be considered.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was funded by the “Departement du Soutien et Formation des Communautés du Sud-Institution de Recherche pour le Développement (DSF-IRD)” and the French Government within the framework of a PhD; mainly during the data collection and analysis. We thank local people in the Commune of Sambaina for their profitable collaboration during field work and all our colleagues from the “Laboratoire des RadioIsotopes (LRI)”, and the “Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques-Département Eaux&Forêts (ESSAgro-Forêts)” for their technical support. We also thank the “Foibe Fikarohana momba ny Fambolena (FOFIFA)” and the “Coopération Internationale en recherché Agronomique pour le Développement (CIRAD)” for their useful technical assistance.

REFERENCES

- Antonio, N., Tomé, M., Tomé, J., Soares, P., Fontes, L., 2007. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. Canadian Journal of Forest Researches 37, 895-906.
- Bertrand, A., 1999. La dynamique séculaire des plantations paysannes d'Eucalyptus sur les Hautes Terres malgaches. Le Flamboyant 49, 45-48.
- Bouillet, J.-P., Laclau, J.-P., Arnaud, M., Thongo M'Bou, A., Saint-André, L., Jourdan, C., 2002. Changes with age in the spatial distribution of roots of Eucalyptus clone in Congo Impact on water and nutrient uptake. Forest Ecology and Management 171, 43-57.
- Burrows, W.H., Henry, B.K., Back, P.V., Hoffmann, M.B., Tait, L.J., Anderson, E.R., Menke, N., Danaher, T., Carter, J.O., McKeon, G.M., 2002. Growth and carbon stock change in eucalyptu woodlands northeast Ausatralia: ecological and greenhouse sink implications. Gloal Change Biology 8, 769-784.
- Cairns, M.A., Brown, S., Helmer, E.H., Baumgardner, G.A., 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. Oecologia 111, 1-11.
- Carriere, S.M., Randriambanona, H., 2007. Biodiversité introduite et autochtone : antagonisme ou complémentarité ? Le cas de l'eucalyptus à Madagascar. Bois et Forêts des Tropiques 292, 5-21.

- Crow, P., Houston, T.J., 2004. The influence of soil and coppice cycle on the rooting habit of short rotation poplar and willow coppice Biomass and Bioenergy 26, 497 – 505.
- FAO, 2006c. Global planted forests thematic study: results and analysis, by A. Del Lungo, J. Ball, J. Carle. In, Planted Forests and trees working paper Rome.
- FAO, 2006b. 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, 2007. Situation des Forêts du monde 2007. In, Rome, p. 157.
- Fearnside, P.M., 2000. Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. Climatic Change 46, 115-158.
- Forrester, D.I., Bauhus, J., Cowie, A.L., 2006. Carbon allocation in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. Forest Ecology and Management 233, 275–284.
- Giardina, C.P., Ryan, M.G., 2002. Total Belowground Carbon Allocation in a Fast-growing Eucalyptus Plantation estimated Using a Carbon Balance Approach. Ecosystems 5, 487–499.
- Gueuneau, P., 1969. L'*Eucalyptus robusta* à Madagascar. Bois et Forêts des Tropiques 124, 53-65.
- Guo, L.B., Sims, R.E.H., Horne, D.J., 2002. Biomass production and nutrient cycling in Eucalyptus short rotation energy forests in New Zealand. I: biomass and nutrient accumulation. Bioresource Technology 85, 273–283.
- Harmand, J.-M., Njiti, C.F., Bernhard-Reversat, F., Puig, H., 2004. Aboveground and belowground biomass, productivity and nutrient accumulation in tree improved fallows in the dry tropics of Cameroon. Forest Ecology and Management 188, 249–265.
- Heinsoo, K., Slid, A., Koppel, A., 2002. Estimation of shoot biomass productivity in Estonian Salix plantations Forest Ecology and Management 170, 67-74.

- IPCC, 2007. Climate Change 2007 – Mitigation of Climate Change - Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In. Cambridge University Press, Cambridge, p. 851.
- Jandl, R., Vesterdal, L., Olsson, M., Bens, O., Badeck, F., Rock, R., 2007. Carbon sequestration and forest management. In. CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources 2, 1749-8848
- Laclau, J.P., Bouillet, J.P., Ranger, J., 2000. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of Eucalyptus in Congo. *Forest Ecology and Management* 128, 181-196.
- Leuschner, C., Moser, G., Bertsch, C., Röderstein, M., Hertel, D., 2007. Large altitudinal increase in tree root/shoot ratio in tropical mountain forests of Ecuador. *Basic and Applied Ecology* 8, 219—230.
- Lucot, E., Sánchez-Pérez, J.M., Bariac, T., Trémoières, M., 2008. Water uptake by trees in a riparian hardwood forest (Rhine floodplain, France). *Hydrological Processes* 22, 366-375.
- Madeira, M.V., Fabião, A., Pereira, J.S., Araújo, M.C., Ribeiro, C., 2002. Changes in carbon stocks in Eucalyptus globulus Labill. plantations induced by different water and nutrient availability. *Forest Ecology and Management* 171, 75-85
- Malhi, Y., Meir, P., Brown, S., 2002. Forests, carbon and global climate. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 360, 1567-1591.
- Misra, R.K., Turnbull, C.R.A., Cromer, R.N., Gibbons, A.K., LaSala, A.V., 1998. Below- and above-ground growth of Eucalyptus nitens in a young plantation: I. Biomass. *Forest Ecology and Management* 106, 283–293.
- Montagu, K.D., Düttmer, K., Barton, C.V.M., Cowie, A.L., 2005. Developing general allometric relationships for regional estimates of carbon sequestration—an example using Eucalyptus pilularis from seven contrasting sites. *Forest Ecology and Management* 204, 115-129.
- Nordh, N.-E., Verwijst, T., 2004. Above-ground biomass assessments and first cutting cycle production in willow (Salix sp.) coppice—a comparison between destructive and non-destructive methods. *Biomass and Bioenergy* 27, 1-8.

- Paukkonen, K., Kauppi, A., 1998. Effect of coppicing on root system morphology and its significance for subsequent shoot regeneration of birches. *Canadiana Journal of Forest Research* 28, 1870-1878.
- Randrianjafy, H., 1999. Les plantations d'Eucalyptus à Madagascar : Superficie, rôle et importance des massifs. In. *Projet FAO GCP/INT/679/EC, Madagascar*, p. 80.
- Ranger, J., Gelhaye, D., Turpault, M.-P., 2002. Effect of semi-intensively managed forest plantations on soil quality and environment *Etude et Gestion des Sols* 9, 159-176.
- Robert, M., Saugier, B., 2003. Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. *C. R. Geoscience* 335, 577-595.
- Robinson, D., 2007. Implications of a large global root biomass for carbon sink estimates and for soil carbon dynamics. *Proceedings of the Royal Society* 274, 2753-2759.
- Saint-André, L., M'Bou, A.T., Mabiala, A., Mouvondy, W., Jourdan, C., Roupsard, O., Deleporte, P., Hamel, O., Nouvellon, Y., 2005. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a Eucalyptus hybrid in Congo. *Forest Ecology and Management* 205, 199–214.
- Santantonio, D., Herman, R.K., Overtos, W.S., 1977. Root biomass studies in forest ecosystems. *Pedobiologia* 17, 1-31.
- Senelwa, K., Sims, R.E.H., 1998. Tree biomass equations for short rotation eucalypts grown in New Zealand. *Biomass and Bioenergy* 13, 133-140.
- Snowdon, P., Eamus, D., Gibbons, P., Khanna, P., Keith, H., Raison, J., Kirschbaum, M., 2000. Synthesis of allometrics, review of root biomass and design of future woody biomass sampling strategies. In, *National Carbon Accounting System Technical Report*. The Australian Greenhouse Office, Australia, p. 136.
- Telenius, B., Verwijst, T., 1995. The influence of allometric variation, vertical biomass distribution and sampling procedure on biomass estimates in commercial short-rotation forests. *Bioresource Technology* 51, 247-253.
- Verwijst, T., Telenius, B., 1999. Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *Forest Ecology and Management* 121, 137-146.

Wildy, D.T., Pate, J.S., 2002. Quantifying above- and below-ground growth response of the western Australian Oil Mallee, *Eucalyptus kochii* subsp. *plenissima*, to constricting decapitation regimes. *Annals of Botany* 90, 18.

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.

Zianis, D., 2008. Predicting mean aboveground forest biomass and its associated variance. *Forest Ecology and Management* 256, 1400–1407.

CHAPITRE III. FONCTION DE PUIITS DE CARBONE DES TAILLIS D'EUCALYPTUS A MADAGASCAR

Article soumis et accepté à la revue « Bois et Forêts des Tropiques »

Razakamanarivo Ramarson Herintsitohaina^{1,2}, Razafindrakoto Marie-Antoinette², Albrecht Alain¹

¹ Laboratoire des Radioisotopes (LRI) - IRD UMR 210 Eco&Sols, BP 3383, Route d'Andraisoro. 101 Antananarivo, Madagascar

² Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Eaux et forêts, BP 175 Université d' Antananarivo, 101 Antananarivo. Madagascar



Photo 3.1 Importance des plantations d'Eucalyptus robusta dominant le paysage des Hautes Terres malgaches. Ici (Sambaina-Manjakandriana), les taillis d'eucalyptus se trouvent sur tous les types de versant, en bordure de route et aussi sur les collines. Photo : Grinand C.

RESUME

Les écosystèmes forestiers tiennent un grand rôle face au réchauffement climatique grâce aux réservoirs importants de carbone organique (C) de ses compartiments (aérien, racinaire, litière et sol). Dans le secteur de l'utilisation des terres, les changements d'affectation des terres et la foresterie, les mesures précises des stocks de C dans ces compartiments sont recommandées. Dans ce sens, la capacité de fixation de C des taillis d'eucalyptus (20 à 111 ans) des Hautes Terres Centrales malgaches dans ses compartiments a été étudiée, en comparaison avec d'autres modes d'usage des terres (pseudo-steppe, rotation culture/jachère). Des mesures destructives de biomasses et des prélèvements de sols ont été effectuées, suivies par le développement d'équations allométriques et des analyses au laboratoire (détermination de la teneur en carbone, étude isotopique).

Tous âges confondus, la pratique de taillis d'eucalyptus présente le plus grand stock de C (150.8 ± 25.3 Mg C ha⁻¹ vs 112 ± 15 et 72.3 ± 9.9 Mg C ha⁻¹ pour la pseudo-steppe et la rotation culture/jachère respectivement). Pour tous modes d'usage, c'est le compartiment sol qui constitue le principal réservoir de C avec 56% pour l'eucalyptus et plus de 96% pour les autres modes. Mais, ce sont essentiellement la souche et les racines lignifiées qui rendent ces plantations d'eucalyptus plus efficaces que les autres modes d'usage (44 Mg C ha⁻¹ pour l'eucalyptus vs 2 Mg C ha⁻¹) en termes de stockage de C. Cependant, d'après l'étude isotopique, le C dérivé de l'eucalyptus dans le sol ne domine qu'en surface, probablement en raison de la gestion en taillis. Toutefois, d'autres facteurs, à part la durée de plantation, comme l'altitude et la morpho-pédologie sont à considérer pour comprendre la dynamique des stocks de C mesurés.

Mots-clés: biomasse racinaire, carbone organique du sol, changement d'usage des terres, chronoséquence, isotope ¹³C, séquestration de carbone

3.1. INTRODUCTION

3.1.1. Contexte scientifique

Avec les préoccupations actuelles concernant le réchauffement global lié à l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre ou GES (CO_2 , CH_4 , NO_2) de l'atmosphère, les écosystèmes terrestres, en particulier forestiers, jouent un rôle important dans l'atténuation de ce phénomène climatique. En effet, avec des réservoirs estimés à 652 Gt C pour la végétation et 1500 à 2000 Gt C pour le sol (jusqu'à 1 m de profondeur) (FAO, 2001; IPCC, 2007a), ces écosystèmes ont une grande influence sur le cycle du carbone (C) (Locatelli et Lescuyer, 1999; Robert et Saugier, 2003). Tout changement de mode d'usage des terres peut avoir par conséquent des effets considérables sur leur capacité de séquestrer du C (Post et Kown, 2000; Guo et Gifford, 2002). Il s'avère ainsi indispensable de connaître les potentialités de chaque catégorie d'affectation des terres (culture, savane, pâture, plantations forestières, forêts naturelles, etc.) en termes de séquestration de C et de pouvoir les gérer. Pour cela, plusieurs compartiments contribuant à la fixation de C atmosphérique et constituant les réservoirs de C sont à considérer (IPCC, 2006), à savoir : les biomasses aérienne et souterraine, la matière organique morte de la litière et la matière organique du sol. Les plantations forestières, selon leur âge, elles sont reconnues pour avoir un effet sur l'augmentation du stock de C dans ses compartiments de la biomasse et du sol (Paul *et al.*, 2002; Lal, 2005). Toutefois, divers facteurs peuvent affecter la capacité de fixation de C dans ces différents compartiments (Locatelli et Lescuyer, 1999; Guo et Gifford, 2002), comme : l'espèce, les soins sylvicoles, la durée de rotation, l'antécédent cultural ...

Concernant les GES non- CO_2 , les forêts constituent aussi un puits important de CH_4 (notamment dans les sols des écosystèmes tempérés, (Dalal *et al.*, 2008)) tout en produisant un peu de N_2O (Livesley *et al.*, 2009) quand les nutriments sont bien recyclés. Toutefois, des études sur des peuplements d'eucalyptus ont conclu que c'est le CO_2 qui constitue le principal GES concerné dans ces écosystèmes, les flux des deux autres gaz étant faibles. (Fest *et al.*, 2009), lors de la détermination de l'importance et de la variation spatiale des échanges entre le sol et l'atmosphère en N_2O , CH_4 et CO_2 dans une forêt d'*E. delegatensis* en Australie montrent que cette forêt constitue un net puits de GES et où la contribution de la fixation de CH_4 et de l'émission de N_2O sont seulement de 0,3% chacune.

A Madagascar, l'eucalyptus est une espèce massivement adoptée par les populations malgaches en raison de l'ancienneté de sa diffusion, de sa capacité à constituer une alternative à la dégradation des forêts naturelles, mais aussi pour le contexte foncier (Carriere et Randriambanona, 2007). Couvrant environ plus de 150 000 ha en 2005 (USAID, 2006), les plantations d'eucalyptus sont localisées majoritairement sur les Hautes Terres Centrales ou HTC (**Photo 3.2**) et tiennent une place importante pour les communautés malgaches : elles fournissent du bois de chauffe, du bois de construction et du charbon de bois notamment pour les milieux urbains et, contribuent à l'amélioration des conditions de vie des communautés rurales grâce aux revenus réguliers qu'elles génèrent. Toutefois, leur potentiel en termes de séquestration de C reste encore méconnu alors que ces pratiques forestières pourraient être valorisées dans le cadre des projets Mécanisme pour le Développement Propre ou MDP, en les traduisant en crédits carbone qui généreront des revenus via le marché du carbone.

L'objectif général de ce travail est alors d'étudier les capacités de fixation de CO₂ des plantations d'eucalyptus des HTC dans ses différents compartiment (aérien, souterrain, litière, sol) en comparaison avec les autres principaux modes d'usage des terres qui y sont rencontrés, entre autres : la pseudo-steppe qui constitue le système originel et la rotation culture/jachère. Plus particulièrement, les objectifs de cette étude sont : (i) pour chaque mode d'usage des terres, quantifier les stocks de C dans les différents compartiments afin d'évaluer les éventuelles différences de capacité de séquestration de C, (ii) pour les plantations d'eucalyptus, identifier les compartiments séquestrants et analyser leur potentialité en terme de puits de C.



Photo 3.2 Divers types de reliefs et de versants sont recouverts de plantations d'eucalyptus dans la Commune Rurale de Sambaina-Manjakandriana ; une saturation de l'espace est observée.

Photo : Raçakamanarivo R.H

3.1.2. Les plantations d'eucalyptus à Madagascar

Les premières introductions de l'eucalyptus à Madagascar datent du début des années 1900 sur des terrains de savane et/ou pseudo-steppe. Avec une soixantaine d'espèces introduites à l'époque (Gueuneau, 1969; Carriere et Randriambanona, 2007), les superficies plantées n'ont cessé de s'accroître, constituant ainsi une chronoséquence. Parmi les 180 espèces d'eucalyptus introduites, douze ont été prouvées comme prometteuses pour la production de bois d'œuvre, d'industrie et d'énergie : *Eucalyptus robusta*, *E. camaldulensis*, *E. grandis*, *E. citriodora*, *E. cloeziana*, *E. corymbosa*, *E. eugenioides*, *E. macrorhyncha*, *E. maculata*, *E. microcorys*, *E. tereticornis* et *E. torelliana* (Randrianjafy, 1999). Mais, *E. robusta* a marqué une extension particulière grâce à sa faculté d'adaptation et d'aptitude à pousser avec vigueur sur des sols compacts, tout en résistant au feu. Grâce à son aptitude à rejeter, les souches d'*E. robusta* sont coupées régulièrement (régime sylvicole de taillis) pour la production de charbon et de bois de chauffe (**Photo 3.3**). La durée de rotation est courte, allant de 3 à 5 ans, selon les besoins financiers des propriétaires. Les pieds

n'ont pas été renouvelés depuis leur mise en place, les peuplements restent livrés à eux-mêmes (pas d'entretien sylvicole) et la litière de feuilles décomposées d'eucalyptus (localement appelée « *fongo* » ; **Photo 3.4**) se récolte et parfois se vend comme engrais de complément (Bertrand, 1999). Sous forme de fumure organique (litière mélangée avec du fumier, des terreaux et des déchets ménager et agricole), le « *fongo* » est épandue dans les rizières ou même au niveau des versants cultivés.

3.2. MATERIELS ET METHODES

3.2.1. Les zones et les parcelles étudiées

Deux Communes Rurales (CR) appartenant au district de Manjakandriana sont considérées par le fait qu'elle témoigne de l'histoire de l'importance des plantations d'eucalyptus dans l'ensemble de son territoire (cas de la CR de Sambaina), ou parce qu'elle présente un front d'afforestation (cas de la CR de Sadabe).

La CR de Sambaina se trouve à 53 km de la capitale (Antananarivo) dans la direction Nord, couvre une superficie de 2 900 ha entre les latitudes 18° 51' et 18° 56' Sud et longitudes 47° 45' et 47°48' Est et se trouve à 1350 – 1750 m d'altitude. A part les peuplements d'eucalyptus qui occupent plus de la moitié de la surface de la CR, les autres modes d'usages sont : (i) la pseudo-steppe qui est constituée pas une savane herbeuse comportant des arbustes (*Aphloia theaeformis*, *Psiadia altissima*, *Helichrysum sp.*, *Loudetia sp.*, *Imperata sp.* et *Phillipia sp.*) et (ii) la rotation culture/jachère. La CR de Sadabe se trouve à 45 km au Nord Est de la capitale, présente une superficie de 23 150 ha entre les latitudes 18° 30' et 18° 40' Sud et longitudes 47° 41' et 47°45' Est et se trouve à 1200 – 1500 m d'altitude. Ce sont les savanes herbacées (à *Aristida sp.* et *Imperata sp.*) qui dominent le paysage (plus de 53%) et les plantations d'eucalyptus mélangées à la savane arborée couvrent environ 35% de sa superficie (**Figure 3.1**).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Photo 3.3 Aperçus des taillis d'eucalyptus des HTC malgaches et illustrations de leur utilisation : (a) et (b) Parcelles de taillis en fin de rotation qui seront prochainement recépées, (c) Enfants villageois transportant des branches d'eucalyptus qu'ils ont ramassé pour leur consommation locale de bois de chauffe et d'énergie, (d) Recépage d'une parcelle en fin de rotation assuré par un bûcheron du village, (e) Stocks de bois de chauffe et d'énergie récemment coupés sur la parcelle, (f) Chargement en bois de chauffe et d'énergie d'un camion assurant l'approvisionnement de la capitale, (g) Charbonnière traditionnelle en cuite au niveau de la parcelle, (h) Sacs de charbon prêts pour embarquement en ville. Photo : Razakamanarivo R.H.



(i)

(j)



Photo 3.4 Exploitation de la litière d'eucalyptus (« fongo ») : (i) Décapage manuel de la couche fragmentée et humifiée de la litière (à l'aide d'une bêche), (j) Etable dont la litière est à base de « fongo ». Photo : Razakamanarivo R.H.

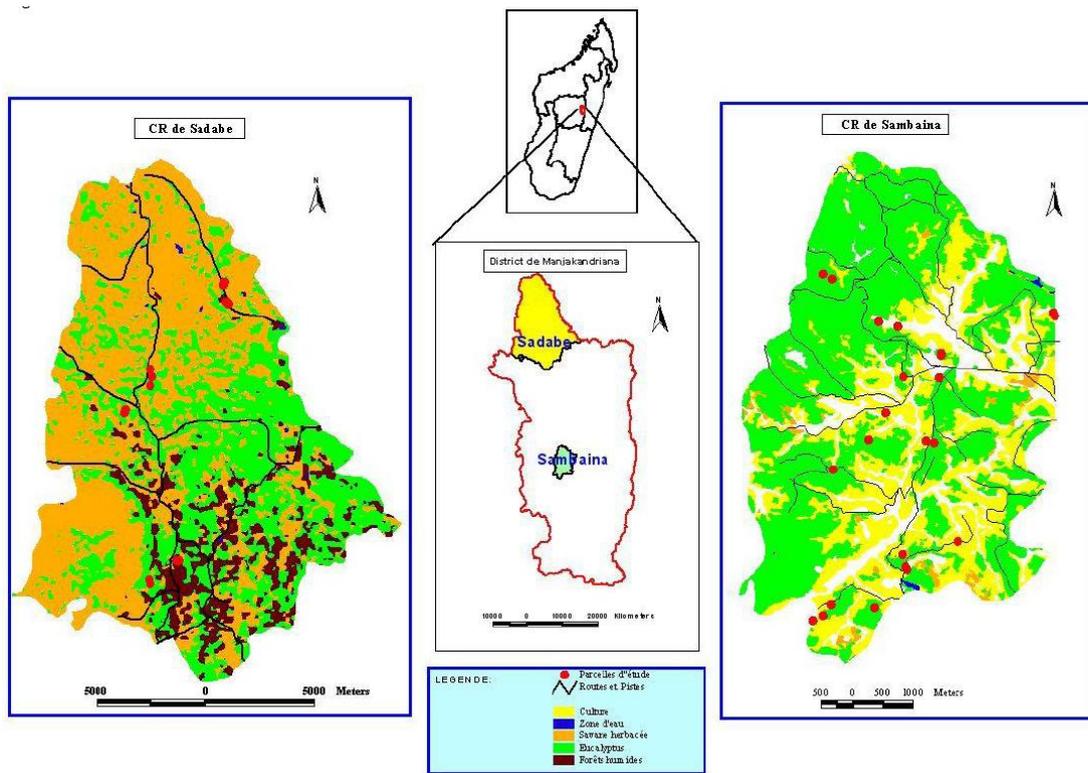


Figure 3.1 Localisation des Communes Rurales étudiées et leur occupation des terres par rapport à la carte de Madagascar.



Photo 3.5 Un profil du type de sol (jaune sur rouge) rencontré dans les zones d'étude sur une profondeur de 1m. Photo : Razakamanarivo R.H.

Le climat du district de Manjakandriana est du type tropical d'altitude avec une température moyenne annuelle de 17°C et 1 618 mm de pluviosité. La roche mère est constitué de granite porphyroïde donnant des ferralsols selon la classification de la FAO, sols aussi appelés ferrallitiques jaune sur rouge localement (Bourgeat et Zebrowski, 1973) (**Photo 3.5**). Pour rappel, trois principaux modes d'usage de terres sur les HTC de Madagascar ont été considérés: la pseudo-steppe (système originel), la rotation culture/jachère (**Photo 3.6**) et la chronoséquence d'eucalyptus. Les parcelles d'expérimentation ont été identifiées par catégorie d'affectation des terres ont été identifiées (**Tableau 3.1**) suite aux travaux de photo-interprétation et de SIG sur des photos aériennes disponibles (en date de 1949, 1965 et 1995), combinées aux traitements d'images satellites (Quickbird et SPOT 2006) et d'enquêtes sur terrain.



Photo 3.6 Les autres modes d'usages des terres (autre que taillis d'eucalyptus) étudiés : (k) Pseudo-steppe avec les pieds de *Philippia sp.*, (l) Diverses parcelles de rotation culture (au premier plan) - jachère (en second plan). Photo : Razakamanarivo R.H..

Tableau 3.1 Descriptions des parcelles étudiées sur les Hautes Terres de Madagascar.

Mode d'usage	Espèces	Observations
Plantation d'eucalyptus N = 41	<i>Eucalyptus robusta</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Propriétés privées (héritage familiale) à surface variable : de quelques ares à une dizaine d'hectare respectivement pour les familles moins aisées et plus aisées - Durée de plantation : 17 à 111 ans avec 1500 à 6300 souches.ha⁻¹ et la circonférence moyenne des souches (Cir) est de 141,2 cm - Age des rejets : 3 à 5 ans avec 7300 à 31100 rejets.ha⁻¹ et en moyenne : 6 rejets par souche ; 8,2 cm de Circonférence à Hauteur de poitrine (CHP) et 4,2 m de Hauteur totale (H) pour les rejets
Culture/jachère N = 6	Manioc, Patate douce	En général, 3 ans de culture et 1 à 2 ans de jachère selon la disponibilité en terrain du propriétaire
Savane / Pseudo-steppe N = 7	<i>Imperata cylindrica</i> <i>Aristida adescensionis</i> <i>Philippia sp.</i> <i>Hyparrhenia sp.</i>	

3.2.2. Quantification des stocks de C

3.2.2.1. Compartiments du végétal

Pour les eucalyptus, les équations allométriques couramment utilisées dans la quantification de la biomasse en foresterie (Locatelli et Lescuyer, 1999; Peltier *et al.*, 2007) ont été adoptées. Grâce à des mesures destructives réalisées sur 27 souches, des équations ont été établies (**Tableau 3.2**), liant le poids de la biomasse (matière sèche obtenue après étuvage à 70°C) de chaque compartiment de l'arbre (aérien ou souterrain) avec une variable dendrométrique facilement mesurable sur le terrain. Pour la partie souterraine, les mesures ont été réalisées en adoptant le protocole du polygone de Voronoï qui consiste à excaver toutes les racines se trouvant dans la surface de ce polygone (espace définis par la moitié des distances de l'arbre échantillonné et ses voisins ; (Santantonio *et al.*, 1977) et ce jusqu'à 1m de profondeur (**Photo 3.7**). La densité de biomasse à l'hectare a été ensuite calculée en appliquant ces équations aux mesures obtenues par inventaire.

Pour la litière, deux couches ont été considérées (Laclau, 2001; Harmand *et al.*, 2004; Maquere *et al.*, 2008): la litière de l'année (O₁) constituée par les débris de végétaux facilement

reconnaissables et la couche fragmentée et humifiée ($O_f + O_h$) mélangée au mat racinaire (c'est cette dernière qui constitue le « *fongo* »). Toute la litière contenue dans un cadre métallique (0,44 m x 0,44 m avec 3 ou 4 répétitions par parcelle) est récoltée, pesée et leur quantité de matière sèche est estimée par échantillonnage et étuvage.

Pour les autres modes d'usage des terres, toute la matière fraîche se trouvant dans une surface définie (0,5 m x 0,5 m avec 4 répétitions) a été prélevée, pesée et échantillonnée afin de déterminer la teneur en matière sèche. La partie souterraine a été extraite jusqu'à environ 30 cm de profondeur (les racines des espèces rencontrées ne dépassant pas cette profondeur).

Le coefficient 0,5 a été utilisé pour calculer la quantité de C renfermée dans les biomasses mesurées.

Tableau 3.2 Caractéristiques des équations de régression utilisées lors de 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 ($\varnothing \geq 10$ mm)	$Y = 0.02 x^{1.29}$	0,56	0.0003
Racine moyenne ($10 \text{ mm} < \varnothing \leq 2$ 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 $\alpha = 0,05$. Pour le compartiment aérien x est la surface terrière de tous les rejets supportés par une souche avec (exprimée en m².souche⁻¹) : $x = \sum_{i=1}^n (CHP_i)^2 / 4\pi$ (n étant le nombre de rejets par souche, CHP la circonférence à hauteur de poitrine de chaque rejet de la souche en cm). Pour le compartiment souterrain, x correspond à la circonférence de la souche (Cir en cm).



Photo 3.7 Compartiment souterrain (souche, grosses et moyennes racines) d'une souche d'eucalyptus géré en taillis en cours d'excavation de son aire de prélèvement (jusqu'à 1m de profondeur). Photo : Albrecht A.

3.2.2.2. Compartiment sol :

- Quantification du stock de C du sol (C_{sol})

Le sol a été prélevé à l'aide de cylindre métallique (528 cm^3) sur quatre profondeurs (tous les 10 cm jusqu'à 40 cm de profondeur) pour quatre points de prélèvement par parcelle. La densité apparente (Da) est estimée à partir de l'humidité à 105°C du sol brut prélevé. Le sol prélevé est séché à l'air libre, tamisé à 2mm et broyé à $200\mu\text{m}$ pour la mesure de la teneur en C organique. Cette dernière est mesurée par combustion par voie sèche (microanalyseur Carlo ERBA 2000). Pour des sols présentant des éléments grossiers ($\varnothing > 2 \text{ mm}$) comme les sols des deux Communes, les C_{sol} sont calculés d'après la formule suivante :

$$C_{sol}(\text{en Mg C.ha}^{-1}) = [C * (100 - \% \text{ en éléments grossiers}) * Da * e] / 10 \quad (2)$$

C étant la teneur en organique carbone ($\text{mg.g}^{-1}\text{sol}$); Da la densité apparente (g.cm^{-3}) et e , l'épaisseur de l'horizon de sol (cm).

Toutefois, il est nécessaire d'apporter une correction aux C_{sol} calculés puisque les situations à comparer présentent des profils de densité apparente différents suite à la différence du mode d'usage de la terre (Ellert et Bethany, 1995; Gifford et Roderick, 2003). En conséquence, les C_{sol} sont donc ramenés à une profondeur de référence de 0-30 cm et à masse équivalente de terre fixée à 4000 Mg sol.ha⁻¹ (Turner et Lambert, 1999; Paul *et al.*, 2002; Landais, 2003).

- *Etude isotopique du C_{sol} avec la méthode de traçage par les abondances naturelles en ^{13}C*

Selon les données disponibles, seulement un certain nombre de parcelles (14 parcelles sur les 57 sous différents modes d'usage, âges des eucalyptus variant de 50 à 111 ans) sont concernées par l'étude isotopique. La technique de traçage par l'abondance naturelle utilise la différence naturelle du ratio des deux isotopes stables du C [$\delta^{13}C$ (‰) = $^{13}C / ^{12}C$] entre les végétations en C_4 (graminées et espèces herbacées) et en C_3 (arbre) ou vice versa (Balesdent, 1991) ; elle offre ainsi un traceur naturel des changements d'écosystèmes et de la dynamique du C_{sol} . A partir du $\delta^{13}C$ de l'échantillon de sol et connaissant les valeurs de $\delta^{13}C$ de chaque végétal considéré, cette technique permet d'estimer la proportion du C hérité de la végétation originelle (C_4 savane/pseudo-steppe dans notre cas) et le C dérivé de la nouvelle végétation sur place (C_3 eucalyptus) (Bernoux *et al.*, 1998). Dans notre étude, les valeurs de $\delta^{13}C$ mentionnées dans la littérature ont été reprises : - 29 ‰ pour la litière et racine de l'eucalyptus (Trouvé *et al.*, 1994; Maquere *et al.*, 2008) et calculée à - 17,6 ‰ pour la pseudo-steppe. Cette valeur de $\delta^{13}C$ de la pseudo-steppe a été obtenue en tenant en compte à la fois : (i) l'abondance des plantes qui la constituent, (ii) et leurs valeurs de $\delta^{13}C$ qui sont de -12 ‰ pour les espèces graminéennes *Andropogon brazzæae*, *Loudezia spp.* (Trouvé *et al.*, 1994) et de -28,7 ‰ pour le *Philippia sp.* (valeur de $\delta^{13}C$ de *Arctostaphylon sp.* selon Smith et Esptein, 1971 ; une espèce de la même famille que *Philippia sp.*).

Pour un site qui a initialement porté une végétation C_4 , la proportion de carbone d'origine C_3 actuellement sur le site est calculée par :

$$C_{tot} = C_{C4} + C_{C3} \quad (3)$$

$$C_{tot} \delta_{tot} = C_{C4} \delta_{C4} + C_{C3} \delta_{C3} \quad (4)$$

avec : C_{tot} et δ_{tot} la teneur en carbone total dans le sol portant la végétation C_3 et son $\delta^{13}C$; C_{C3} et δ_{C3} la teneur en C provenant du C incorporé par l'eucalyptus et le $\delta^{13}C$ de la litière d'eucalyptus ;

C_{C4} et δ_{C4} la teneur en C provenant du C hérité de l'ancienne végétation et le $\delta^{13}C$ de la plante qui l'a constitué.

Par transformation de l'équation (3) $C_{C3} = C_{tot} - C_{C4}$ et son application sur (4), on a :

$$C_{C3} / C_{tot} = (\delta_{tot} - \delta_{C4}) / (\delta_{C3} - \delta_{C4}) \quad (5)$$

Les résultats de l'équation (5) ont été par la suite appliqués à l'équation (1) pour calculer les stocks de C dérivés soit de l'eucalyptus ou de la pseudo-steppe.

3.2.3. Analyses statistiques

Une analyse de la variance ANOVA a été effectuée afin de déterminer les éventuelles différences entre les modes d'usage des terres sur les stocks de C renfermés dans leurs différents compartiments. Pour la chronoséquence de plantations d'eucalyptus, une étude des relations entre la durée de plantation et les stocks de C mesurés dans les compartiments qui seront identifiés comme séquestrant a aussi été réalisée (calcul du coefficient de détermination R^2 et de sa probabilité de significativité p au seuil de $\alpha = 0,05$).

3.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.3.1 Les quantités de C de la biomasse

La répartition de la quantité de C dans les différents compartiments de la biomasse change d'un mode de gestion à l'autre avec une plus large quantité contenue dans la biomasse de l'eucalyptus (**Figure 3.2**). En effet, les stocks de C de l'ensemble des parties aérienne et souterraine sont de 0,1 à 5,1 Mg C.ha⁻¹, 2,1 à 7,2 Mg C.ha⁻¹ et 19 à 90 Mg C.ha⁻¹ respectivement pour la culture, la pseudo-steppe et les plantations d'eucalyptus. En considérant un à un les compartiments et en comparaison avec les autres modes d'usage, il apparaît que les eucalyptus renferment jusqu'à huit fois plus de C dans leur compartiment aérien (avec $16,4 \pm 7,5$ Mg C.ha⁻¹) et environ vingt fois plus dans le compartiment souterrain (avec $41,6 \pm 11,4$ Mg C.ha⁻¹) (**Tableau 3.3**). C'est principalement la partie souterraine qui confère aux eucalyptus cette grande capacité de

séquestration de C puisqu'elle représente environ 70% du C de la biomasse végétale grâce aux réservoirs constitués par la souche et les grosses racines.

A ces stocks de C dans la biomasse vivante des eucalyptus viennent s'ajouter ceux du compartiment de la litière au niveau duquel les couches O_1 et $O_f + O_h$ contiennent respectivement environ 5,3 et 16,2 Mg C.ha⁻¹ (versus 0 Mg C.ha⁻¹ pour les autres modes d'usage). Ces valeurs paraissent être légèrement supérieures à celles trouvées dans d'autres études : 2 Mg C.ha⁻¹ pour un peuplement d'*E. camaldulensis* au Cameroun (Harmand *et al.*, 2004) et 3,3 Mg C.ha⁻¹ sous des hybrides d'eucalyptus au Congo (Laclau, 2001).

Par ailleurs, les stocks de C de la savane (\approx 2,1 Mg C.ha⁻¹ chacun pour les parties aérienne et souterraine) sont proches des valeurs trouvées dans d'autres études (1,7 et 4,1 Mg C.ha⁻¹ respectivement pour l'aérien et le souterrain ; Laclau, 2001). Pour les eucalyptus, les stocks mesurés sont similaires à ceux mesurés par Zewdie *et al.* (2009) qui sont de l'ordre de 16,1 Mg C.ha⁻¹ dans le compartiment aérien d'un taillis d'*E. globulus* dont les rejets sont âgés de 4 ans. Ce qui ne s'accorde pas avec les stocks mesurés sur des plantations d'eucalyptus gérées en futaie (Laclau, 2001 ; Harmand *et al.*, 2004) au niveau desquelles la partie aérienne du tronc compte 21-32 Mg C.ha⁻¹ et la partie souterraine seulement de 4-7 Mg C.ha⁻¹. Le fonctionnement biologique des systèmes en taillis qui présentent des lignotubers leur permettant de rejeter pourraient expliquer ces différences de répartition du stock de C dans les plantations d'eucalyptus. Les lignotubers sont en fait des organes producteurs souterrains qui permettent à la souche de produire de nouvelles pousses une fois la partie aérienne détruite (Jacobs, 1982). Ainsi, après chaque coupe, la souche émet des rejets qui la recouvrent et ajoutent à chaque repousse une certaine quantité de cal et parallèlement, des racines secondaires croîtraient entre chaque rotations (Wildy et Pate, 2002).

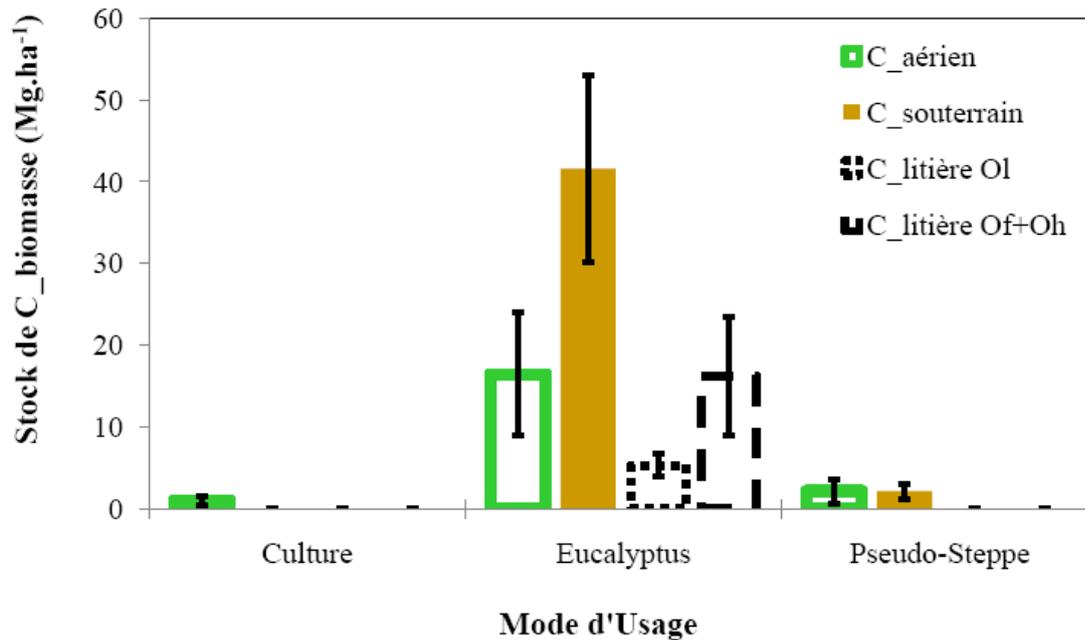


Figure 3.2 Stock de carbone (Mg C.ha⁻¹) dans le compartiment de la biomasse des divers modes d'usage des terres sur les Hautes Terres Centrales de Madagascar. Pour les taillis d'eucalyptus : C_aérien regroupe les feuilles, les branches et les troncs de tous les rejets d'une souche ; C_souterrain regroupe les grosses ($\varnothing \geq 10$ mm), moyennes ($2\text{mm} \leq \varnothing < 10$ mm) ; C_litière O₁ représente la litière de l'année et C_litière O_f+O_h celle déjà fragmentée et humifiée. Les barres d'erreurs présentent les écartypes des stocks mesurés.

Tableau 3.3 Répartition (%) du stock de C dans les différents compartiments des plantations d'eucalyptus sur les Hautes Terres de Madagascar.

Compartiments	Moyenne (en Mg C.ha ⁻¹)	Ecartype	Pourcentage (%)
<i>Aérien</i>	<i>16.4</i>	<i>7.5</i>	<i>30.5</i>
Feuilles	2.3	1.2	4.3
Branches	3.2	1.4	6.1
Troncs	10.7	4.9	20.1
<i>Souterrain</i>	<i>41.6</i>	<i>11.4</i>	<i>69.5</i>
Souche	20.7	6.2	38.9
Grosses racines	14.9	3.8	28.0
Racines moyennes	1.4	0.4	2.6
<i>TOTAL</i>	<i>59.7</i>	<i>14,5</i>	<i>100</i>
<i>Litière</i>			
Couche O ₁	5,3	1,4	
Couche O _f + O _h	16,2	7,2	

3.3.2. Les quantités de C du sol

3.3.2.1. Stocks de C_{sol} et modes d'usage des terres⁸

Les résultats de mesures de stocks moyens de C_{sol} sur 0-30 cm à masse équivalente de sol montrent, qu'en général, les cultures présentent des stocks significativement les plus faibles (avec $74,2 \pm 15,6 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$). Les plantations d'eucalyptus (tous âges de plantation confondus) et la pseudo-steppe renferment des C_{sol} plus élevés et ne sont pas significativement différents entre eux ($84,8 \pm 23 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ et $91,7 \pm 18 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivement). Ces valeurs mettent en exergue l'importance du changement de mode d'usage des terres sur les variations du C_{sol} comme ce qui est mentionné dans la littérature (Turner et Lambert, 1999; Post *et al.*, 2001; Houghton et Goodale, 2004; Jandl *et al.*, 2007); selon laquelle:

- (i) la conversion des terres sous végétation herbacée en parcelle de culture conduit à une réduction du stock de C_{sol} jusqu'à 50% ou plus en fonction de la pluviosité et de la durée depuis laquelle la pratique culturale a été effectuée (Guo et Gifford, 2002 ; Zingore *et al.*, 2005). Dans notre étude, cette réduction est en moyenne de 19% malgré une mise en culture de longue date; ceci est probablement dû en raison de l'apport de fumure à base de litière d'eucalyptus sur ces parcelles,
- (ii) la conversion des terres sous végétation herbacées en plantation forestière, notamment feuillus (et *Eucalyptus sp.*) n'affecte pas le C_{sol} (Guo et Gifford, 2002) car ils ont une plus grande capacité d'accumuler le C_{sol} que les conifères. Cependant, des contradictions sont aussi mentionnées selon lesquelles l'afforestation conduit à une diminution, une augmentation ou à un effet négligeable sur le C_{sol} (Laganière *et al.*, 2009). Malgré cela, l'afforestation montre une tendance générale à une perte du stock de C_{sol} durant les premières années de plantation, suivie d'un retour graduel au niveau initial et après, augmente pour générer un gain net (Paul *et al.*, 2002; Vesterdal *et al.*, 2002).

3.3.2.2. L'étude isotopique du C_{sol}

L'étude isotopique se porte essentiellement sur les situations en système originel (pseudo-steppe) et en système planté en eucalyptus ; mais à noter que les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des sols sous culture

⁸ Un aperçu de ces résultats est inclus dans la figure 5.2

étant toujours les mêmes (-19,2 ‰) de 0 à 40 cm de profondeur (**Figure 3.3m**). Pour ces valeurs de $\delta^{13}\text{C}$, les différences significatives existent seulement sur les 20 premiers centimètres du sol ; elles sont de -24,2 à -21,1 ‰ sous eucalyptus (tout âge confondu) et de -18,5 à -17,6 ‰ sous pseudo-steppe respectivement sur les horizons 0-10 et 10-20 cm. En considérant la chronoséquence sur les 5 parcelles d'eucalyptus (50 à 111 ans), aucune différence n'est constatée le long du profil 0-40 cm ; ces valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ sont proches de celles mesurées par Trouvé *et al.* (1994) au Congo avec la valeur de -25,1 ‰ sur l'horizon 0-5 cm. Parallèlement, les pourcentages de C apporté par les eucalyptus ne prédominent qu'en surface, avec 58,3 et 30,5% respectivement sur 0-10 cm et 10-20 cm (**Figure 3.3l**). L'incorporation dans le sol de la matière organique issue de l'eucalyptus se passe principalement donc sur 0-20 cm sous les taillis d'eucalyptus des HTC de Madagascar. Guo and Gifford (2002) et Maquere *et al.* (2008) suggèrent que c'est la courte durée de la rotation qui limiterait l'incorporation en profondeur du $\text{C}_{\text{eucalyptus}}$ dans le sol.

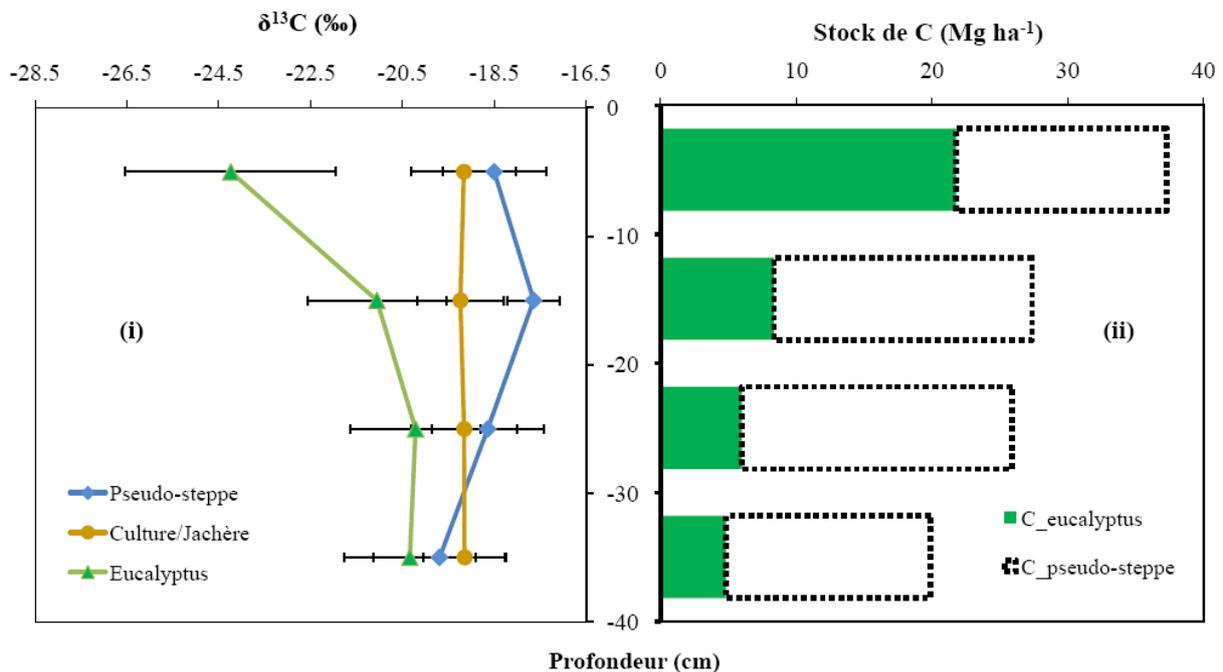


Figure 3.3 Résultats des études isotopiques du C du sol : (i) Profil de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) sous les différents modes d'usage des terres sur l'horizon 0 – 40 cm ; (ii) Contribution de l'eucalyptus dans la constitution du C du sol.

3.3.3. Le stock total de C et l'évolution avec le temps du C des compartiments séquestrants

En considérant tous les compartiments (aérien, souterrain et sol) pour chaque mode d'usage des terres, il est montré que les eucalyptus présentent des stocks de C significativement élevés (Figure 3.4 ; $150 \pm 25,3 \text{ Mg C.ha}^{-1}$) grâce à la contribution des compartiments souterrains : racines et sol. 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 (O) (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%).

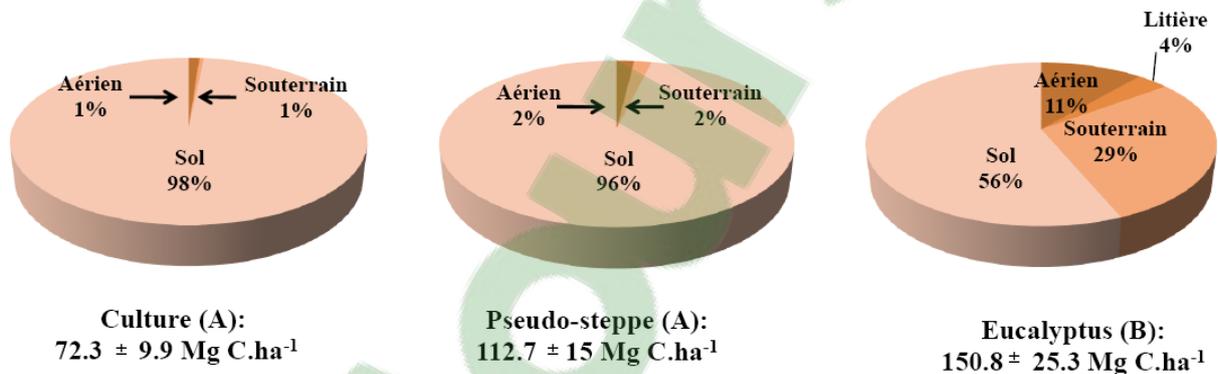


Figure 3.4 Répartition du stock de carbone (en %) dans les différents compartiments de chaque mode d'usage des terres des Hautes Terres Centrales de Madagascar (les modes d'usage avec les mêmes lettres en parenthèse ne présentent pas de différence significative au seuil de $\alpha = 0,05$).

3.3.4. L'évolution avec le temps des stocks de C des compartiments séquestrants

3.3.4.1. Les relations entre stocks de C et le temps

En supposant que le compartiment aérien et la litière peuvent être considérés comme « non permanents » (exportés suivant les pratiques locales), ce sont par conséquent les racines et le sol qui constituent les compartiments « séquestrants ».

Les relations entre le stock de C de chaque compartiment et la durée de plantation présentées dans la Figure 3.5 montrent que : (i) il existe une corrélation positive entre stocks C_racinaire et

la durée de plantation ($p = 0,0003$; $n = 41$) et environ 51% des variabilités de ces stocks sont expliquées par l'âge de plantation ; (ii) aucune corrélation significative n'est détectée entre les stocks C_{sol} et l'âge de plantation ($p = 0,083$; $R^2 = 0,07$ et $n = 41$). La durée de plantation explique donc seulement une certaine part de la variabilité des stocks de C à la fois dans le sol et les racines. D'autres paramètres qui pourraient contrôler cette évolution du stock de biomasse et de C dans les compartiments souterrains sont donc à considérer dans la poursuite de l'étude (entre autres : densité de plantation, variabilité du sol, etc. ; (Crow et Houston, 2004) ; ceci, non seulement dans le but de pouvoir les apprécier plus précisément avec le temps mais aussi en vue de développement des activités de rente carbone (Gutiérrez *et al.*, 2006).

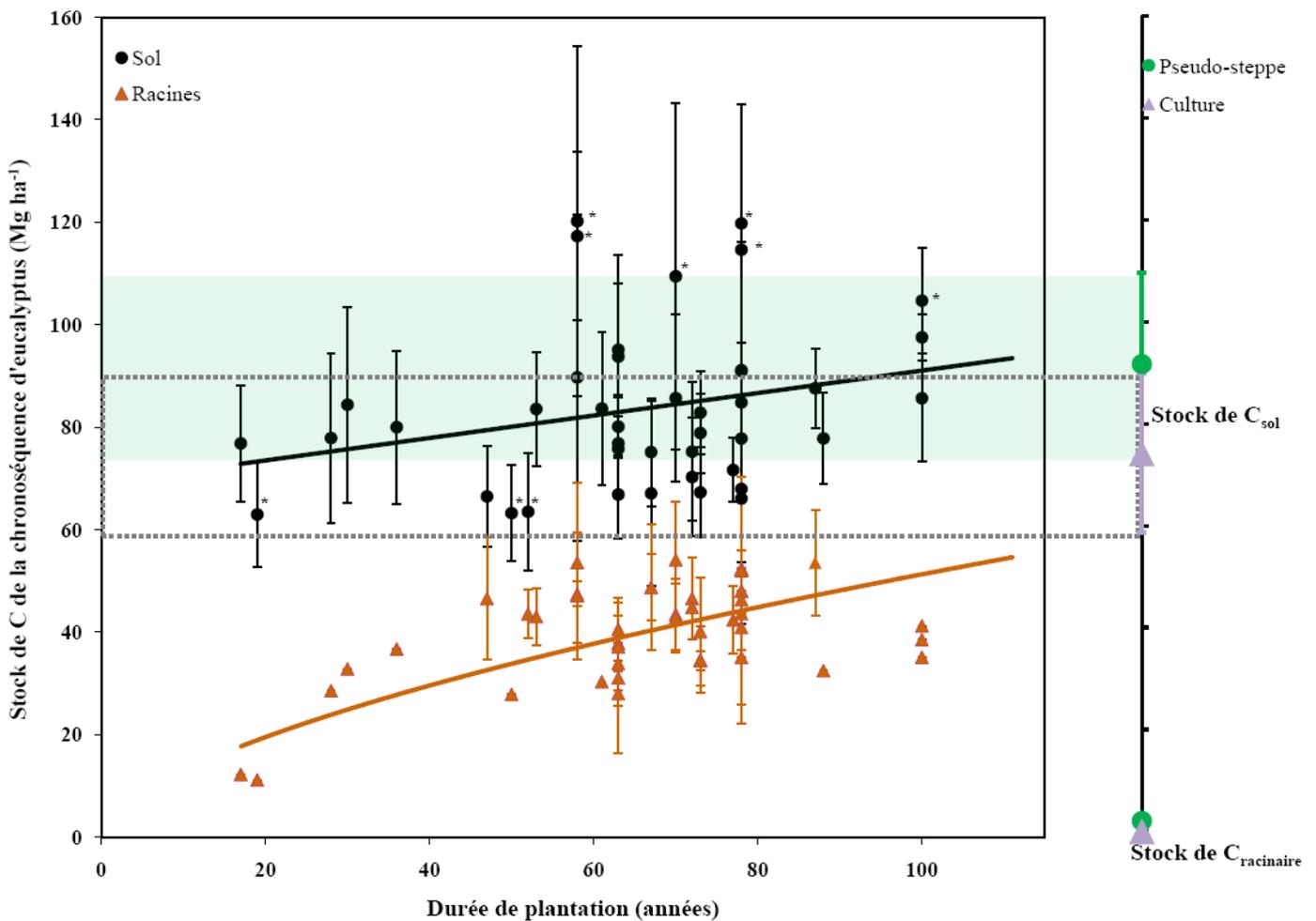


Figure 3.5 Evolution des stocks de carbone (Mg C.ha⁻¹) des compartiments séquestrants (racinaire et sol) des taillis d'eucalyptus des Hautes Terres Centrales de Madagascar avec leur durée de plantation. Les barres d'erreurs représentent les écartypes des stocks au niveau de chaque parcelle. Les individus accompagnés d'un astérisque présentent des différences significatives avec les parcelles sous pseudo-steppe au seuil de $\alpha = 0,05$. Expressions des équations de régression $y = 0,22x + 69,1$ pour le C_{sol} ($R^2 = 0,073$; $p = 0,083$; $n = 42$) et $y = 3,23x^{0,6}$ pour le $C_{racinaire}$ ($R^2 = 0,51$; $p = 0,0003$; $n = 44$)

3.3.4.2. Les variations de stocks de C

Compte tenu de la durée de plantation, les plantations d'eucalyptus sur les HTC malgaches présentent une diminution du stock de C_{sol} jusqu'à 31% du C initial pour les parcelles de moins de 50 ans et un gain jusqu'à 3,6 à 39,5% pour les parcelles de plus de 100 ans (**Figure 3.5**). Selon des études récentes, le stock de C_{sol} diminue durant les dix premières années de plantation (Marin-Spiotta *et al.*, 2009) jusqu'à 5,6% et augmente jusqu'à 6,1 à 18% dans les prochains 10-30 ans (Laganière *et al.*, 2009). D'après Paul *et al.* (2003), le stock de C_{sol} sous l'antécédente végétation herbacée est atteint 10-22 ans après l'afforestation et au cours des 40 ans après conversion, le C_{sol} de la plantation est supérieur au C_{sol} de l'antécédent cultural.

Par la suite, les données sur les valeurs des stocks moyens de stocks de C_{sol} sous pseudo-steppe et culture du paragraphe 2-1 (91,7 et 74,2 Mg C ha⁻¹ respectivement) sont reprises pour les analyser parallèlement avec la **Figure 3.5**. On constate alors que, après plus de 100 ans de plantation forestière, la variation du stock de C_{sol} entre culture et eucalyptus est importante (ΔC_{sol} culture \approx 25 Mg C ha⁻¹) tandis que, la variation entre pseudo-steppe et eucalyptus reste faible (ΔC_{sol} Pseudo-steppe \approx 5 Mg C ha⁻¹). De plus, en raison des conditions de pratiques locales (coupe rase et exploitation de la litière à chaque fin de rotation de 5 ans), les taillis d'eucalyptus des HTC malgaches semblent demander plus de temps (\approx 80 ans et plus) pour le recouvrement du C_{sol} initial sous pseudo-steppe. Par contre, un gain net est observé dans le compartiment racinaire en comparaison avec la végétation originelle correspondant à un $\Delta C_{\text{racinaire}}$ Pseudo-steppe de l'ordre de 45 Mg.ha⁻¹. Dans ce sens, Cowie (2006), lors d'une étude sur le rôle du stock de C_{sol} dans le bilan des GES des systèmes bioénergie en Australie (plantation d'*Eucalyptus globulus* source de biomasse pour la bioénergie renouvelable) a conclu que, ces systèmes pourraient amener à une faible diminution du stock de C_{sol} mais cette baisse peut être négligeable en comparaison avec la contribution des systèmes bioénergies vers l'atténuation des GES à travers l'évitement des émissions de combustibles fossiles.

3.4. CONCLUSION

En sus des fonctions usuelles socio-économique et environnementale des taillis d'eucalyptus des Hautes Terres Centrales Malgaches en termes de fourniture de bois de chauffe et d'énergie et de diminution des pressions sur les forêts naturelles, la présente étude a montré leur importance

écologique en termes de capacité de séquestration de C. La méthodologie développée a permis d'estimer le stock de C de tous les compartiments, particulièrement le compartiment des racines. En effet, ce dernier est habituellement évalué en utilisant une ratio du stock de C du compartiment aérien qui est facilement quantifiable. Les résultats ont montré que les plantations d'eucalyptus stockent une quantité importante de C ($150 \pm 25,3 \text{ Mg C.ha}^{-1}$) en comparaison avec les autres modes d'usage des terres considérés (rotation culture/jachère, savane/pseudo-steppe). Cette fonction puits de C est notamment due aux contributions considérables de la biomasse et de la matière organique des compartiments racinaires et du sol (29 et 56 % du stock total de C respectivement). L'étude de la relation des stocks de C dans ces deux compartiments avec la durée de plantation a permis de comprendre leur évolution avec le temps mais également, de constater que ce facteur n'explique qu'une part de la variabilité des stocks. Il est donc nécessaire de considérer d'autres facteurs qui vont contrôler ces capacités de séquestration de C. Néanmoins, ces analyses de données ont décrits les variations des stocks de C dans le sol et dans les racines entre les différents modes d'usage des terres et fournissent déjà des éléments importants pour l'évaluation et l'étude de la variation de ces stocks de dans une zone de front d'afforestation (dont la CR de Sadabe).

Ces résultats et la poursuite des recherches dans la même voie (considération d'autres paramètres contrôlant la dynamique de la biomasse racinaire) trouvent leur intérêt avec les enjeux et besoins en connaissances internationales ou nationales sur l'appréciation rapide et fiable des capacités de fixation de C atmosphérique des plantations forestières, en particulier des taillis âgés dans le cadre de cette étude. Ces évaluations précises permettront donc à Madagascar de pouvoir suivre et bénéficier les avancées des négociations internationales sur la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC). Effectivement, les résolutions post-Kyoto offriront des options prometteuses avec le processus REDD ou la Réduction des émissions de GES provenant de la déforestation et de la dégradation des forêts mais aussi lors de développement de projets MDP sur d'autres zones à front d'afforestation.

3.5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Balesdent, J., 1991. Estimation du renouvellement du carbone des sols par mesure isotopique ^{13}C : Précision, risque de biais. Cah. Orstom, sér. Pédol., 26, 315-326.

- Bernoux, M., Cerri, C.C., Neill, C., De Moraes, J.F.L., 1998. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. *Geoderma* 82, 43-58.
- Bertrand, A., 1999. La dynamique séculaire des plantations paysannes d'Eucalyptus sur les Hautes Terres malgaches. *Le Flamboyant* 49, 45-48.
- 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.
- Carriere, S.M., Randriambanona, H., 2007. Biodiversité introduite et autochtone : antagonisme ou complémentarité ? Le cas de l'eucalyptus à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques* 292, 5-21.
- Crow, P., Houston, T.J., 2004. The influence of soil and coppice cycle on the rooting habit of short rotation poplar and willow coppice. *Biomass and Bioenergy* 26, 497 – 505.
- Dalal, R.C., Allen, D.E., Livesley, S.J., Richards, G., 2008. Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: a review. *Plant Soil* 309, 43–76.
- 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, 2001. Soil carbon sequestration for improved land management. In, *World Soil Resources Reports*, Rome, p. 75.
- Fest, B.J., Livesley, S.J., Drösier, M., Van Gorsele, E., Arndt, S.K., 2009. Soil-atmosphere greenhouse gas exchange in a cool, temperate Eucalyptus delegatensis forest in south-eastern Australia. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 393-406.
- 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.
- Gueuneau, P., 1969. L'*Eucalyptus robusta* à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques* 124, 53-65.

- Guo, L.B., Gifford, M., 2002. Soil carbon stocks and land use: a meta analysis. *Global Change Biology* 8, 345-360.
- Gutiérrez, V.H., Zapata, M., Sierra, C., Laguado, W., Santacruz, A., 2006. Maximizing the profitability of forestry projects under the Clean Development Mechanism using a forest management optimization model. *Forest Ecology and Management* 226, 341–350.
- Harmand, J.-M., Njiti, C.F., Bernhard-Reversat, F., Puig, H., 2004. Aboveground and belowground biomass, productivity and nutrient accumulation in tree improved fallows in the dry tropics of Cameroon. *Forest Ecology and Management* 188, 249–265.
- Houghton, R.A., Goodale, C.L., 2004. Effects of Land-Use Change on the Carbon Balance of Terrestrial Ecosystems. In: Change, E.a.L.U. (Ed.), *Geophysical Monograph*. the American Geophysical Union, p. 14.
- 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, p. 996.
- Jacobs, M.R., 1982. Les eucalyptus dans le reboisement. *Collection FAO Forests*, Rome.
- Jandl, R., Vesterdal, L., Olsson, M., Bens, O., Badeck, F., Rock, R., 2007. Carbon sequestration and forest management. In. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 2, 1749-8848
- Laclau, J.P., 2001. Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation d'eucalyptus. Effets du reboisement sur un sol de savane du littoral congolais ; conséquences pour la gestion des plantations industrielles. In, Institut National Antronomique Paris-Grignon Institut National Antronomique Paris-Grignon France, p. 193.

- Laganière, J., Angers, d.A., Paré, d., 2009. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 1-15.
- Lal, R., 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220, 242-258.
- Landais, D., 2003. Etudes quantitatives et qualitatives du carbone séquestré dans le sol après afforestation au Congo Brazzaville. Mémoire de stage DESS en Sciences de l'Environnement. In. Université Louis Pasteur, France, p. 33.
- Livesley, S.J., Kiese, R., Miehle, P., Weston, C.J., Butterbach-Bahl, K., Arndt, S.K., 2009. Soil-atmosphere exchange of greenhouse gases in a *Eucalyptus marginata* woodland, a clover-grass pasture, and *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations. *Global Change Biology* 15, 425-440.
- Locatelli, B., Lescuyer, G., 1999. Rôle et valeur des forêts tropicales dans le changement climatique. *Bois et Forêts des Tropiques* 260, 5-17.
- Maquere, V., Laclau, J.P., Bernoux, M., L., S.-A., Goncalves, L.M., Cerri, C.C., Piccolo, M.C., Ranger, J., 2008. Influence of land use (savanna, pasture, Eucalyptus plantations) on soil carbon and nitrogen stocks in Brazil. *European Journal of Soil Science*, In press.
- Marin-Spiotta, E., Silver, W.L., Swanston, C.W., Ostertag, R., 2009. Soil organic matter dynamics during 80 years of reforestation of tropical pastures. *Global Change Biology* doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01805.x.
- Paul, K.I., Polglase, P.J., Nyakuengama, J.G., Khanna, P.K., 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management* 168, 241-257.
- Paul, K.I., Polglase, P.J., Richards, G.P., 2003. Predicted change in soil carbon following afforestation or reforestation, and analysis of controlling factors by linking a C accounting model (CAMFor) to models of forest growth (3PG), litter decomposition (GENDEC) and soil C turnover (RothC). *Forest Ecology and Management* 177, 485-501.

- Peltier, R., Forkong, N.C., Ntoupka, M., Manlay, R., Henry, M., Morillon, V., 2007. Évaluation du stock de carbone et de la productivité en bois d'un parc à karités du Nord-Cameroun. *Bois et Forêts des Tropiques* 294, 39-50.
- Post, W.M., Izaurralde, R.C., Mann, L.K., Bliss, N., 2001. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil *Climatic Change* 51, 73–99.
- Post, W.M., Known, K.C., 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Gloal Change Biology* 6, 317-328.
- Randrianjafy, H., 1999. Les plantations d'Eucalyptus à Madagascar : Superficie, rôle et importance des massifs. In. *Projet FAO GCP/INT/679/EC, Madagascar*, p. 80.
- Robert, M., Saugier, B., 2003. Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. *C. R. Geoscience* 335, 577-595.
- Santantonio, D., Herman, R.K., Overtos, W.S., 1977. Root biomass studies in forest ecosystems. *Pedobiologia* 17, 1-31.
- Smith, B.N., Esptein, S., 1971. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of higher plants. *Plant Physiology* 47, 380-384
- Trouvé, C., Mariotti, A., Schwartz, D., Guillet, B., 1994. Soil organic carbon dynamics under eucalyptus and pinus planted on savannas in the Congo. *Soil Biology & Biochemistry* 26, 287-295.
- Turner, J., Lambert, M., 1999. Change in organic carbon in forest plantation soils in Eastern Australia. *Forest Ecology and Management* 133, 231-247.
- USAID, 2006. Etude sur la consommation et la production en produits forestiers ligneux à Madagascar. In: *GroupIRG (Ed.), Madagascar*, 101 p.
- Vesterdal, L., Ritter, E., Gundersen, P., 2002. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management* 169, 137-147.

Wildy, D.T., Pate, J.S., 2002. Quantifying above- and below-ground growth response of the western Australian Oil Mallee, *Eucalyptus kochii* subsp. *plenissima*, to contrasting decapitation regimes. *Annals of Botany* 90, 18.

Zingore, S., Manyame, C., Nyamugafata, P., Giller, K.E., 2005. Long-term changes in organic matter of woodland soils cleared for arable cropping in Zimbabwe. *European Journal of Soil Science* 56, 727-736.

CHAPITRE IV. SPATIALISATION DES STOCKS DE CARBONE DES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS DES HAUTES TERRES CENTRALES DE MADAGASCAR: UNE APPROCHE DE REGRESSION MULTIPLE

Ce chapitre a été rédigé en anglais en vue d'une prochaine soumission à la revue internationale Geoderma

Ramarson Herintsitohaina Razakamanarivo^{1,2}, Marie Antoinette Razafindrakoto², Martial Bernoux³, Clovis Grinand³, Alain Albrecht²

¹ Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques – Département des Eaux et Forêts, Université d'Antananarivo, BP 175, Madagascar

² IRD, UMR 210 Eco&Sols et Laboratoire des RadioIsotopes – Département de la RadioAgronomie, Route d'Andraisoro, BP 3383, 101 Antananarivo, Madagascar

³ SupAgro-INRA-IRD, UMR 210 Eco&Sols Montpellier, France

TITLE: Mapping organic carbon stocks in eucalyptus plantations of the central highlands of Madagascar: a multiple regression approach

ABSTRACT:

Recent concerns about global warming have resulted in more concerted studies on quantification and modelling of carbon (C) storage in different ecosystems. The aim of this study was to assess and map the carbon stocks in above (ABG), below-ground (BLG) biomass and soil organic carbon contained in the 30 centimetres top-layer (SOC) in coppices of eucalyptus plantations in the central highlands of Madagascar in an area of 1,590 ha. Relationships between C stock and various biophysical (stool or shoot stockings and ages, circumferences) and spatial (elevation, slope, soil type) factors that may affect C storage within each pool were investigated. Three different modelling techniques were tested and compared for various factors set: (i) simple linear regression (SLM), (ii) multiple linear (MLM) models and, (iii) boosted regression tree (BRT) models. Weights of the factors in the respective model were analyzed for the three pool-specific models that produced highest accuracy measurement. A regional spatial prediction of carbon stocks was performed using spatial layers derived from a digital elevation model, remote sensing imagery and expert knowledge. Results showed that BRT had the best predictive capacity for C stocks compared with the linear regressions models. Elevation and slope were found to be the most relevant predictors for modeling C stock in each pool, and mainly for the SOC. A factor representing circumferences of stools and their stocking (stools.ha⁻¹) largely influenced BLG. Shoot circumference at breast height and shoot age was the best factor for ABG fitting. Accuracy assessment carried out using coefficient of determination (R²) and ratio of standard deviation to prediction error (RPD) showed satisfactory results, with respectively 0.74 and 1.95 for AGB, 0.85 and 2.59 for BLG, and 0.61 and 1.6 for SOC. Application of the best fitted models with spatial explanatory factors allowed to map and estimate C contained within each pool : 32 ± 13 Gg C for ABG, 67 ± 15 Gg C for BLG and, 139 ± 36 Gg C for SOC (1 Gg = 10⁹ g). A total of 238 ± 40 GgC was obtained for the entire study area by combining the three C maps. Despite their relatively low predictive quality, models and C maps produced herein provided relevant reference values of C storage under plantation ecosystems in Madagascar. This study contributed to the reducing of uncertainty related to C monitoring and baseline definition in managed terrestrial ecosystem.

KEYWORDS: carbon storage, above- and below-ground biomass, soil organic carbon, spatial variability, boosted regression tree, short rotation forestry, *Eucalyptus robusta*.

4.1. INTRODUCTION:

Terrestrial ecosystems, as potential sinks for atmospheric CO₂, have received considerable attention due to the Kyoto Protocol to the United Nation Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). At global scale, carbon (C) stocks are important either in biomass (652 Gt C) or in the top first meter of soils (1500 to 2000 Gt) compared with the atmospheric CO₂ stock (750 Gt C) (IPCC, 2007; Robert and Sauguier, 2003, Malhi *et al.*, 1999). Changes in land uses may causes important variation in carbon quantity and composition which has in turn consequences on both CO₂ emissions to the atmosphere and C sequestration potential (Fearnside, 2001; Post *et al.*, 2001; Post and Known, 2002; Guo and Gifford, 2002; Houghton and Goodale, 2004). UNFCCC requires reporting on a regular basis and in a transparent manner of C forest sinks. Tropical ecosystems are particularly under consideration due to lacking information even if they represent one largest C pool due to their important natural forest areas. Numerous studies at scales ranging from global to local (Batjes, 1996, Eswaran *et al.*, 1993), aimed in quantifying organic C contained in natural components of the biosphere. These pools include the living biomass above (ABG) and below-ground (BLG) biomass, the litter (L) and the soil organic matter (SOC) (IPCC, 2003; IPCC, 2006).

Quantification of ABG carbon stocks is the most documented as this component is visible and easily measured either by direct ground observations such as the establishment of field allometric regression, either by satellite imagery and derived calculation such as vegetation index regression. On the other hand, studies on BLG and soil components are scarce and even if required for complete C storage estimation and modelling. Regarding the root system, few works were focused on this component because biomass of root systems is difficult to evaluate (tedious and time-consuming) and because of the lack of adequate method to study its dynamics and functions (Santantonio, 1977; Cairns *et al.*, 1997; Robinson, 2007). Therefore, BLG was generally indirectly derived from ABG by using default root/shoot ratio and this remains a major issue that have to be solved. Soil component, has been highlighted in climate change studies for its high storage capacity of C. However its variability and complexity remains the main issues that limit the production of accurate and precise estimation (Bernoux *et al.*, 2002; Lal, 2005). Soil carbon estimation studies involve either complex mechanistic models based on soil carbon dynamic models, e.g. RothC and Century (Cerri *et al.*, 2007; Tornquist *et al.*, 2009) or simple calculation of average SOC by soil types (Batjes, 1996) or soil-vegetation units (Bernoux *et al.*, 2002). Knowledge

on available SOC and its distribution over the landscape is essential for the effective use, management and conservation of this resource (Gray *et al.*, 2009).

Identification and understanding of C storage factors in forests are central in C quantification and modelling. The list and relative influence of these factors may vary depending on the forest type and location. Moreover, each C pool is not related to the same factors, or at least with the same relationship strength. For instance, it has long been recognized that temperature, rainfall, soil texture, pH, type of vegetation and previous land use are the major factors controlling the amount of SOC (Jenny, 1941; Lugo and Brown, 1993; Bourgeon *et al.*, 1999; Post and Known, 2002; Guo and Gifford, 2002; Krishnan *et al.*, 2007). Biomass pools may be influenced predominantly by climate, age and structure of plantation. Thus, applying global method on a specific area is highly prone to significant estimation error; site-specific method based on local relevant factors has to be developed when possible. Recent advance in spatial imagery allows catching a broad range of data from which C storage factors can be derived, typically terrain or land use information. Policies based on a C mapping approach showed to have more benefits relative to ones that concentrated only on field sampling and inventories (Goetz *et al.*, 2009). This is true not only in terms of improving estimates of C stored in forests by providing spatially explicit information on the location of C stocks, but also to take into account spatial variability and uncertainties distribution (Houghton and Goetz, 2008). Appropriate spatial method, using easy to access data such as remote sensing imagery could greatly help soil C monitoring at low cost in an emerging carbon market.

For Madagascar, due to mainly the lack of available data, and basic knowledge, C pools are still poorly estimated. Few attempts on biomass or soil C storage have been achieved at a global and national scale (FAO, 2002; Grinand *et al.*, 2009). Eucalyptus constitutes the major planted species in Madagascar, with plantations covering about half of the 300,000 ha area of afforestation (Randrianjafy, 1999). Such dominance was attributed by eucalyptus importance in providing goods and services for local people in the highlands where agriculture activities are limited by soil resources availability and fertility. Among different planted species, *Eucalyptus robusta* is the most widespread in Madagascar due to its ability to develop on stony soil, to bear with fire conditions and to have natural ability to sprout (Randrianjafy, 1999).

In this context, the objective of this study was to estimate the spatial C stocks baseline in above and below ground biomass and soil organic carbon of *Eucalyptus robusta* plantations in the central

highlands of Madagascar.. More precisely, this study aimed at (i) comparing different regression methods to predict C stocks using various factors sets, to (ii) evaluate the influence of the factors retained in the modelling and to (iii) produce carbon maps for each of the three pools based on the best fitted models, in order to assess carbon budget, its spatial distribution and variability.

4.2. MATERIALS AND METHODS

4.2.1. Study area

The investigation was conducted in the county of Sambaina-Manjakandriana, in Malagasy Highlands (1350-1750 m elevation), located at 47°45'- 47°50' East and 18°50'- 18°56' South (**Figure 4.1**) and represent a 3000 ha area. Mean annual precipitation and mean annual temperature are 1,600 mm and 16°C respectively. This county has a long history of tree planting and was chosen because of the unique opportunity to establish a secular chronosequence of eucalyptus plantations. Landscape is mainly composed of *Eucalyptus robusta* plantations, covering more than 50% of the studied area. The remaining is covered by natural grassland where the common species are *Philippia sp.* and *Aristida sp.* The first plantation, dated towards 1890, and was used for engine fuel wood supply, then eucalyptus plantations were used for landed property and mainly for energy purposes until now (Carriere and Randriambanona, 2007). Stands are all privately managed, coppices are usually harvested at the age of 3 – 5 years and stumps cut on ground level are left to resprout (stool not renewed). No silvicultural treatments are practiced and all stems (shoots) are left after coppicing for natural thinning.

The geological substratum is composed by granites migmatoides, and soils are classified as Ferralsols according to the FAO classification (FAO, 2006). They represent 1:1 clay type with a mean clay content of 52.7 %; average pH and CEC values are 5.23 and 2.8 me 100g⁻¹ clay.

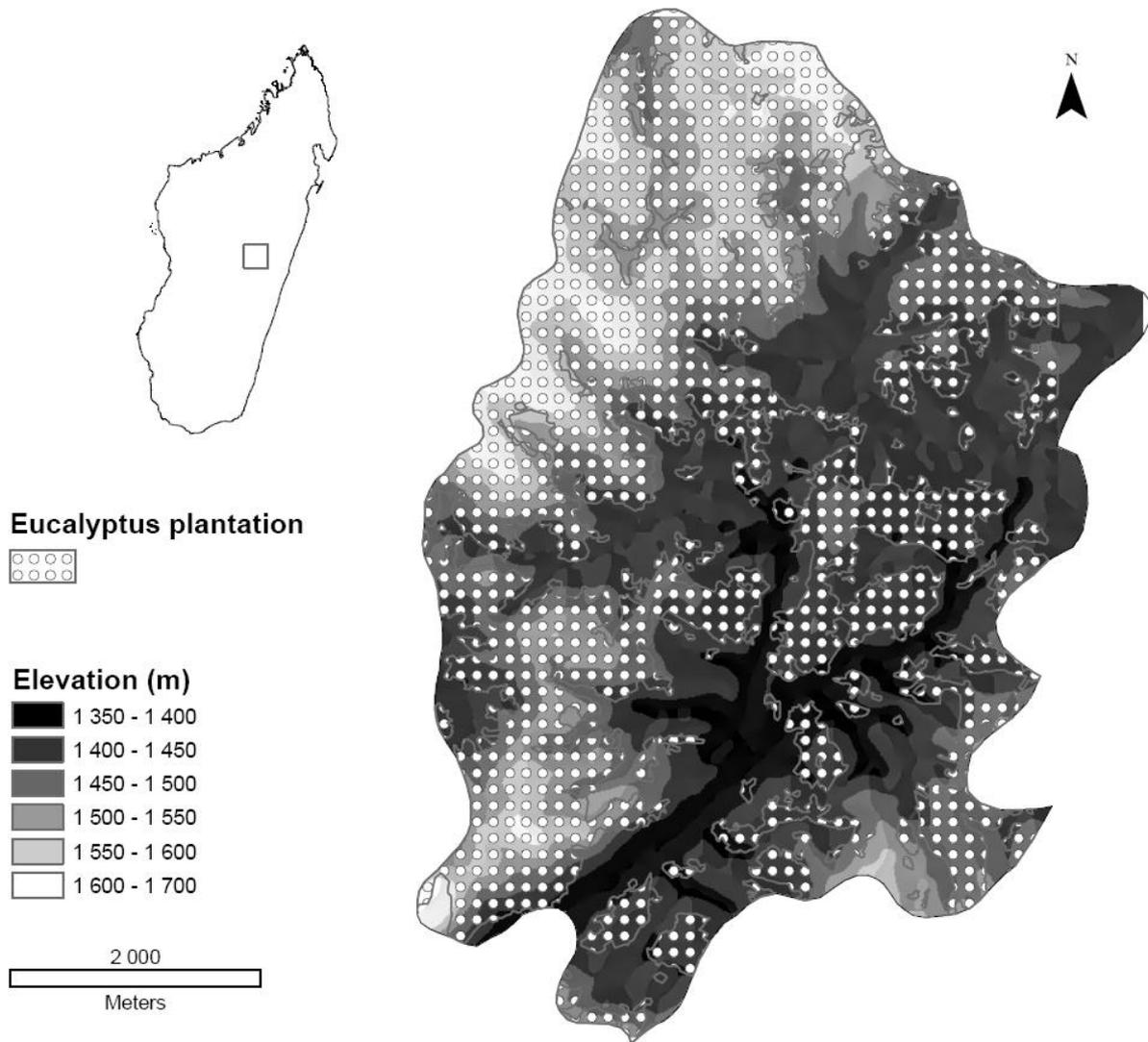


Figure 4.1 Map of the study area showing location relative to the map of Madagascar

4.2.2. Carbon inventory

4.2.2.1. Biomass data

Data on vegetation biomass were obtained from several field works including inventory and measurements on 41 different stands of coppice of eucalyptus of variable size ranging from a few hundred square-meters to less than 10 ha. According to the small size of the stands, three plots (10 m x 10 m) were randomly selected within each stand for counting of stools and shoots. Direct measurements of dendrometric parameters such as circumference of stump and stool were carried out. Table 4.1 shows a descriptive statistics of these field measurements. They are common field measurements used in other studies on short rotation forestry such as coppices of

eucalyptus (Senelwa and Sims, 1998; Verwijst and Telenius, 1999; Heinsoo *et al.*, 2002; Zewdie *et al.*, 2009). Allometry equations for ABG assessment were established by carrying out destructive sampling on 27 selected trees covering the full range of stump circumference variation. Likewise, BLG component (stump, coarse root with diameter ≥ 10 mm and medium root with diameter ≤ 2 mm) of each sampled tree was assessed using allometry equations and based on a sampling unit known as “voronoï polygon”. The voronoï polygon is the area of occupancy of a tree, delimited by the intersection of the perpendicular lines that pass through the midpoints of the lines connecting the center of the sampled tree to the center of the nearest neighboring trees (Santantonio, 1977; Saint-André *et al.*, 2005). From a manual excavation to 1m depth within this polygon, dry weight of BLG was related to the stump circumference as dry weight of ABG was related to the basal area of shoots per tree. Allometric equations were then applied on inventory data for each site in order to calculate the biomass density per ha. A biomass conversion factor of 0.5 was applied on these biomass densities to derive C density in biomass pools (**Table 4.2**).

Table 4.1 Characteristics and statistics of predictor variables.

Type	Name (code name)	Type	Unit	Min	Max	Mean	SD
Site specific	Mean ciconference of stumps (Cir)	quantitative	cm	98.5	196.6	141.8	25.5
	Mean circonference at breast height of shoots (CBH)	quantitative	cm	4	14.3	7.1	2.5
	Stump density (Stocking 1)	quantitative	Nb stump ha ⁻¹	700	5200	2838	1000
	Shoot density (Stocking 2)	quantitative	Nb shoot ha ⁻¹	7933	24800	15485	3495
	Interaction of tree density and their circumference (NhaCir)	quantitative	–	111500	683100	388200	114320
	Clay content (Clay)	quantitative	%	29.8	64.2	52.73	8.4
Spatially derived	Elevation (Elevation)	quantitative	m	1382	1655	1487	73.6
	Slope (slope)	quantitative	degree	1	40.7	19.4	9.8
	Plantation duration (age 1)	quantitative	year	17	111	67.1	21
	Coppice age (age 2)	quantitative	year	3	5	4	0.72
	Soil unit (UCsoil)	categoric	3 classes				
	Morphological Unit (UCmod)	categoric	3 classes				

Table 4.2 Descriptions and statistics of carbon pools

Carbon pool	Components	C stocks (kg m ⁻²)				
		n	Min	Max	Mean	SD
Above ground biomass (ABG)	leaves, branches, shoots	29	5.8	38.5	16.4	6.7
Below ground biomass (BLG)	Coarse Root , Medium root	41	11.2	54.1	39.1	10.0
Soil Organic Carbon (SOC)	30 cm depth and calculated for a fixed equivalent mass of soil (4000 kg m ⁻²)	41	63.0	143.8	85.5	18.7
Total Carbon Stock (TCS)		29	112.9	210.2	145.4	24.5

Components of ABG pool were separated as practiced locally; Coarse root have diameter ≥ 10 mm; 10 cm < diameter Medium root < 2 mm

4.2.2.2. Soil data

Soil sampling was carried out in the same eucalyptus stands used for biomass assessment ($n = 41$). Soils were sampled using soil core sampler (Cobra TT Hammer, 8.6 cm of diameter) in four replicates for each stand and at four different depths (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm and 30-40 cm). Soil Bulk density were determined after oven-drying for 48 h at 105° C and carbon content was measured after dry combustion with an elemental analyzer (Carlo Erba 2000) after air drying and sieving to 2mm. SOC was then calculated as follow:

$$\text{SOC} = \sum (\text{BD}_i \times \text{C}_i \times (1-\% \text{ stoniness}) \times t_i) / 10 \quad (\text{eq. 1})$$

where **SOC**: C stock in soil to 30 cm depth (kg m^{-2}), **BD_i**: bulk density of the soil (Mg m^{-3}) in i layer, **C_i**: C content of the soil (mg C g^{-1} soil) in layer i , **% stoniness**: percentage of stones > 2 mm in the sampled soil and **t_i**: thickness of the corresponding layer i ($i = 0-10$ cm, 10-20 cm, ...)

Correction was applied on the mass of soil to be considered before calculating C stocks at 30 cm depth (Ellert and Bethany, 1995; Gifford and Roderick, 2003); thus all SOC were reset in 30 cm depth were with a fixed equivalent mass of soil at 4000 kg m^{-2} (**Table 2**) (Turner and Lambert, 1999; Paul *et al.*, 2002).

All the stands localization were determined with a global positional system (GPS) and integrated into a Geographical Information System (GIS) to serve as reference dataset for spatial analysis and modeling.

4.2.3. Spatial analysis

4.2.3.1. Land use mapping

The combined used of detailed field base vegetation data, environmental data and satellite imagery is a promising method for accurate predictive mapping of vegetation (Poulos *et al.*, 2007; Ordóñez *et al.*, 2008; Goetz *et al.*, 2009). In this study, land use mapping was focused on eucalyptus plantation and more precisely on the production of plantation age map and coppice age map. These two plantation characteristics were thought to be important predictors for biomass and soil carbon pool. Both map used 2006 as a reference year.

Photo-interpretation was carried out on aerials photographs obtained from the Malagasy National Geographic Institute taken at three different dates, 1949, 1965 and 1995 and at 1:40 000, 1:25 000, 1:20 000 scale respectively. Supplementary QuickBird image at 1 m resolution from 2006 was also used as base map for photo-interpretation. Photographs were scanned, georeferenced in the national spatial reference system called Laborde. At each date, resulting image was interpreted according to five land cover classes: plantation of eucalyptus, slope crop land (“*tanety*”), rice crop land, village and rocks. The four land cover maps were overlaid and a filter was applied considering only the 2006 planted area. Considering the date at which eucalyptus appeared for each corresponding polygon, it was possible to establish a map representing four period of plantation: more than 57 years, between 41 and 57 years, between 11 and 41 years and less than 11 years. Field investigations were performed to verify as much as possible the validity of this classification.

A supervised maximum likelihood classification was performed on 20-m resolution SPOT 4 image acquired at three different years: 1999, 2003 and 2006. Images were coregistered on 2006 SPOT image and normalize difference vegetation index (NDVI) was derived for each date. All these images were stacked together and areas without eucalyptus plantation were masked using the 2006 photo-interpretation. Training sites were digitally delimited using a visual recognition of eucalyptus cuts, easily detectable on vegetation index images, and a comparison between dates. This allowed identifying coppice plot cut in 2006, coppice plot cut in 2003 but not in 2006, coppice cut in 1999 only and coppice plot that do not show clearance area for all dates. Considering that cuts are detectable few years, we ended with four coppice age classes: less than one year coppice, one to three year, three to seven years and more than seven years. Classification accuracy was tested using random selection of several sites (145 tests pixels) for each classes that were not used for model calibration. Classification accuracy was considered satisfactory when global accuracy coefficient is superior to 0.84 and Cohen’s kappa coefficient superior to 0.81 (Landis and Koch, 1977)

4.2.3.2. Terrain proxies

Digital Elevation Model (DEM) is among the most widely used spatial data source as it can serve as a basis for multiple purpose study and because accurate and high resolution DEM are less and less expensive. In this study the freely available Shuttle Radar topographic Mission DEM (SRTM, 2009) at 90 meters resolution was used. Slope expressed in percentage was derived using a GIS

(ArcGIS, 2004) and was used, together with elevation as potential carbon predictors in the modeling and in the soil mapping process presented below.

4.2.3.3. Digital Soil Mapping

Soil type representing various soil properties such as clay, pH, and water retention may greatly affect eucalyptus growth and production. As such information was not available on the studied area, a field soil survey was carried out in order to produce a georeferenced soil map. The procedure applied here follows the main steps presented by Legros (2006): existing knowledge and map inventory, sketch mapping using aerial photograph, field trip and sampling with and auger hole, data synthesis and soil unit delineation.

Two national scale soil maps, including a morphological map at 1:1,000,000 (Delenne and Pelletier, 1981) and a pedologic map at 1:1,000,000 (Riquier, 1968) permitted to confirm a uniform granite parental material and the presence of ferrasol more or less weathered. Previous soil study discussed the high influence of shape relief and elevation on soil differentiation, particularly ferrasol, in the highlands of Madagascar (Bourgeat and Zebrowski, 1973; Randriamboavonjy, 1996). Field observation of soil along 12 topographic transects, from the top to the bottom of the hill at 100 m interval, allowed to confirm and precise the link between relief and soil for the area. Thus, a landform map was first produced using elevation and slope cutoff values. Three morphologic units were defined: high-gradient hill characterized by high elevation (1,450 to 1,750 m of elevation) with sloping sites (14 to 29 % or more), Medium-gradient hill characterized by intermediate elevation (1,450 to 1,600 m) with moderate to high slope (8 to 29 % or more) and Low-gradient foot slope with low elevation (1,350 to 1,450 m) and gently slope (< 8%).

On top of the auger hole observation along transect, 32 profiles to 1m depth were described and sampled for complementary laboratory analysis. Soil description was focused on criteria used in the literature to differentiate ferrasol sub-types: color of the horizon, presence of stones or alteration minerals, compaction of the horizon, texture and depth at which horizon of alteration (C horizon) appeared. Classical soil laboratory analysis allowed confirming field identification and precisising soil definition. Three soil types were identified, namely (Bourgeat and Petit, 1969): eroded ferrasol (capacity exchange cationic CEC = 4.97 me 100 g⁻¹ clay to 1m depth and horizon of alteration appears at less than 60 cm depth), less eroded ferrasol (CEC = 2.87 me 100 g⁻¹ clay

to 1m depth and horizon of alteration appears between 60 to 100 cm depth) and typical ferralsol (CEC = 1.33 me 100 g⁻¹ clay to 1m depth and horizon of alteration appears beyond 100 cm depth). The final soil map was then delineated on the 2006 Quick Bird image using a GIS, according to the profile location, field knowledge and the morphological map.

4.2.4. Modeling

4.2.4.1. Factors set

From the data collection and spatial analysis, various factors (Table 4.1) were identified and further used in the modeling. The first set of variable represents those that were measured on field and refers more to eucalyptus stand biophysical variable. The second set of variable represents spatially derived variable which cover the whole county. Several combinations of variable were tested in order to select the most relevant factors according to the pool considered.

4.2.4.2. Regression

Regression model were used in this study in order to (i) predict C stocks using various factor sets and to (ii) evaluate influences of the relevant predictors in the modeling. Three different regression methods were tested : a simple linear regression (SLM) that express the relationship between C stock and a single quantitative predictor, a multiple linear model (MLM) and a boosted regression tree model (BRT) that both involves several factors into the modeling. The MLM is a linear regression of various quantitative factors. It is commonly used in environmental studies as it allows an clear understanding of influence between quantitative factors from the b-coefficients indicated on the linear model expression (Bourgeon *et al.*, 1999). BRT is a boosted version of the classification and regression tree method CART (Friedman, 2001; Poulos *et al.*, 2007). The algorithm generate small decision trees from a set of learning case iteratively and the final model is a linear combination of many sub-tree models. BRT offers several advantages, mainly: the ability to use numeric or categorical factors, the ability to deal with nonlinearity, the insensitivity to outliers or missing data and inclusion of irrelevant factors (McBratney *et al.*, 2003; Brown *et al.*, 2006; Krishnan *et al.*, 2007). BRT was previously used in C stock mapping (Krishnan *et al.*, 2007) and other soil properties estimation (Brown *et al.*, 2006; Tittonnel *et al.*, 2008; Martin *et al.*, 2009) and soil landscape prediction (Grinand *et al.*, 2008). Two parameters have to set: (i) the learning rate (or shrinkage) that determines the contribution of each tree to the final BRT model, and (ii) the tree size that determines the number of tree (iteration) required for an optimal

prediction (Elith *et al.*, 2008; Martin *et al.*, 2009). In this study, values were set to 0.001 and 3000 respectively. All data mining were performed in R-stat software (Hornik, 2006), using glm package for linear regression (reference GLM) and gbm package (Ridgeway, 2007) for regression tree.

4.2.5. Carbon mapping and quantification

Carbon mapping of natural biosphere component is not a straightforward task and is under considerable studies that aim to find out easy to use, accurate and reproducible method. These methods include a range of procedures from large scale simple method to complex site-specific method, without a tradeoff between both. For instance, in biomass mapping using remote sensing data, Goetz *et al.* (2009) identified three main approaches: Stratify & Multiply (SM), Combine & Assign (CA) and Direct Remote Sensing (DR). SM is the simplest approach which estimates total C values by multiplying assigned single value (or a range of values) for thematic map class with the area of this thematic class. CA is an extension of SM approach which essentially makes use of multiple spatial dataset to produce finer spatial units of aggregation. DR approach consists in deriving C stocks directly from satellite measurements, by calibrating them to field estimates using statistical technique such as regression models.

A modified DR approach was used in this study as it involved regression model and a bunch of spatial and non-spatial predictors. The models that provided the most accurate result from the modeling were selected to produce C stock map for each pool (ABG, BLG, and SOC). The first step involved a standardization of the spatial predictors. Vectors explanatory variables (soil and landforms units) were converted into raster. All corresponding grids were adjusted to the same map extent and resampled with the same 30 meter pixel size resolution. This value was considered suitable for a 1:25 000 output mapping as suggested by McBratney *et al.* (2003) for pedometric application. Secondly, these variables were then imported in R software to run and test the different models. The retained pool-specific model were applied on each of the relevant factors set so that to predict carbon within each pool. Finally, predicted values of C stock in each C pool calculated per pixel were exported back to ArcGIS format. This method allowed obtaining three pool-specific carbon maps of the studied area.

The total C stocks map per pixel was afterwards estimated as followed (Ordonez *et al.*, 2008):

$$C_{\text{total}} = \text{SOC} + C_{\text{blg}} + C_{\text{abg}} \quad (\text{eq.3})$$

where C_{total} : total C stocks; SOC:C stocks in fixed equivalent mass of soil in 0-30 cm depth; Cblg: C stocks in belowground component; all expressed in Mg C ha⁻¹.

The total C stock in Tg (10¹² g) over the entire county, for each pool and for total C, was finally estimated by multiplying C values of pixels by 0.09, i.e. the surface in ha of a 30-m pixel) and summing the results.

4.2.6. Validation procedure

Models performances were evaluated using the root mean square error (RMSE) and the coefficient of determination (R^2). They were calculated for the entire dataset which thus refers to an interval validation. Coefficient of Variation (CV) for the mean C stock for each component was calculated to show the variation of C stock calculation for each pool.

The ratio of performance to deviation (RPD) was also computed in order to interpret the prediction ability of each calibration model (Chang and Laird, 2002; Gomez *et al.*, 2008). RPD corresponds to the ratio between the standard deviation of the variable to model over RMSE. Quality of the model was interpreted according to the three classes of RPD proposed by most authors (Chang *et al.*, 2001; Pirie *et al.*, 2005; Du *et al.*, 2009; Du and Zhou, 2009): RPD > 2 corresponds to models that can accurately predict the property in question, RPD between 1.4 and 2 gather models that can be possibly improved, and models of RPD < 1.4 indicate no prediction ability of the model.

4.3. RESULTS AND DISCUSSIONS

4.3.1. Correlation between variables

Relationships between variables (including quantitative predictors and C stocks that have to be explained) are given in **Table 4.3**. Concerning field variables, there are: (i) a positive correlation ($R = 0.59$) between elevation and the slope in parallel with the delimitation of morphology units ; (ii) a negative correlation ($R = -0.55$) between elevation and soil clay content that confirms soil type distribution; (iii) a negative correlation between the mean circumference at breast height (CBH) and both density of shoots (Stocking2, $R = -0.53$) and elevation ($R = -0.45$) but a positive one with coppice age (Age2, $R = 0.58$); and, (iv) a negative correlation between the mean circumference of stumps per plot (Cir) and both the plantation age (Age1, $R = -0.45$) and density

of plantation (Stocking1, R = -0.58) which may resulted from management practice or natural regeneration (sucker development).

For C stock variables : (v) SOC stock was positively correlated with elevation (R = 0.56) and slope (R = 0.72); (vi) Cblg was correlated with Cir (R = 0.48), interaction of density of stumps and their circumference (NhaCir, R = 0.49) and elevation (R = 0.4) and (vii) Cabg showed relationships with CBH (R = 0.53), coppice age (R = 0.65), density of shoots (R = -0.6) and slope (R = 0.48).

It appears that field variables seemed to be well correlated with C stocks in all compartments. Based on these correlations between variables, several model structures have been established in order to determine the best ones for predicting C stock in each pool.

Table 4.3 Correlation matrix between carbon pools and predictor variables

	SOC	Cblg	Cabg	Cir	CBH	Age1	Age2	Stocking1	Stocking2	NhaCir	Altitude	Slope	Clay
SOC	1.00												
Cblg	0.21	1.00											
Cabg	0.21	0.14	1.00										
Cir	0.32	0.48	0.15	1.00									
CBH	-0.35	-0.24	0.53	-0.01	1.00								
Age1	0.02	0.13	-0.09	-0.45	-0.11	1.00							
Age2	-0.03	0.19	0.65	-0.06	0.58	0.18	1.00						
Stocking1	-0.17	0.17	-0.14	-0.58	-0.23	0.43	-0.02	1.00					
Stocking2	-0.21	0.17	-0.60	-0.10	-0.53	0.11	-0.44	0.16	1.00				
NhaCir	-0.05	0.49	-0.09	-0.10	-0.25	0.25	-0.06	0.86	0.15	1.00			
Altitude	0.56	0.40	0.12	0.24	-0.45	-0.07	0.08	-0.10	-0.11	-0.01	1.00		
Slope	0.72	0.27	0.48	0.10	-0.28	0.12	0.19	0.11	-0.28	0.15	0.59	1.00	
Clay	-0.09	-0.32	0.00	0.20	0.33	-0.31	-0.25	-0.30	-0.14	-0.25	-0.55	-0.31	1.00

4.3.2. Results of modeling

Table 4.4 summarised the results from the modelling trials where, for each compartment, each model approach (SM, MLM and BRT) was tested. In general, in terms of predictive performance (comparison of observed and predicted values of C stock), BRT model offered the highest values of coefficient of determination (R^2) and RPD and the lowest error values (RMSE).

Table 4.4 Characteristics of models tested for each pool

Pool	Approach	Variables	R ²	RMSE	RPD	n
Cabg	SM	Age2	0.42	5.18	1.3	29
		Stocking2	0.36	5.84	1.16	29
		CBH	0.28	5.74	1.18	29
		Slope	0.23	5.94	1.14	29
	MLM	Age2, Slope, CBH	0.72	3.58	1.89	29
		Age2, Stocking2, Slope	0.63	4.14	1.63	29
		Age2, Stocking2, Slope, CBH	0.72	3.57	1.89	29
	BRT	Age2, Slope, CBH	0.61	4.25	1.6	29
			0.61	4.21	1.6	29
		Age2, Stocking2, Slope	0.57	4.53	1.49	29
			0.58	4.72	1.55	29
		Age2, Stocking2, Slope, CBH	0.74	3.47	1.95	29
Cblg		SM	Age1	0.2	9.35	1.08
	NhaCir		0.82	4.43	2.38	39
	Altitude		0.24	7.54	0.99	38
	MLM	Age1, NhaCir, Altitude	0.66	5.9	1.7	
	BRT	Age1, NhaCir, Altitude	0.85	3.89	2.59	41
	SM	Age1	0.11	17.85	1.06	41
		Atitude	0.29	15.94	1.19	41
		Slope	0.28	16.06	1.18	41
	SOC	MLM	Age1, Altitude, Slope	0.4	14.62	1.29
Age1, Altitude, Slope, Cabg, Cblg			0.57	12.89	1.52	29
BRT		Age1, Altitude, Slope	0.61	11.82	1.6	41
		Age1, Altitude, Slope, Cabg, Cblg	0.68	11.38	1.72	29
		Age1, Altitude, Slope, Cabg, Cblg, UCsoil, Ucmmod	0.68	11.38	1.72	29

(i) Models tested are SM for simple linear regression, MLM for multiple linear regression and BRT for boosted regression tree (ii) C pool modeled are Cabg for aerial biomass, Cblg for belowground biomass and SOC for soil organic. T Student test $p < 0.05$.

For the ABG component, the range of values for R², RMSE and RPD were respectively 0.23 - 0.74, 5.94 - 3.47 and 1.14 to 1.95. Single predictor as coppice age was not enough to explain

variability of Cabg (not more than 42%) and GLM and BRT presented similar performance when considering Age2, Stocking2, Slope and CBH as predictors.

For the BLG component, R^2 , RMSE and RPD varied in the ranges 0.2 – 0.85, 9.35 – 3.89 and 1.08 – 2.59 respectively and it appeared that NhaCir (interaction between stump stocking and circumference) was a good predictor of Cblg. Actually, NhaCir could explain more than 80% of Cblg variability, even with SM. Concerning SOC prediction, values of R^2 , RMSE and RPD ranged 0.11 – 0.68, 17.87 – 11.38 and 1.06 – 1.72, respectively. Plantation duration alone was not enough to explain evolution of SOC stocks and considering all possible relevant predictors allowed to account for less than 70 % of SOC variability.

BRT models which considered the higher number of relevant predictors offered the best performance; it corresponds to equations (16), (22) and (31) in **Table 4.4** for ABG, BLG and SOC respectively. The relative importance of predictor variables in each compartment model is represented in bar charts (**Figure 4.2**). For Cabg, an almost balanced importance was observed between the predictors; nevertheless, slope and mean circumference of shoots contributed mainly in the model (45 and 28% respectively) and after coppice age and density of shoots (about 18 and 10%). ABG density was affected by: topographic aspect (Leuschner *et al.*, 2007), CBH and coppice age as they are concerned by establishment of allometry equations (Telenius and Verwijst, 1995; Senwela and Sims, 1998, Heinsoo *et al.*, 2002; Zewdie *et al.*, 2009) and density (Proe *et al.*, 1999; Proe *et al.*, 2002). Concerning Cblg, there is effect of density if this last is less than 10^4 stools ha^{-1} (Tomé and Verwijst, 1996) and presumably, BLG becomes more important once trees have acquired a certain size (Sumanta *et al.*, 2007). These reasons may explain the large contribution (more than 80%) of NhaCir in model construction, this variable reflecting interaction between Cir and density of stumps. Besides, elevation and plantation age were also found to affect Cblg by increasing it (Paul *et al.*, 2002; Guo and Gifford, 2002; Leuschner *et al.*, 2007). For SOC, the greatest contribution in model construction was from elevation (about 85%), followed by slope and plantation duration (Age1). These results are due by the fact that soil distribution in the highlands of Madagascar depends on topographic aspects (Bourgeat and Zebrowski, 1973; Randriamboavonjy, 1996). But also, because increase elevation involved lower temperature which, when coupled with soil acidity and eucalyptus residue recalcitrance upon microbial activity, constituted main factors to the raise of SOC (Guo and Gifford, 2002; Chen *et al.*, 2005; Ymer *et al.*, 2006; Leuschner *et al.*, 2007).

In summary, results of internal validation from these retained BRT models confirmed their choice, as shown in **Figure 4.3**. Regarding the easiness in data collecting, general forms of the models were as following: $C_{abg} = f(\text{Slope}, \text{CBH}, \text{Age2}, \text{Stocking2})$, $C_{blg} = f(\text{NhaCir}, \text{Altitude}, \text{Age1})$ and, $\text{SOC} = f(\text{Altitude}, \text{Slope}, \text{Age1})$ and, values of R^2 and RPD between measured and predicted C stocks ranged from 0.61 to 0.85 and 1.6 to 2.59 respectively. Based on RPD thresholds mentioned in the statistic analysis section, it may be concluded thus that, these models belong to the class of models which can accurately predict the C stocks in all compartments, or at least, can possibly improved the estimation (mainly for SOC).

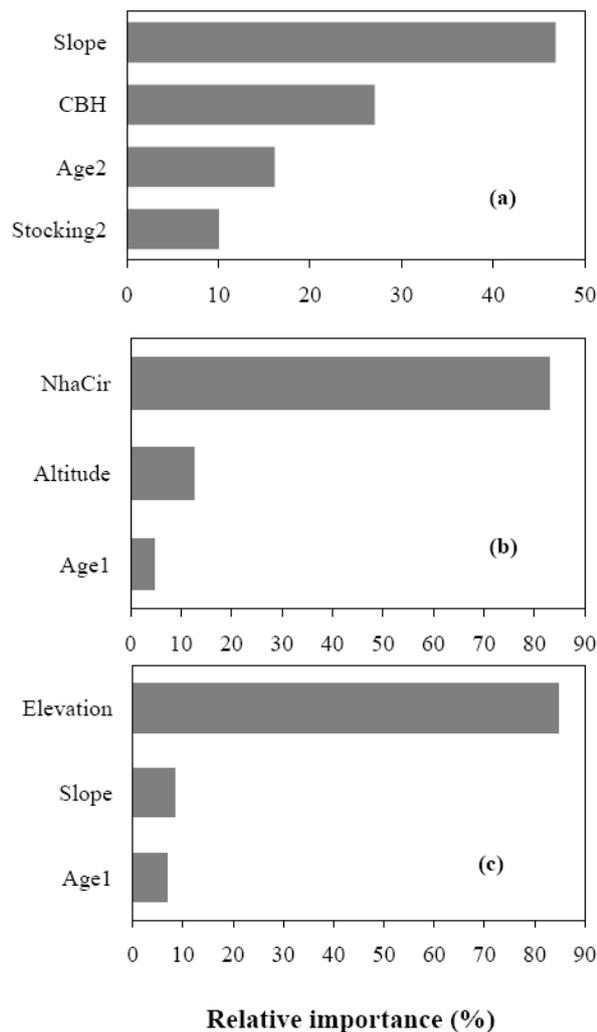


Figure 4.2 Bar charts giving the relative importance of predictor variables determined by BRT approach and used for estimation of C stock in (a) ABG pool, (b) BLG pool and (c) SOC pool.

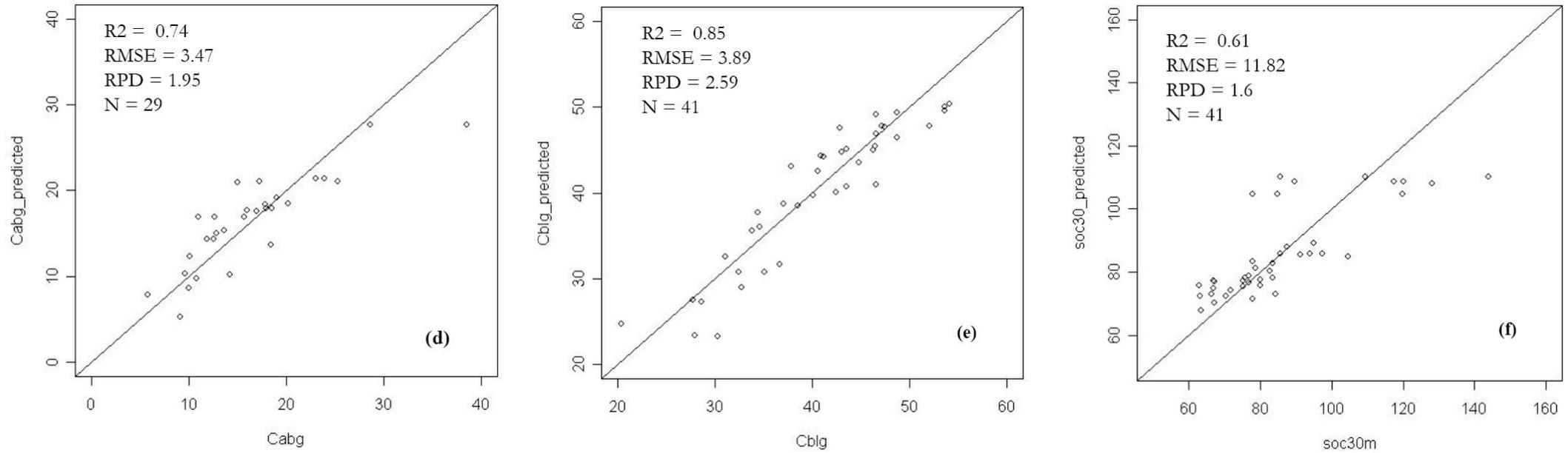


Figure 4.3 Graphs of Predicted vs Measured C stocks for each model retained in (d) ABG pool, (e) BLG pool and (f) SOC pool.

4.4. MAPPING OF C STOCKS AND THEIR VARIABILITY

Based on coupling GIS with results from the modelling part using BRT models as described above, C stocks maps were obtained for each compartment as illustrated in **Figure 4.4**. C stocks values in the study area varied from 9 to 27 kg m⁻² in ABG, 22 to 47 kg m⁻² in BLG and 61 to 109 kg m⁻² in SOC. The total of the three compartments varied in the range 104-183 kg m⁻² . , ABG-BLG and SOC compartments represented about 13.5, 28 and 58.5 % of the total C stock respectively. Reminding that the ecosystem studied herein is a wood fuel coppice system where after each cutting cycle only BLG and SOC remains in the site, these stocks of C may constituted carbon-neutral and carbon-negative compartments as described by Mathews (2008). ABG pool is a C-neutral fuel because it absorb CO₂ as it grows and release the same C back into the atmosphere when burnt whereas, BLG and SOC compartments are C negative compartments as they absorb CO₂ as they grow and release less than this amount into atmosphere through carbon capture and storage.

At the scale of the whole study area, there were 32.25 ± 13.28 Gg C for ABG, 66.63 ± 14.72 Gg C for BLG and, 139.36 ± 35.88 Gg C for SOC, contributing to a total stock of 238.26 ± 40.5 Gg C (1 Gg = 10⁹ g). If considering the morpho-pedology map in Figure 2, it is noticed that higher C stocks occurred mainly in the west part of the studied area where landform were characterised by high elevation and slope. This would be attached mainly to elevation variation as it can be found in other studied mountainous area (Schwartz and Namri, 2002; Chen *et al.*, 2005; Ymer *et al.*, 2006; Lemma *et al.*, 2007; Leuschner *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2008). Possible explanations discussed by these authors were: the bio-functioning of roots in a coppice ecosystem where stump recovered by cambium were added to the remaining root system in each new resprouting (Wildy and Pate, 2002), an investment in BLG component for C allocation due to reduced nitrogen supply in low temperature, the influence of litter production and quality associated with microclimate in high altitude which favour SOC accretion and, C accumulation through plantation duration (Lal, 2005; Su *et al.*, 2005).

Besides, C stock values presented above were associated with an uncertainty around the final estimate of either in each compartment or for the total ecosystem (Sierra *et al.*, 2007; Langenspiepen *et al.*, 2009). Measurement of model calculation accuracies had already be done from correlation between observed and predicted values and determination of the RMSE and

RPD, thus, uncertainty considered herein was estimated based on the spatial variation among studied plots. This last, expressed by coefficient of variation were 41.5%, 22.09%, 25.75% and 17% for ABG ($n = 29$), BLG ($n = 41$), SOC ($n = 41$) and total ($n = 29$) compartments.

However, considering that this study constituted a pioneer for C budget at a local scale (1: 25.000), we think that these uncertainties could be by far reduced by detailed accounting of all sources of error. Actually, in C budget accounting, there are common error sources that have to be investigated (Brown *et al.*, 1999; Phillips *et al.*, 2000; IPCC, 2003; Peltoniemi *et al.*, 2006; Krishnan *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2008; Heim *et al.*, 2009); they are: sampling error for sample plot selection, accuracy statement error from the direct remote sensing method, measurement precision in the field, regression error for inventory, tree based biomass error in allometry establishment and the total error which is the combination of variances accounting all source of error.

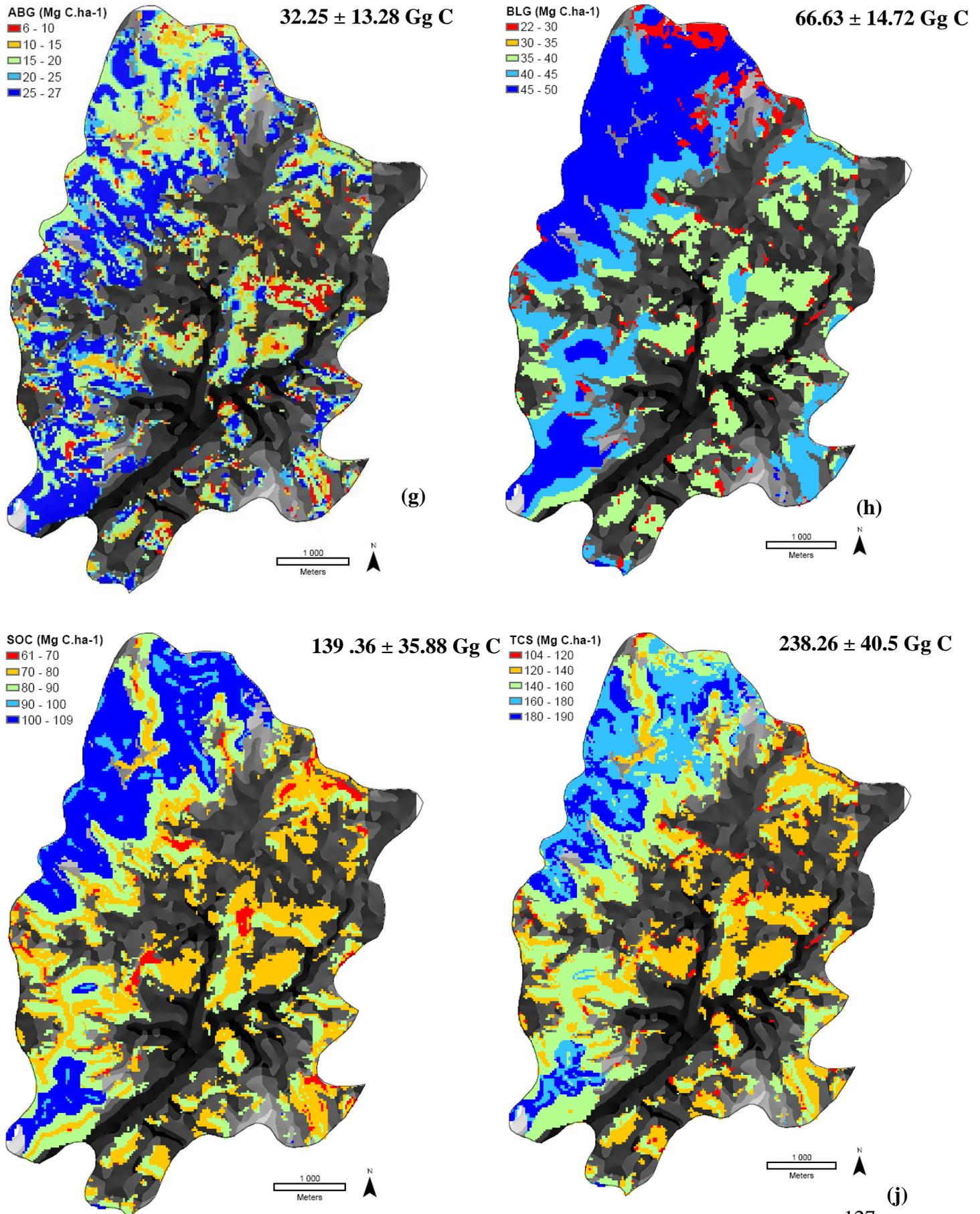


Figure 4.4 C stocks (kg m^{-2}) distribution maps in the different pools of the study area based on predicted C stocks obtained by the use of boosted regression tree models, in (g) the ABG pool, (h) the BLG pool (i) the SOC pool and (j) all pools. The scale is in 1: 25,000. * $1 \text{ Gg} = 10^3 \text{ Mg} = 10^9 \text{ g}$.

4.5. CONCLUSIONS

This work showed that boosted regression tree (BRT) was an efficient tool to predict C stock in the different compartments for the studied area, in comparison with classical simple or multiple linear regression. Results demonstrated that there were different relevant factor sets which control C storage in each pool. Slope, coppice age, mean circumference at breast height and density of shoots were the best predictor for the AGB a predictor considering the interaction between the mean circumference and density of stools, elevation and plantation duration for below grounds biomass and, elevation, slope and plantation duration for soil organic carbon pool. Accuracy assessment carried out using coefficient of determination (R^2) and ratio of standard deviation to prediction error (RPD) showed satisfactory results, respectively 0.74 and 1.95 for AGB, 0.85 and 2.59 for BLG, 0.61 and 1.6 for SOC.

In terms of C quantity, BLG and SOC compartments were pointed out to constitute major components for C storage in these coppices of *Eucalyptus robusta* in the highlands of Madagascar.

The total carbon budget estimation revealed that BLG and SOC contributed greatly, 28% and 58.5 % respectively, in the 238.26 ± 35.88 Gg of the total C. Thus they are potential C sinks to take into account to counteract the increasing trend of atmospheric CO_2 concentration, mainly in Clean Development Mechanism (CDM) activities.

Nevertheless, these assessments considered only spatial variability between studied eucalyptus stands as uncertainty accounting. These error variances ranged from 17 to 41.15 % depending on the pool. They need to be computed accurately at each step of the C budget accounting; they could be also reduced by improving sampling designs.

Hence, this work allowed to a better understanding the spatial and temporal distributions of C stock in Malagasy Highlands. This study is thought to provide new insight into the development or improvement of methodologies that reliably define the baseline of C stock in natural C pool at national scale. At present, this is an essential need for the country of Madagascar in the context where climate change policies generate activities such as CDM and Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation (REDD).

ACKNOWLEDGMENT

REFERENCES

- Batjes, N.H., 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47, 151-163.
- Bernoux, M., Carvalho, M.C.S., Volkoff, B., Cerri, C.C., 2002. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Sciences and Society of American Journal* 66, 888 - 896.
- Bourgeat, F., Petit, M., 1968. Caractère des surfaces d'aplanissement sur les Hautes Terres Malgaches In. *C. R. Sem. Géol. , Madagascar*, p. 7.
- 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.
- Bourgeon, G., Salvador Blanes, S., Houillier, F., Harindranath, C.S., Shivaprasad, C.R., 1999. Cartographie du carbone organique des sols en Inde du Sud: Exemple du district de Shimoga au Karnataka. *Bois et Forêts des Tropiques* 262, 31-43.
- Breiman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning* 45, 5-32.
- Brown, S.L., Schroeder, P., Kern, J.S., 1999. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management* 123, 81-90.
- Cairns, M.A., Brown, S., Helmer, E.H., Baumgardner, G.A., 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111, 1-11.
- Carriere, S.M., Randriambanona, H., 2007. Biodiversité introduite et autochtone : antagonisme ou complémentarité ? Le cas de l'eucalyptus à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques* 292, 5-21.
- Cerri, C.E.P., Easter, M., Paustian, K., Killian, K., Coleman, K., Bernoux, M., Falloon, P., Powlson, D.S., Batjes, N., Milne, E., Cerri, C.C., 2007. Simulating SOC changes in 11 land use

- change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and Century models. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 122, 46-57
- Chang, C.-W., Laird, D.A., Mausbach, M.J., Hurburgh, C.R.J., 2001. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy–Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal* 65, 480–490.
- Chang, C.W., Laird, D.A., 2002. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N. *Soil Science* 167, 110-116.
- Chen, Q., Shen, C., Sun, Y., Peng, S., Yi, W., Li, Z.a., Jiang, M., 2005. Spatial and temporal distribution of carbon isotopes in soil organic matter at the Dinghushan Biosphere Reserve, South China. *Plant and Soil* 273, 115–128.
- De'ath, G., 2007. Boosted trees for ecological modeling and prediction. *Ecology* 88, 243-251.
- Du, C.w., Zhou, J., 2009. Evaluation of soil fertility using infrared spectroscopy: a review. *Environmental Chemical Letter* 7, 97-113.
- Du, C.w., Zhou, J., Wang, H., Chen, X., Zhu, A., Zhang, J., 2009. Determination of soil properties using Fourier transform mid-infrared photoacoustic spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy* 49, 32-37.
- 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.
- Eswaran, H., Van Den Berg, E., Reich, P., 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal* 57, 192-194.
- FAO, 2002. TERRASTAT, Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties. In. Land and water Development Division, Rome, Italy.

- 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.
- Fearnside, P.M., 2001. Effects of land use and forest management on the carbon cycle in the Brazilian Amazon. In: Dore, M.H.I. (Ed.), Climate Change and Forest Management in the Western Hemisphere. Haworth Press, New York, pp. 79-97.
- 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.
- Goetz, S.J., Baccini, A., Laporte, N.T., Johns, T., Walker, W., Kellndorfer, J., Houghton, R.A., Sun, M., 2009. Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods. Carbon Balance and Management 4 doi:10.1186/1750-0680-4-2 (<http://www.cbmjournal.com/content/4/1/2>).
- Gomez, C., Viscarra Rossel, R.A., McBratney, A.B., 2008. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. Geoderma 146, 403–411.
- Gray, J.M., Humphreys, G.S., Deckers, J.A., 2009. Relationships in soil distribution as revealed by a global soil database. Geoderma 150, 309-323
- Grinand, C., Rajaonarivo, A., Bernoux, M., Pajot, V., Brossard, M., Razafimbelo, T.M., Albrecht, A., Le Marthret, H., 2009. Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. Etude et Gestion des Sols 16, 23-33.
- Grinand, C., Arrouays, D., Laroche, B., Martin, M.P., 2008. Extrapolating regional soil landscapes from an existing soil map: Sampling intensity, validation procedures, and integration of spatial context. Geoderma 143, 180–190.
- Guo, L.B., Gifford, M., 2002. Soil carbon stocks and land use: a meta analysis. Global Change Biology 8, 345-360.

- Heim, A., Wehrli, L., Eugster, W., Schmidt, M.W.I., 2009. Effects of sampling design on the probability to detect soil carbon stock changes at the Swiss CarboEurope site Lägeren. *Geoderma* 149, 347–354.
- Heinsoo, K., Slid, A., Koppel, A., 2002. Estimation of shoot biomass productivity in Estonian *Salix* plantations *Forest Ecology and Management* 170, 67-74.
- Hornik, K., 2006. The R FAQ. <http://CRAN.R-project.org/doc/FAQ/R-FAQ.html>.
- Houghton, R.A., Goetz, S.J., 2008. New satellites offer a better approach for determining sources and sinks of carbon. *Eos Transactions of the American Geophysical Union* 43, 417-418.
- Houghton, R.A., Goodale, C.L., 2004. Effects of Land-Use Change on the Carbon Balance of Terrestrial Ecosystems. In: Change, E.a.L.U. (Ed.), *Geophysical Monograph*. the American Geophysical Union, p. 14.
- IPCC, 2003. Good Practice Guidance: Land Use Change and Forestry Sector In: Jim Penman, M.G., Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger,, Riitta Pipatti, L.B., Kyoko Miwa, Todd Ngara,, Wagner, K.T.a.F. (Eds.), *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Japan.
- 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, p. 996.
- Jenny, H., 1941. *Factors of soil formation—A system of quantitative pedology*. Dover, New York.
- Krishnan, P., Bourgeon, G., Lo Seen, D., Nair, K.M., Prasanna, R., Srinivas, S., Muthusankar, G., Dufy, L., Ramesh, B.R., 2007. Organic carbon stock map for soils of southern India: A multifactorial approach. *Current Science* 93, 706-710.

- Lal, R., 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220, 242-258.
- Landis, J.R., Koch, G.G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33, 159--174.
- Langensiepen, M., Fuchs, M., Bergamaschi, H., Moreshet, S., Cohen, Y., Wolff, P., Jutzi, S.C., Cohen, S., G., R.M., Li, Y., Fricke, T., 2009. Quantifying the uncertainties of transpiration calculations with the Penman–Monteith equation under different climate and optimum water supply conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1063-1072
- Legros, J.P., 2006. *Mapping of the Soil*. Science Publishers.
- Lemma, B., Kleja, D.B., Olsson, M., Nilsson, I., 2007. Factors controlling soil organic carbon sequestration under exotic tree plantations: A case study using the CO2Fix model in southwestern Ethiopia. *Forest Ecology and Management* 252, 124-131.
- Leuschner, C., Moser, G., Bertsch, C., Röderstein, M., Hertel, D., 2007. Large altitudinal increase in tree root/shoot ratio in tropical mountain forests of Ecuador. *Basic and Applied Ecology* 8, 219—230.
- Lugo, A.E., Brown, S., 1993. Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon. *Plant and Soil* 149, 27-41.
- Malhi, Y., Baldocchi, D.D., Jarvis, P.G., 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment* 22, 715–740.
- Martin, M.P., Lo Seen, D., Boulonne, L., Jolivet, C., Nair, K.M., Bourgeon, G., Arrouays, D., 2009. Optimizing pedotransfer functions for estimating soil bulk density using boosted regression trees. *Soil Science Society of America Journal* 73, 485-493.
- Martin, M.P., Lo Seen, D., Boulonne, L., Jolivet, C., Nair, K.M., Bourgeon, G., Arrouays, D., 2009. Optimizing pedotransfer functions for estimating soil bulk density using boosted regression trees. *Soil Science Society of America Journal* 73, 485-493.
- Mathews, J.A., 2008. Carbon-negative biofuels. *Energy Policy* 36, 940–945.

- McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3-52.
- McBratney, A.B., Odeh, I.O.A., Bishop, T.F.A., Dunbar, M.S., Shatar, T.M., 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma* 97, 293–327.
- Meersmans, J., De Ridder, F., Cantersa, F., De Baets, S., Van Molle, M., 2008. A multiple regression approach to assess the spatial distribution of Soil Organic Carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma* 143, 1-13.
- Ordonez, J.A.B., De Jong, B.H.J., Garcia-Oliva, F., Avina, F.L., Pérez, J.V., Guerrero, G., BRTínez, R., Maserá, O., 2008. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management* 255, 2074–2084.
- Paul, K.I., Polglase, P.J., Nyakuengama, J.G., Khanna, P.K., 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management* 168, 241-257.
- Peltoniemi, M., Palosuo, T., Monni, S., Mäkipää, R., 2006. Factors affecting the uncertainty of sinks and stocks of carbon in Finnish forests soils and vegetation. *Forest Ecology and Management* 232, 75–85.
- Phillips, D.L., Brown, S.L., Schroeder, P.E., Birdsey, R.A., 2000. Toward error analysis of large-scale forest carbon budgets *Global Ecology and Biogeography* 9, 305-313.
- Pirie, A., Singh, B., Islam, K., 2005. Ultra-violet, visible, near-infrared and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopis techniques to predict several soil properties. *Australian Journal of Soil Research* 43, 713–772.
- Post, W.M., Izaurralde, R.C., Mann, L.K., Bliss, N., 2001. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil *Climatic Change* 51, 73–99.
- Post, W.M., Known, K.C., 2002. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology* 6, 317-328.

- 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.
- Proe, M.F., Craig, J., Griffiths, J., Wilson, A., Reid, E. , 1999. Comparison of biomass production in coppice and single stem woodland management systems on an imperfectly drained gley soil in central Scotland. *Biomass and Bioenergy* 17, 11.
- Proe, M.F., Griffiths, J.H., Craig, J., 2002. Effects of spacing, species and coppicing on leaf area, light interception and photosynthesis in short rotation forestry. *Biomass and Bioenergy* 23, 12.
- 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. Université d'Antananarivo, Madagascar. 117 p
- Randrianjafy, H., 1999. Les plantations d'Eucalyptus à Madagascar : Superficie, rôle et importance des massifs. In. *Projet FAO GCP/INT/679/EC, Madagascar*, p. 80.
- Ridgeway, G., 2007. Generalized boosted models: a guide to the gbm package.<http://cran.r-project.org/web/packages/gbm/vignettes/gbm.pdf>. 12.
- Robert, M., Saugier, B., 2003. Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. *C. R. Geoscience* 335, 577-595.
- Robinson, D., 2007. Implications of a large global root biomass for carbon sink estimates and for soil carbon dynamics. *Proceedings of the Royal Society* 274, 2753-2759.
- Saint-André, L., M'Bou, A.T., Mabilia, A., Mouvondy, W., Jourdan, C., Roupsard, O., Deleporte, P., Hamel, O., Nouvellon, Y., 2005. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a Eucalyptus hybrid in Congo. *Forest Ecology and Management* 205, 199–214.
- Santantonio, D., Herman, R.K., Overtos, W.S., 1977. Root biomass studies in forest ecosystems. *Pedobiologia* 17, 1-31.

- Schwartz, D., Namri, M., 2002. Mapping the total organic carbon in the soils of Congo. *Global and Planetary Change* 33, 77-93.
- Segalen, P., 1994. Introduction générale. Les sols ferrallitiques: leur identification et environnement immédiat. In: ORSTOM (Ed.), *Les sols ferrallitiques et leurs répartition géographique*. Tome 1, France, p. 579.
- Senelwa, K., Sims, R.E.H., 1998. Tree biomass equations for short rotation eucalypts grown in New Zealand. *Biomass and Bioenergy* 13, 133-140.
- Sierra, C.A., del Valle, J.I., Orrego, S.A., Moreno, F.H., Harmon, M.E., Zapata, M., Colorado, G.J., Herrera, M.A., Lara, W., Restrepo, D.E., Berrouet, L.M., Loaiza, L.M., Benjume, J.F., 2007. Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia. *Forest Ecology and Management* 243, 299-309.
- Su, Z.-Y., Xiong, Y.-M., Zhu, J.-Y., Ye, Y.-C., Ye, M., 2006. Soil Organic Carbon Content and Distribution in a Small Landscape of Dongguan, South China. *Pedosphere* 16, 10-17.
- Sumanta, B., 2007. Relationship between size hierarchy and density of trees in a tropical dry deciduous forest of western India. *Journal of Vegetation Science* 18, 389-394.
- Telenius, B., Verwijst, T., 1995. The influence of allometric variation, vertical biomass distribution and sampling procedure on biomass estimates in commercial short-rotation forests. *Bioresource Technology* 51, 247-253.
- Tittonell, P., Shepherd, K.D., Vanlauwe, B., Giller, K.E., 2008. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya—An application of classification and regression tree analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 123, 137–150.
- Tomé, M., Verwijst, T., 1996. Modelling competition in short rotation forests. *Biomass and Bioenergy* 11, 177-187.
- Tornquist, C.G., Mielniczuk, J., Cerri, C.E.P., 2009. Modeling soil organic carbon dynamics in Oxisols of Ibiruba (Brazil) with the Century Model. *Soil & Tillage Research*, doi:10.1016/j.still.2009.1005.1005.

- Turner, J., Lambert, M., 1999. Change in organic carbon in forest plantation soils in Eastern Australia. *Forest Ecology and Management* 133, 231-247.
- Verwijst, T., Telenius, B., 1999. Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *Forest Ecology and Management* 121, 137-146.
- Wildy, D.T., Pate, J.S., 2002. Quantifying above- and below-ground growth response of the western Australian Oil Mallee, *Eucalyptus kochii* subsp. *plenissima*, to constructing decapitation regimes. *Annals of Botany* 90, 18.
- Yimer, F., Ledin, S., Abdelkadir, A., 2006. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by topographic aspect and vegetation in the Bale Mountains, Ethiopia. *Geoderma* 135, 335–344.
- 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.
- Zhang, Y., Zhao, Y.C., Shi, X.Z., Lu, X.X., Yu, D.S., Wang, H.J., Sun, W.X., Darilek, J.L., 2008. Variation of soil organic carbon estimates in mountain regions: A case study from Southwest China. *Geoderma* 146, 449–456.
- Zornoza, R., Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Scow, K.M., Arcenegui, V., Mataix-Beneyto, J., 2008. Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1923-1930.

CHAPITRE V. CONCLUSIONS, LIMITES ET PERSPECTIVES DE L'ETUDE

L'importance des plantations d'eucalyptus des Hautes Terres malgaches a déjà fait l'objet de diverses études pour des fins socio-économiques. L'objectif de cette thèse est surtout d'étudier les potentialités environnementales de ces plantations en termes de séquestration de C. Il s'agit de : (i) développer les méthodologies adéquates qui permettent de quantifier les stocks de C dans les différents compartiments (aérien, racinaire, matière organique du sol) des taillis d'eucalyptus malgaches, (ii) d'analyser ces éventuelles potentialités de stockage de C, ainsi que (iii) d'effectuer des travaux de modélisation et de spatialisation des stocks de C mesurés afin d'étudier la répliquabilité des méthodes développées dans d'autres zones en vue d'activités MDP ou autres qui pourraient entrer dans le cadre de la rente carbone.

5.1. CONCLUSIONS

5.1.1. Mesures des stocks de C dans le compartiment du végétal sous eucalyptus

Malgré le fait que les peuplements forestiers étudiés soient âgés (jusqu'à plus de 100 ans) et n'ayant subi aucune forme d'entretien, les quantifications de biomasse aérienne mesurée dans cette étude (chapitre 2) sont similaires à celles données par la littérature (Telenius et Verwijst, 1995 ; Senelwa et Sims, 1998 ; Zewdie *et al.*, 2009). Ce compartiment a pu être quantifié à l'aide des équations allométriques reliant la biomasse avec la surface terrière de tous les rejets portés par la souche ($\text{m}^2 \cdot \text{souche}^{-1}$).

Pour le système racinaire (grosses et moyennes racines, $\text{Ø} \geq 2 \text{ mm}$), l'effort apporté pour une quantification précise avec recours au polygone de Voronoï a aussi permis d'établir des relations allométriques ($R^2 = 0.87$) entre sa biomasse racinaire et la circonférence des souches qui est un paramètre dendrométrique facilement mesurable sur le terrain. Habituellement, la biomasse racinaire de l'arbre est calculée à partir de la biomasse aérienne en utilisant le ratio racinaire/aérien. Cependant, diverses études (Cairns *et al.*, 1997 ; Robinson, 2007) ont montré que l'utilisation de ce ratio ne permettait pas d'estimer précisément la biomasse racinaire. Cette estimation peut être améliorée par la prise en compte d'autres facteurs qui pourraient influencer la biomasse racinaire, entre autres : l'âge du peuplement et la latitude pour des mesures à large échelle.

Toutefois, au cours de cette étude, il a aussi été observé que la production de biomasse aérienne est corrélée positivement avec l'âge des rejets ($p = 0.0001$) et les dimensions de ces rejets (moyenne des CHP par souche, $p = 0.003$). La biomasse racinaire est fortement corrélée avec la variable correspondant à l'interaction entre la circonférence moyenne des souches et leur densité ($p < 0.0001$). Aucune relation significative n'a été décelée entre la biomasse racinaire et la durée de plantation d'une part et entre la biomasse racinaire et biomasse aérienne d'autre part.

Les équations qui ont été développées dans le cadre de cette étude présentent des structures simples et fiables qui peuvent donc être reproductible dans d'autres peuplements de taillis d'eucalyptus dans tout Madagascar. Ces résultats sont d'autant plus intéressants de plus que dans cet écosystème, on a observé l'importante contribution de la biomasse racinaire dans la constitution du stock de C de la végétation : 77 % des 51 à 65 $\text{Mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$ mesurés.

5.1.2. Mesures des stocks de C dans le compartiment sol de l'eucalyptus

Les stocks de C des sols sont plus communément évalués pour une profondeur fixe, donc pour un volume de sol fixe ; sur 0-30 cm dans le cadre des inventaires des GES recommandés par l'IPCC (IPCC, 2006). Cependant, en raison de la différence de mode d'usage des terres (culture/jachère, pseudo-steppe et taillis d'eucalyptus), des effets de compaction du sol peuvent se produire. Les densités apparentes qui ont été calculées sur les deux sites d'étude variaient de : 1.04 à 1.48 g.cm⁻³ et 1.12 à 1.49 sous eucalyptus et culture/jachère respectivement, contre 1.16 à 1.56 g.cm⁻³ sous système originel (chapitre 1). Ainsi, afin de pouvoir les comparer et mettre en évidence l'effet des plantations d'eucalyptus sur les stocks de C du sol, les mesures sur la profondeur 0-30 cm ont été ramenées à une masse équivalente de sol (Ellert *et al.*, 2002 ; Maquere *et al.*, 2008).

Pour les déterminations des teneurs en C du sol, en comparaison avec les la spectroscopie dans le moyen infrarouge (Mid Infrared Reflectance spectroscopy ou MIRS: 400 - 4.000 cm⁻¹ de longueur d'onde correspondant à 2.500 - 25.000 nm de fréquence) est reportée comme une méthode physique rapide, non destructive, reproductible et à faible coût pour fournir des prédictions précises des propriétés du sol, dont le C total (Janik and Skjemstad 1995; Merry and Janik, 2001; Reeves *et al.*, 2002; Couëtaux et al., 2003; Janik *et al.*, 2007b; Artz *et al.*, 2008; Bertrand *et al.*, 2002; Mimmo *et al.*, 2002; Sørensen and Dalsgaard, 2005). Ceci a été confirmé dans cette thèse car le MIRS permettait une bonne prédiction des teneurs en C du sol avec un R² ≈ 0.9 entre les valeurs de référence (déterminées par les analyses chimiques) et les valeurs prédites pour les deux sites d'étude.

Après avoir combiné le MIRS avec des techniques chimiométriques multivariées dont, la régression du moindre carré partiel (PLS ou Partial Least-Square regression (Mimmo *et al.*, 2002)). De bons résultats ont été effectivement obtenus (chapitre 2) sur la prédiction de ces teneurs en C du sol : R² ≈ 0.9 entre les valeurs de référence (déterminées par les analyses chimiques) et les valeurs prédites pour les deux sites d'étude.

5.1.3. Potentialités de stockage de C des plantations d'eucalyptus

Les résultats sur les comparaisons des stocks de C des différents compartiments entre les modes d'usage étudiés (chapitre 3) ont montré les capacités des plantations d'eucalyptus à accumuler du C.

Au total, ces plantations (tous âges confondus) présentent des stocks de $150.8 \pm 25.3 \text{ Mg C. ha}^{-1}$, une quantité significativement élevée en comparaison avec les stocks présents dans les parcelles sous pseudo-steppe ou culture/jachère qui sont respectivement de 112 ± 15 et $72.3 \pm 9.9 \text{ Mg C. ha}^{-1}$. Cette différence est surtout due par le fait que les plantations d'eucalyptus renferment à la fois une quantité importante de C dans le matériel végétal (44% par rapport au total) et dans le sol (56%)

Des différences significatives de stocks de C (ΔC_1 et ΔC_2) dans les compartiments végétaux (aérien, racinaire, litière) sont observées entre les plantations d'eucalyptus et les autres modes de gestion (culture/jachère et pseudo-steppe) (Figure 5.1). Ces différences sont de l'ordre de 75 Mg C. ha^{-1} . Elles s'expliquent par le fait que les plantations d'eucalyptus qui présentent déjà une biomasse aérienne élevée ($16,4 \pm 7,5 \text{ Mg C.ha}^{-1}$ vs moins de 3 Mg C.ha^{-1} pour les autres modes d'usage) présentent également des stocks importants dans les compartiments de la litière et de la racine qui sont des compartiments négligeables, voire inexistantes dans les autres modes d'usage. Les stocks de C des couches Ol (litière de l'année) et Of + Oh (couche humifiée) de la litière sont de $5,3$ et $16,2 \text{ Mg C.ha}^{-1}$ respectivement et ceux du système racinaire sont de $41,6 \pm 11,4 \text{ Mg C.ha}^{-1}$.

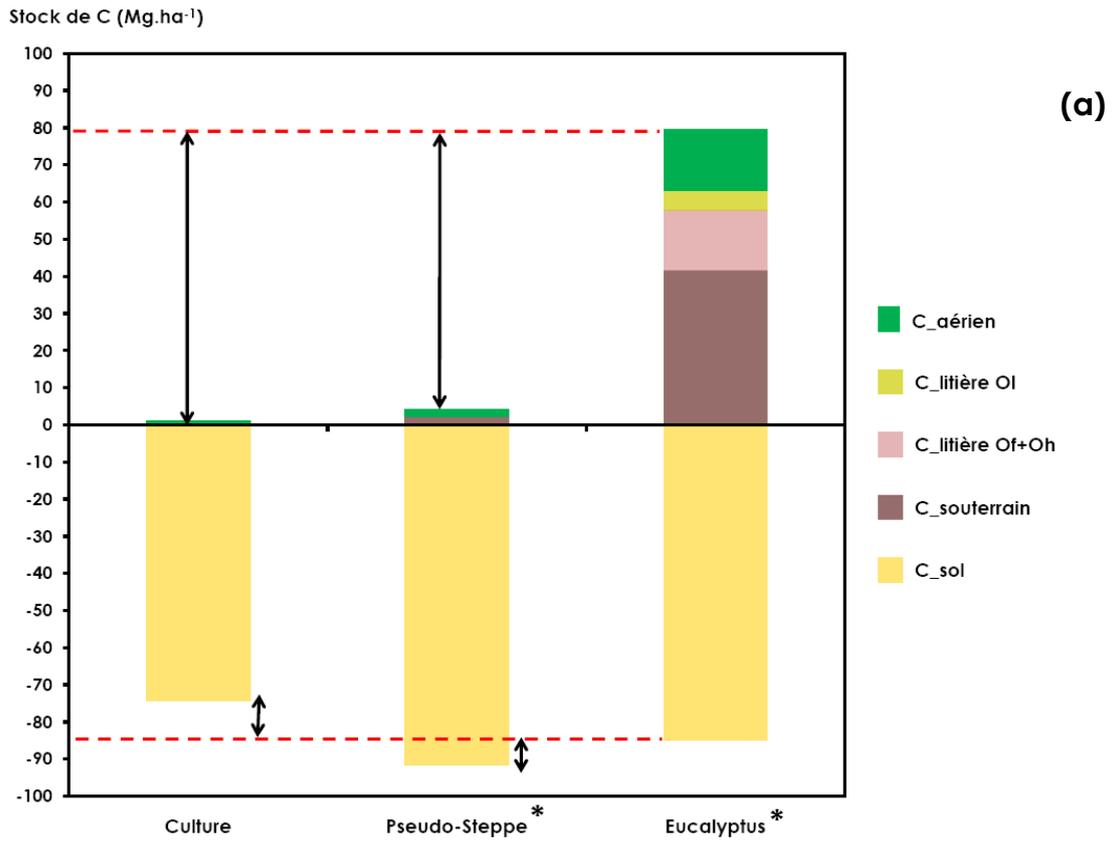


Figure 5-1. Comparaison des stocks de C des différents compartiments entre les trois modes d'usage des terres

ΔC (Mg.ha⁻¹)

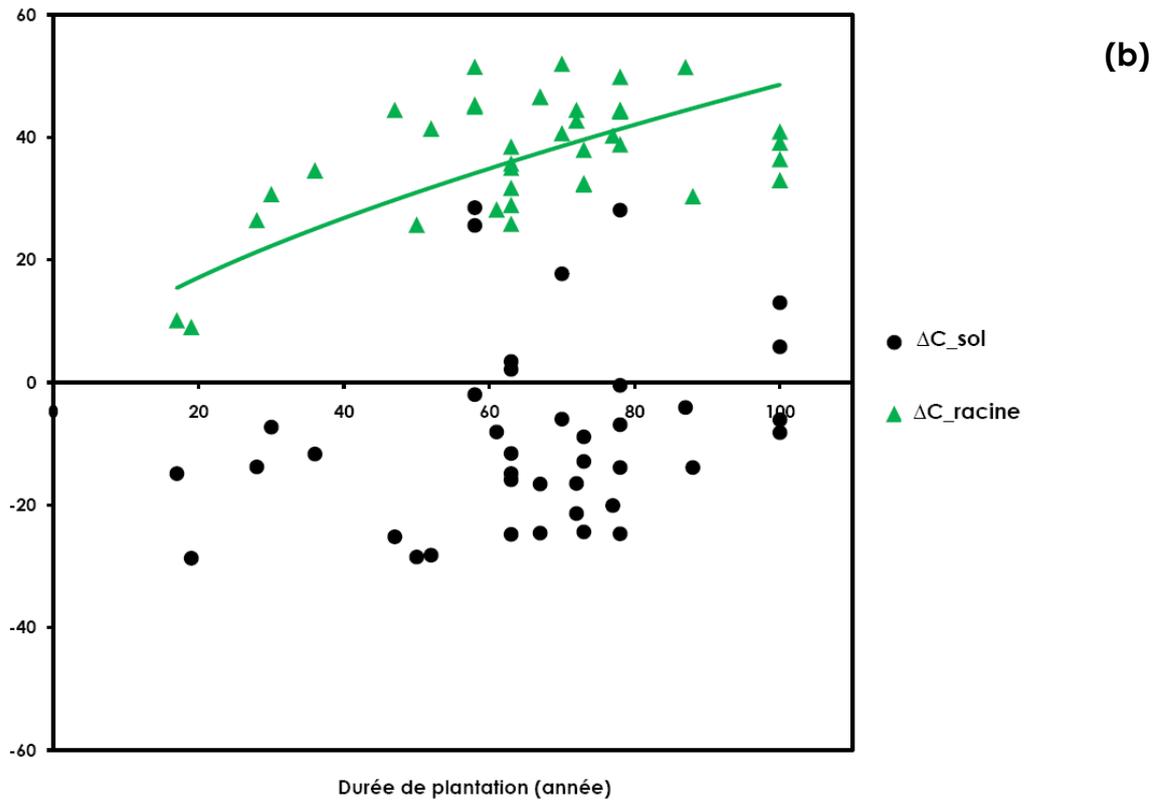


Figure 5.2 Evolution des stocks de C des compartiments séquestrants (racine, sol) sous plantation d'eucalyptus en comparaison avec le système original (pseudo-steppe).

Pour un peuplement géré en taillis, le compartiment racinaire constitue le seul compartiment qui reste après chaque rotation ; il représente à lui seul 66 % du stock de C végétal. Pour le compartiment sol, les parcelles sous culture/jachère présentent des stocks significativement faibles de $74,2 \pm 15,6 \text{ Mg C.ha}^{-1}$ (ΔC_4 significatif) par rapport aux autres modes d'usage : $84,8 \pm 23 \text{ Mg C.ha}^{-1}$ et $91,7 \pm 18 \text{ Mg C.ha}^{-1}$ respectivement pour les eucalyptus et la pseudo-steppe (ΔC_3 non significatif). Ces résultats sont cohérents avec la littérature qui rapporte souvent des variations de C suite à un changement de mode d'usage (Turner and Lambert, 1999; Post *et al.*, 2001; Houghton and Goodale, 2004; Jandl *et al.*, 2007).

Pour la chronoséquence de plantation d'eucalyptus, le compartiment aérien ne constitue pas un « compartiment séquestrant » ; il n'est donc pas considéré dans l'analyse de l'évolution des stocks de C avec la durée de plantation. En fait, la partie aérienne des eucalyptus absorbe du CO_2 en croissant et libère la même quantité de C dans l'atmosphère à chaque fin de rotation (car exportée et consommée en tant que bois d'énergie et charbon de bois) ; il présente donc un bilan neutre de C (Mathews, 2008). Les calculs des différences de stocks de C (ΔC) entre les compartiments racinaire et sol des plantations d'eucalyptus et leur système originel (pseudo-steppe) ont montré que (Figure 5.2) :

Il existe une relation entre l'accroissement du stock de C des racines et la durée de plantation ($R^2 = 0.52$, $p = 0.001$) ; un accroissement qui correspond à un gain net de C pour le compartiment de la biomasse racinaire ;

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 ($p = 0.107$). 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 ($\Delta C < 0$).

Selon les données disponibles, l'étude isotopique des C du sol a aussi montré que les différences significatives des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ entre eucalyptus et pseudo-steppe sur les 20 premiers cm du sol. Elles sont de $-24,2$ à $-21,1$ ‰ sous eucalyptus (tous âges confondus) contrairement à $-18,5$ à $-17,6$ ‰ sous pseudo-steppe sur les horizons 0-10 et 10-20 cm respectivement. En conséquence, les quantités de C dérivé de l'eucalyptus prédominent sur cet horizon : 58,3 % du C du sol sur 0-10 cm et 30,5% du C sur 10-20 cm sont les « nouveaux » C apportés par l'eucalyptus.

Ces résultats démontrent la capacité des peuplements d'eucalyptus à accumuler du C comme dans d'autres plantations forestières (Lescuyer et Locatelli, 1999 ; Paul *et al.*, 2002 ; Guo *et*

Gifford, 2002 ; Robert et Saugier, 2003; Lal, 2005). Elles arrivent assez rapidement à constituer un stock important dans leur biomasse végétale; par contre, l'évolution du C du sol reste moins évidente. En l'absence de la différence significative des stocks de C du sol entre les deux systèmes, l'étude isotopique indique qu'il y a remplacement progressif du C du sol ; le C nouvellement stocké par les eucalyptus pourrait être le même que le C ancien sous pseudo-steppe qui a été perdu après la mise en place de ces plantations (Trouvé, 1992; Bashkin & Binkley, 1998; Bernoux *et al.*, 1998; Binkley & Resh, 1999; Lima *et al.*, 2006).

5.1.4. Modélisation et spatialisation des stocks de C des plantations d'eucalyptus

L'analyse des déterminants des stocks de C dans les différents compartiments des peuplements en eucalyptus ont révélé que (chapitre 4) la durée de plantation seule n'arrive pas à expliquer l'évolution des stocks de C du sol, des racines et encore moins de la biomasse aérienne (selon ce qui est dit dans le paragraphe ci-dessus).

Les détails des analyses en composantes principales (ACP) (Annexe 5-1) présentent cette absence de corrélation. Toutefois, les principales conclusions de ces ACP sont telles que : (i) le C du sol est positivement corrélé avec l'altitude ($R = 0.56$) et la pente sur le terrain ($R = 0.72$); (ii) le C de la biomasse racinaire présente des corrélations avec la circonférence moyenne des souches (Cir, $R = 0.48$), l'interaction entre la Cir et la densité des souches à l'hectare (NhaCir, $R = 0.49$) et l'altitude ($R = 0.4$); (iii) le C de la biomasse aérienne et le CHP des rejets ($R = 0.53$), l'âge des rejets ($R = 0.65$), la densité des rejets à l'hectare ($R = -0.6$) et la pente du terrain ($R = 0.48$).

A noter que des mesures spécifiques sur certaines parcelles effectuées dans le cadre d'une étude de la variabilité des stocks de C sous l'effet du modelé et de la position topographique (Rakotonarivo, 2009) ont confirmées ces résultats (détails en Annexe 5-2). En effet, ces dernières mesures ont montré que les reliefs résiduels (en altitude) ont des stocks de C significativement élevés dans leur sol que ceux des basses collines ; l'effet de l'altitude qui favorise l'accumulation de la matière organique dans le sol pourrait être une explication à cette différence (Schwartz and Namri, 2002; Ymer *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2008). Probablement, en raison de la courte longueur des versants des basses collines (rarement > 500 m), seul le compartiment aérien des peuplements sur relief a été affecté par la position topographique avec un plus grand stock en bas de versant.

L'identification des déterminants du stock de C par compartiment a par la suite servi à l'élaboration de modèles en vue de sa prédiction. Parmi les trois méthodes de régression testées (linéaire simple, linéaire multiple, boosting d'arbres de régression), pour tout compartiment, la version améliorée d'arbres de classification et de régression CART (classification and regression tree) a donné les meilleurs résultats de prédiction. Cette méthode est reconnue être plus robuste et a plusieurs avantages par rapport aux régressions classiques, tels que : la considération des variables qualitatives, l'indifférence par rapport aux données manquantes, ... (McBratney *et al.*, 2003; Krishnan *et al.*, 2007). Les modèles retenus pour chaque compartiment sont donc issus de la considération d'un set de facteurs. Par ordre croissant d'importance des facteurs dans chaque set, ces modèles s'expriment comme : (i) f (pente, CHP, âge des rejets, densité des rejets) pour le C aérien ; (ii) g (NhaCir interaction entre Cir et densité des souches, altitude, âge des souches) pour le C racinaire et (iii) h (altitude, pente et âge des souches) pour le C du sol.

La dernière étape a été l'établissement des cartes des stocks de C dans les différents compartiments des plantations d'eucalyptus à Sambaina à une échelle de 1 : 25.000; une spatialisation qui a été effectuée en appliquant les modèles retenus pour chaque compartiment sur des données géoréférencées disponibles (chapitre 5). Rappelons que ces données sont présentées sous forme raster (pixels) et sont issues des travaux de photo-interprétations, de traitement d'images satellites, d'enquêtes et de prospections et prélèvements sur terrain (chapitre 1). Les stocks prédits par pixel varient de : 9 à 27 Mg C ha⁻¹ pour la biomasse aérienne, 22 à 47 Mg C ha⁻¹ pour la biomasse racinaire, 61 à 183 Mg C ha⁻¹ dans le sol et un total de 104 à 183 Mg C ha⁻¹ tout dans tous les compartiments. Rapportés à l'entière superficie des plantations d'eucalyptus de la Commune de Sambaina, ces stocks correspondent respectivement à 32,25 ± 13,28 Gg C dans le compartiment aérien, 66,63 ± 14,72 Gg C dans le compartiment racinaire et 139,36 ± 35,88 Gg C le sol ; ce qui a contribué à un stock total de 238,26 ± 40,5 Gg C (1Gg = 10³ Mg = 10⁹ g). Les variabilités exprimées avec ces valeurs de stocks ont été élevées pour le compartiment aérien (coefficient de variation CV = 41,15% ; $n = 29$) et vont en diminuant jusqu'au C total (CV de 22 à 17 % ; $n = 41$ pour le racinaire et 29 pour le C total). Certes, ces mesures à une échelle locale constituent une étude pionnière mais les variabilités peuvent être réduites en améliorant le paramétrage des modèles utilisés (augmentation de n) et aussi la qualité et précision des données spatiales utilisées (plus d'intégration de la télédétection proprement dite) (Krishnan *et al.*, 2007 ; Zheng *et al.*, 2007 ; Goetz *et al.*, 2009).

5.1.5. Comptabilisation du CO₂ des plantations d'eucalyptus

5.1.5.1. Evitement d'émission de CO₂ par les plantations d'eucalyptus de la CR de Sambaina

Les études sur la bioénergie connaissent leur essor dans le contexte du réchauffement climatique où plusieurs débats surgissent sur l'utilisation du C fossile (Jong *et al.*, 2007 ; Rowe *et al.*, 2009 ; Solino *et al.*, 2009). En effet, les plantations forestières peuvent avoir une fonction puits de C en séquestrant le C accumulé et en même temps, constituer une substitution d'énergie fossile. Dans cette étude, nous avons donc essayé d'analyser ce côté de substitution en consommation en gaz (butane) des plantations d'eucalyptus de la CR de Sambaina.

D'après le **tableau 5.1**, si on considère tous les compartiments, ces plantations qui recouvrent plus de la moitié de la superficie de la CR correspondent à un total de 154,47 Gg de CO₂ (avec comme hypothèse une consommation en bois) ou de 40,79 Gg de CO₂ (avec comme hypothèse une consommation en charbon de bois). Cependant, comme le compartiment aérien est exporté à chaque rotation (tous les 5 ans), il constitue donc du « carbone neutre » et permet de retenir 20,91 Gg de CO₂ (à base de bois) ou 5,52 Gg de CO₂ (à base de charbon de bois) (Perttu, 1998 ; Mathews, 2008). Les compartiments racinaire et matière organique du sol avec leur 43,2 et 90,35 Gg de CO₂ (de bois = 11,41 et 23,86 Gg de CO₂ charbon de bois) séquestre du C et donc, favorise l'évitement d'émission de ce C si utilisation de gaz de butane. Ces mesures mettent en exergue l'intérêt des plantations forestières de courte durée en termes de production de bioénergie et aussi leur potentiel de réduire l'utilisation de l'énergie fossile comme il a été trouvé dans d'autres pays (Perttu, 1998 ; Cowie, 2006 ; Paul *et al.*, 2006 ; Jong *et al.*, 2007).

Tableau 5.1 Calculs pour l'analyse de l'évitement de CO₂ dans la CR de Sambaina.

N°	Paramètres	Formule	Valeur	Références
1	Pouvoir calorifique bois eucalyptus (kJ/kg)	–	18 811.26	Rambeloarisoa, 1983 CIRAD-FOFIFA, 1994
2	Pouvoir calorifique gaz butane (kJ/kg)	–	45 600	http://www.ademe.fr
3	Pouvoir calorifique charbon eucalyptus (kJ/kg)	–	31 046	CIRAD-FOFIFA, 1994
4	Quantité eucalyptus en équivalent gaz	= 2 / 1	2.42	
5	Quantité charbon équivalent gaz	= 2 / 3	1.47	
6	Nombre de kg de bois nécessaire pour faire 1 kg de charbon	–	6.25	FAO, 1991 FAO, 1994 CIRAD-FOFIFA 1994
7	Quantité bois pour du charbon équivalent gaz	= 7 / 5	9.18	
8	Equivalent carbone du bois (kgC/kgbois)		0.50	
9	Equivalent carbone du butane (kgC/kggaz)		0.21	
10	Equivalent Cbois pour produire autant d'énergie qu'avec du gaz (bois de feu)	= (4 * 8) / 9	5.66	
11	Equivalent Cbois pour produire autant d'énergiequ'avec du gaz (charbon)	= (7 * 8) / 9	21.42	
12	Stock de C dans le compartiment aérien des eucalyptus (Gg)	–	32.25	
13	Stock de C dans le compartiment racinaire des eucalyptus (Gg)	–	66.63	
14	Stock de C dans le compartiment du sol des eucalyptus (Gg)	–	139.36	
	Quantité de C économisée avec bois de feu (Gg C)			
15	- dans la biomasse aérienne	= 12 / 10	5.70	
16	- dans la biomasse souterraine	= 13 / 10	11.78	
17	- dans le sol	= 14 / 10	24.64	
	Quantité de C économisée ac charbon (Gg C)			
18	- dans la biomasse aérienne	= 12 / 11	1.51	
19	- dans la biomasse souterraine	= 13 / 11	3.11	
20	- dans le sol	= 14 / 11	6.51	
21	Rapport C / CO ₂		0.27	IPCC
	Quantité de CO ₂ économisée avec bois de feu (Gg CO ₂)			
22	- dans la biomasse aérienne	= 15 / 21	20.91	
23	- dans la biomasse souterraine	= 16 / 21	43.20	
24	- dans le sol	= 17 / 21	90.35	
	Quantité de C économisée ac charbon (Gg CO ₂)			
25	- dans la biomasse aérienne	= 18 / 21	5.52	
26	- dans la biomasse souterraine	= 19 / 21	11.41	
27	- dans le sol	= 20 / 21	23.86	

5.1.5.2. Simulation sur la prédiction de séquestration de C des eucalyptus dans la CR de Sadabe

Les résultats issus des investigations du stockage de C de Sambaina (chapitres 2, 3 et 4) ont été appliqués à Sadabe en vue d'une simulation de la capacité de séquestration de C de nouvelles plantations qui seront mis en place. Dans cette simulation, le projet de plantation d'eucalyptus couvre 1.200 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 (figure 5.3a et tableau 5.2). Les choix des parcelles sont basés sur un certain nombre de critères : accessibilité et proximité entre elles (disponibilité des pistes en vue de la réduction des coûts de transport et d'entretien), proximité d'un chef lieu de village (facilitation de la tenue des pépinières et divers transports) et l'emplacement sur les crêtes (pratique locale et non concurrence avec l'agriculture).

Les démarches méthodologiques qui ont été adoptées pour la modélisation et la spatialisation des stocks de C de Sambaina ont été reprises et un bilan de C (eucalyptus vs le scénario de référence qui est la savane herbeuse) durant la période de simulation du projet a été effectué. Les différents calculs dans ce paragraphe ont été effectués à des pas de temps de 5 ans, toujours en relation avec la fin de rotation (base de comptabilisation du C de la biomasse aérienne).

Tableau 5.2 Caractéristiques des parcelles ayant servis à la simulation de prédiction de stock de C (aérien, racinaire, sol) dans la CR de Sadabe.

	Surface (ha)	Altitude (m)			Pente (%)			C additionnel fin projet (Gg)
		Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	
P1	228.8	1325	1357	1401	0.56	9.07	21.23	116.03
P2	233.2	1331	1375	1423	0.64	10.90	22.25	99.72
P3	236.6	1335	1369	1434	1.08	10.27	23.01	101.54
P4	263.3	1313	1362	1458	0.90	12.50	34.12	114.02
P5	271.2	1285	1328	1372	0.95	11.74	27.90	116.65

1 Gg = 10³ Mg = 10⁹ g

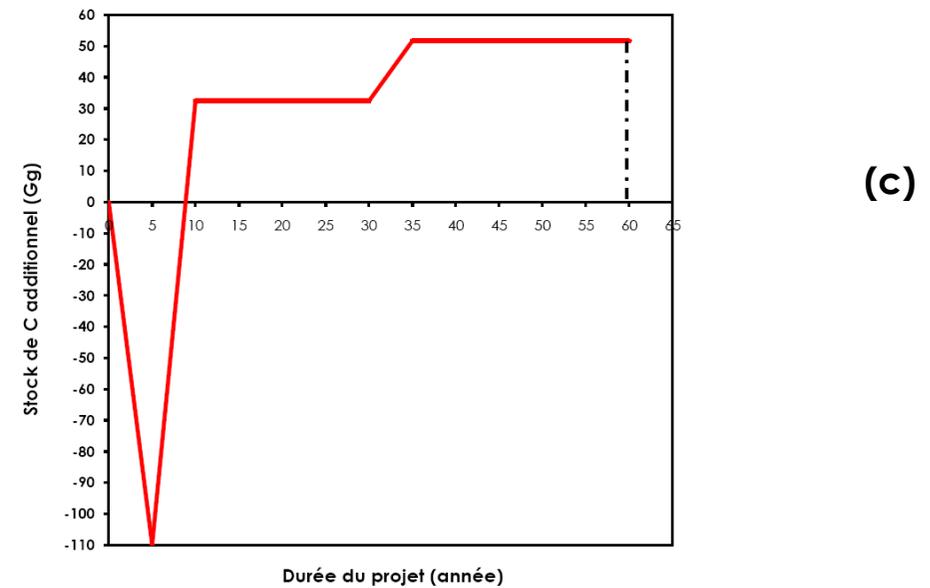
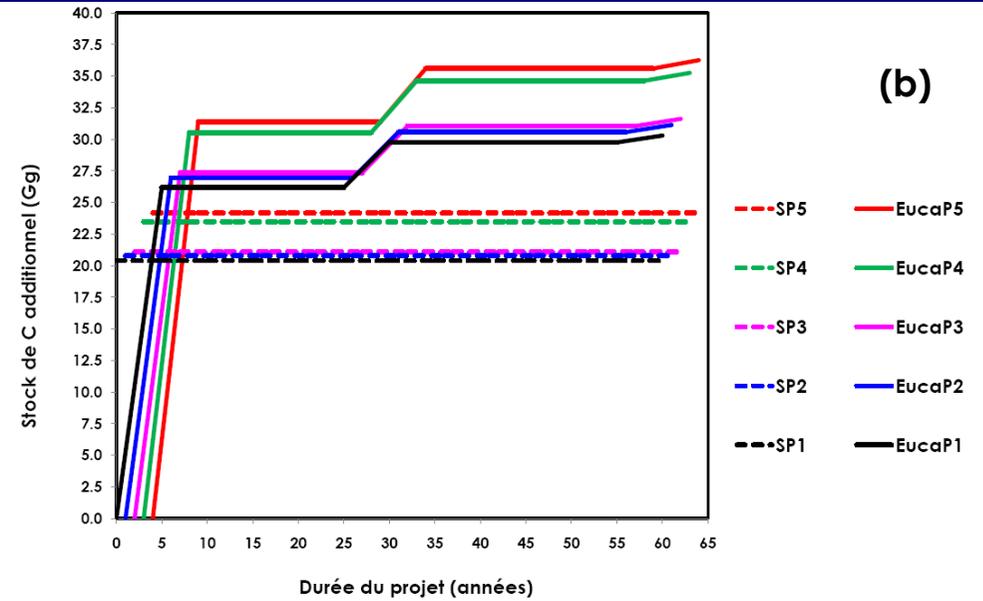
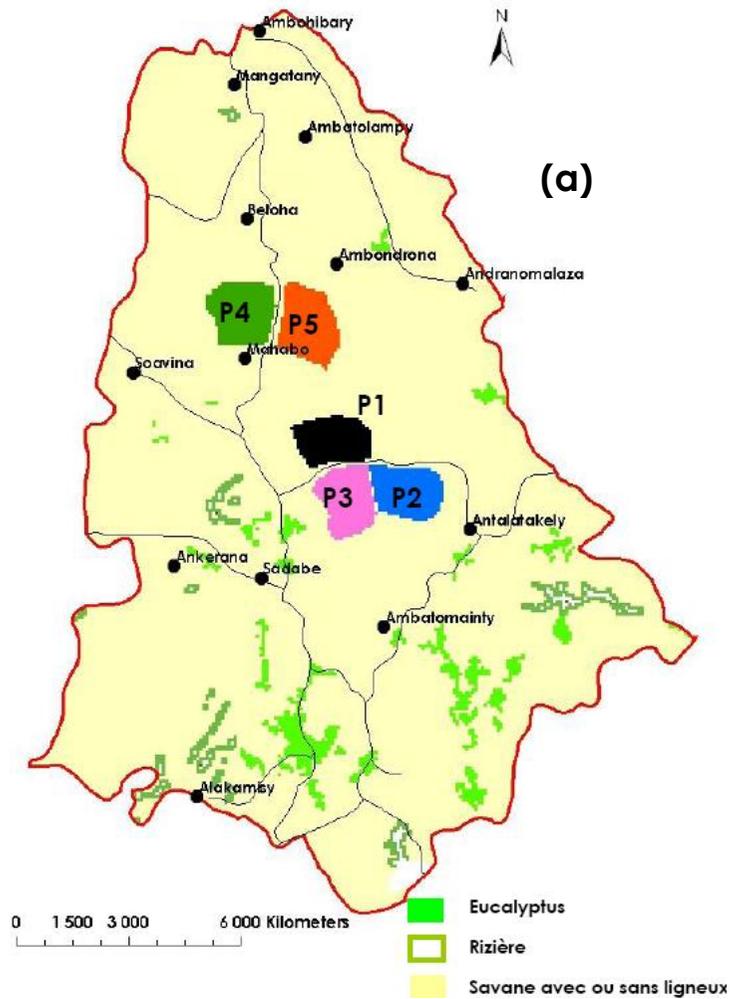


Figure 5.3: Résultats des simulations de prédiction de stocks de C dans la CR de Sadabe : (a) Occupation du u sol à Sadabe et emplacement des parcelles de simulation ; (b) Evolution des stocks de C total (aérien, souterrain, sol) avec la durée du projet/simulation ; (c) Bilan C durant le projet et considérant toutes les parcelles

Tous compartiments (aérien, racinaire, sol) considérés et en tenant compte la superficie totale de chaque parcelle (figure 5.3b), les valeurs des stocks de C pour chaque scénario de référence (savane herbeuse) sont de 20,4 à moins de 24,2 Gg C. Pour les plantations d'eucalyptus, un accroissement de stocks est observé dès la première rotation grâce aux compartiments aérien et racinaire (environ 13 et 26% du stock total). En considérant le projet dans son ensemble (toutes les parcelles sur toute la durée du projet ; figure 5.3c), une diminution initiale des stocks de C jusqu'à -110 Gg C est observée durant les 10 premières années. Un accroissement des quantités de C accumulées dans les différents compartiments s'affiche par la suite jusqu'à 52 Gg C an⁻¹ au terme du projet (sur les 5 parcelles). Malgré la diminution initiale, les stocks de C additionnel via ces nouvelles plantations peuvent donc 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-BioCarbon Fund à Madagascar (3 \$ la tonne de CO₂), le projet à Sadabe générerait 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).

5.2. LIMITES ET PRESPECTIVES

De nombreuses limites ont été identifiées et peuvent concerner aussi bien les aspects méthodologiques que les résultats trouvés. Ces limites méritent d'être surmontées, ce qui nous a amené à avancer des perspectives relatives à l'approfondissement de la présente thèse.

5.2.1. Limites d'étude

5.2.1.1. Les activités préalables et investigations sur terrain

Les activités préalables regroupent tous les travaux de photo-interprétation, d'élaboration d'esquisses morpho-pédologique et de choix des sous différents modes d'usage et aussi en vue de la constitution de la chronoséquence :

- l'interprétation des photos de 1949 a été difficile à cause de son échelle (1 : 40 000) et du mauvais contraste ; l'identification des parcelles sous eucalyptus ont donc été un peu hasardeux et leur confrontation avec les observations sur terrain génère souvent des doutes ;
- les parcelles déterminées pour la chronoséquence ont fait l'objet de grandes discussions avec la population locale (enquêtes pour la reconstitution des historiques des parcelles), les institutions de recherches (CIRAD-FOFIFA Forêts) ayant travaillé dans la CR et l'équipe au laboratoire d'accueil à Madagascar. Malgré l'effort déployé pour bien définir cette chronoséquence, les incertitudes ont parfois eu lieu notamment lors des analyses des résultats issus des différentes mesures sur terrain ;
- la non disponibilité de parcelles sous autres modes d'usage des terres et adjacentes à celles sous eucalyptus a amené des contraintes quant à l'interprétation des comparaisons entre les différents modes d'usages et à l'analyse de l'effet de la plantation d'eucalyptus au cours de la durée de plantation. La non existence de « jeunes parcelles » dans la CR de Sambaina s'ajoute à ces contraintes ;
- l'adoption de l'approche synchronique dans le cadre de l'étude du stockage de C peut induire des biais, notamment dans les mesures du sol comme il est mentionné dans d'autres études. Rappelons que dans cette approche, les stocks de C sous système originel (supposé être la pseudo-steppe) et sous système « séquestrant » en eucalyptus sont comparés un même instant t (année 2006 pour notre étude). Sachant que, effectuer des mesures sur des parcelles permanentes d'eucalyptus ou disposer d'une chronoséquence « parfaite » sont impossibles, le fait de considérer toute différence de stocks mesurés faisant suite à l'effet de l'eucalyptus s'avère limité ;
- l'acquisition des données spatiales sur la CR de Sadabe n'a pas pu être menée comme celle de la CR de Sambaina en raison de non disponibilité de ces données et de leurs coûts élevés pour avoir quelques unes (scènes d'images satellite SPOT recouvrant toute la superficie de la CR de Sadabe).

Pour les investigations sur terrain, elles concernent les mesures dendrométriques et destructives de la biomasse des eucalyptus, les prélèvements de sol dans toutes les parcelles étudiées (aussi bien pour les mesures de stocks de C que pour les travaux de cartographie morphopédologique) et les sondages et descriptions de fosses pédologique :

- lors des descentes sur terrain, les mesures dendrométriques de la biomasse aérienne sur toutes les parcelles de la chronoséquence n'ont pas été jugé utiles en raison du surplus de temps que cela exige (vu le nombre important des rejets par parcelle) mais surtout en pensant pouvoir appliquer seulement les équations allométriques qui seront développées après. Cependant, ceci a conduit à la

diminution des nombres de parcelles avec des valeurs de C totales (tous compartiments mesurés) lors de l'étape de modélisation ;

- malgré l'utilisation de matériels avancés (tronçonneuse pour la biomasse et carottier avec moteur pour le sol) par rapports aux matériels classiques (hache ou scie, cylindre métallique), il se peut que le nombre de parcelles considéré dans cette étude reste assez modeste. Dans tous les cas, une augmentation de ce nombre ne pourrait qu'apporter plus de précisions dans les mesures déjà effectuées ;

5.2.1.2. Analyse au laboratoire

Les limites rencontrées dans ce paragraphe concernent surtout sur l'insuffisance de précisions apportées lors des différentes étapes d'analyses :

- sachant que le prélèvement de toutes les souches entières n'a pas pu être effectué lors des mesures destructives, la détermination de son humidité a fait l'objet d'une extrapolation des valeurs issues d'un nombre assez limité d'échantillons,
- pour la détermination des teneurs en C, du fait de la grande variabilité des sols, leur teneur en C ont été effectués précisément (combustion par voie sèche complétée par la spectrométrie en moyen infrarouge). En tenant en compte que cette teneur pourrait varier d'un compartiment à un autre (de 0.44 à 0.52), les teneurs en C des biomasses ont seulement été affectées au coefficient standard de 0.5 par rapport à la quantité de biomasse mesurée,
- Concernant l'étude isotopique, l'utilisation de valeurs moyenne suite à l'inexistence et la non détermination de la valeur de $\delta^{13}\text{C}$ pour le *Philippia sp.* pourrait induire des biais dans les différents calculs des pourcentages de C dérivé de chaque système (originel et séquestrant).

5.2.1.3. Sur les résultats

Dans ce paragraphe concerne surtout les résultats issus des différentes démarches méthodologiques de quantification du C de la biomasse et du sol, entre autres, les résultats de la modélisation, de la spatialisation et de la comptabilisation du C dans le cadre d'un projet futur :

- comme tous travaux de modélisation, la notion de variabilité et d'incertitude prend une place importante dans la considération de leur qualité. L'objectif serait donc de toujours arriver à les réduire, peut être en intégrant de nouvelles données ou affiner la démarche méthodologique afin d'améliorer ces modèles de prédiction ;

- les valeurs de stocks de C prédites sont issues de l'utilisation d'un certain nombre de couches spatiales de variables qui ne sont pas habituellement disponibles ; c'est le cas pour la densité des rejets à l'hectare, l'interaction entre la densité des souches et leur circonférence, ... Ces couches ont alors été extrapolées à partir de celles issues de la photo-interprétation et du traitement d'images satellite, ce qui peut induire d'autres sources d'incertitude ;
- lors des différentes comptabilisations de stocks de C sur l'évitement à Sambaina et la simulation projet MDP séquestration et évitement à Sadabe, certains aspects n'ont pas été considérés. En effet, les émissions lors de la carbonisation (production de charbon de bois) ainsi que les éventuelles émissions de gaz à effet de serre autres que CO₂ (CH₄ et N₂O) pourraient être pris en compte afin de mieux préciser ces comptabilisations.

5.2.2. Perspectives et pistes de recherche

Des perspectives en termes de compléments et d'amélioration de cette thèse feront suite aux diverses limites exposées dans les paragraphes auparavant. Il s'agirait essentiellement (i) d'améliorer le dispositif d'étude en complétant la chronoséquence de plantation d'eucalyptus et aussi en ayant plus des parcelles adjacentes eucalyptus – non eucalyptus (ii) d'affiner la démarche méthodologique pour les travaux de modélisation et de spatialisation afin de réduire autant que possible les variabilités des mesures de stocks (augmentation des prélèvements et approfondissement des analyses avec MIRS pour le sol ; nouveaux inventaires et combinaison avec la télédétection pour le végétal)

A ces améliorations s'ajouteront de nouveaux thèmes d'étude s'attachant aux valorisations des résultats issus de cette thèse, en l'occurrence, celles qui sont en relation avec les avancés des recherches dans le cadre (i) du stockage de C dans le secteur forestier à Madagascar (ii) de la modélisation et la spatialisation des stocks de C et (iii) de la production en bois énergie et les diverses valorisations qui peuvent en découler. Cependant, leur priorisation dépend des collaborations qui peuvent être développées et notamment, en fonction du parcours qui se dessinerait après cette thèse.

Pour le secteur forestier de Madagascar :

- des projets C ont été développés soit dans des forêts naturelles en vue d'une activité de réduction des émissions par la dégradation et el déforestation (REDD) ou d'augmentation des puits de C (MDP). Cependant, le sol qui est réputé constituer un réservoir important de C dans un écosystème forestier n'a pas été considéré (ou l'a été indirectement, pas de méthodologie et prélèvements précis), ceci en raison des coûts induits des campagnes sur terrain ainsi que les analyses chimiques.

La méthodologie développée lors de cette thèse pourrait donc contribuer à lever ce verrou, surtout, actuellement où le besoin national en définition de la ligne de référence C du sol dans le cadre de la REDD constitue un besoin à court terme. Une mobilisation du partenariat avec d'autres institutions financières, de recherche ou de développement pourrait être effectuée pour pouvoir mettre en place un programme/projet permettant de répondre à ce besoin. La calibration des modèles existants de dynamique du C du sol et de la végétation (*FullCAM*, *RothC*, etc.) à ce besoin national est aussi nécessaire.

- la simulation du projet de séquestration dans la zone de front d'afforestation à Sadabe devrait aller à sa concrétisation une fois les limites mentionnées dans les paragraphes auparavant seraient remédiées. Des apports de plus de précision et de fiabilité aux résultats de prédiction et de comptabilisation des stocks de C obtenus jusqu'ici seraient donc indispensables ;

Concernant les avancées des recherches sur la modélisation et la spatialisation :

- grâce à la présence de l'appareil spectroscopie en moyen infrarouge dans les localités du Laboratoire des Radioisotopes & IRD à Antananarivo (LRI-IRD), les cartes de C établies dans cette thèse peuvent être améliorées. Une publication des résultats issus de ces travaux spectroscopiques (en plus de ce qui ont été déjà effectués durant cette thèse) pour des fins de spatialisation les stocks de C du sol est alors envisagée ;
- en collaboration avec d'autres unités de recherche de l'IRD et de l'INRA qui interviennent à Madagascar, une extension de la problématique de la modélisation des stocks de C dans les taillis d'eucalyptus est envisagée. Pratiquement, cette activité débutera par une initialisation sur l'utilisation du « modèle ou chaîne de Markov » afin de produire une publication sur l'utilisation cette chaîne pour comprendre et prédire l'évolution spatio-temporelle des stocks de C dans les plantations d'eucalyptus de Madagascar. A noter que ce modèle est couramment utilisé par les collègues de l'INRA et de l'IRD à Fianarantsoa-Madagascar pour la modélisation des changements d'affectation des terres dans cette zone;
- en relation avec la prochaine mise en place d'une antenne de réseau de télédétection à l'Ile de La Réunion (prévu pour 2010), des images satellites seront disponibles et mises au service de la recherche. Un partenariat avec les organisations et ONG travaillant sur la télédétection dans le domaine du changement climatique et séquestration de C en foresterie ou en agriculture serait un atout pour pouvoir affiner la méthodologie de mesure du C dans tous les compartiments. Une proposition de méthodologie combinant télédétection, spectrométrie, modélisation et spatialisation pourrait être proposée au niveau international (secrétariat exécutif) ;

- concernant le processus du stockage de C dans le sol, des activités sur la détermination de la nature et de la localisation de ce C avec l'équipe du LRI-IRD serait aussi envisagé.

Enfin, pour tout ce qui concerne la valorisation de ces taillis d'eucalyptus, les pistes de recherches sont les suivantes :

- des investigations sur le fonctionnement et le comportement du système racinaire de ces taillis âgés (mais aussi sur les jeunes) suite aux traumatismes de la fréquente rotation et au non renouvellement des souches devraient être effectuées (utilisation de rhizothron). Elles peuvent être effectuées en collaboration avec les collègues du CIRAD et de l'INRA qui travaillent dans d'autres pays sur l'architecture des la plante (pérenne ou annuelle). La considération des études des racines fines y devrait être associée afin de comprendre et d'assurer la pérennité d'un tel écosystème où il n'y a pas d'apport de fertilisation ;
- développement de la recherche et de l'adoption du « biochar » qui est un concept en essor dans beaucoup de pays ; il s'agit de recycler une partie de la biomasse sous forme de charbon qui sera enfoui dans le sol où l'on espère qu'il restera en permanence et pourrait améliorer ainsi la fertilité du sol.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Albrecht, A., Cadisch, G., Blanchart, E., Sitompul, S.M., Vanlauwe, B., 2002. Below- and aboveground organic inputs, soil C storage and soil structure improvements and consequences for agroecosystems functions. In: Van Noordwijk M., C.G., Ong C. (Ed.), *Be*
- Antonio, N., Tomé, M., Tomé, J., Soares, P., Fontes, L., 2007. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. *Canadian Journal of Forest Research* 37, 895-906.
- Artz, R.R.E., Chapman, S.J., Robertson, A.H.J., Potts, J.M., Laggoun-De´farge, F., Gogo, S.b., Comont, L., Disnar, J.-R., Francez, A.-J., 2008. FTIR spectroscopy can be used as a screening tool for organic matter quality in regenerating cutover peatlands.
- Balesdent, J., 1991. Estimation du renouvellement du carbone des sols par mesure isotopique ^{13}C : Précision, risque de biais. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 26, 315-326.
- Batjes, N.H., 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47, 151-163.
- Bernoux, M., Carvalho, M.C.S., Volkoff, B., Cerri, C.C., 2002. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Sciences and Society of American Journal* 66, 888 - 896.
- Bernoux, M., Cerri, C.C., Neill, C., De Moraes, J.F.L., 1998. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. *Geoderma* 82, 43-58.
- Bernoux, M., Feller, C., Cerri, C., Eschenbrenner, V., Cerri, E.P., 2004. Sequestration du carbone dans le sol. In: E.J. Roose, G.D.N.N.G., Prat Christian, Francis Ganry, Gérard Bourgeon (Ed.), *Gestion de la biomasse, Erosion et séquestration du carbone*,
- Bertrand, A., 1999. La dynamique séculaire des plantations paysannes d'*Eucalyptus* sur les Hautes Terres malgaches. *Le Flamboyant* 49, 45-48.
- Bertrand, I., Janik, L.J., Holloway, R.E., Armstrong, R.D., McLaughlin, M.J., 2002. The rapid assessment of concentrations and solid phase associations of macro- and micronutrients in alkaline soils by mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy. *Australian Journal of Soil Research* 40, 1339 - 1356
- Bigot Y., Rakotondrasata M. F., Razafindrainibe R., 1992. L'installation d'un réseau d'observations par placette dans les plantations familiales d'*Eucalyptus robusta* de Sambaina. Rapport de mission CIRAD Forêt / FOFIFA DRD, p 47.
- Billet, N., 2005. Calibration et adaptation de MORGANE, modèle d'évolution des stocks de carbone organique des sols, pour des conditions tropicales. In, *Ecologie, Evolution, Biométrie*. Université Claude Bernard – Lyon I & INSA, Montpellier, France, p. 33.
- Blackard, J.A., Finco, M.V., Helmer, E.H., Holden, G.R., Hoppus, M.L., Jacobs, D.M., Lister, A.J., Moisen, G.G., Nelson, M.D., Riemann, R., Ruefenacht, B., Salajanu, D., Weyermann, D.L., Winterberger, K.C., Brandeis, T.J., Czaplewski, R.L., McRoberts, R.E
- Bouillet, J.-P., Laclau, J.-P., Arnaud, M., Thongo M'Bou, A., Saint-André, L., Jourdan, C., 2002. Changes with age in the spatial distribution of roots of *Eucalyptus* clone in Congo Impact on water and nutrient uptake. *Forest Ecology and Management* 171, 43-57.

- 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.
- Bourgeon, G., Salvador Blanes, S., Houillier, F., Harindranath, C.S., Shivaprasad, C.R., 1999. Cartographie du carbone organique des sols en Inde du Sud: Exemple du district de Shimoga au Karnataka. Bois et Forêts des Tropiques 262, 31-43.
- Breiman, L., 2001. Random Forests. Machine Learning 45, 5-32.
- Brown, S.L., Schroeder, P., Kern, J.S., 1999. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. Forest Ecology and Management 123, 81-90.
- Burrows, W.H., Henry, B.K., Back, P.V., Hoffmann, M.B., Tait, L.J., Anderson, E.R., Menke, N., Danaher, T., Carter, J.O., McKeon, G.M., 2002. Growth and carbon stock change in eucalypt woodlands northeast Ausatralia: ecological and greenhouse sink implic
- Cairns, M.A., Brown, S., Helmer, E.H., Baumgardner, G.A., 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. Oecologia 111, 1-11.
- Canadell, J.G., Kirschbaumb, M.U.F., Kurz, W.A., Sanz, M.-J., Schlamadinger, B., Yamagata, Y., 2007. Factoring out natural and indirect human effects on terrestrial carbon sources and sinks. Environmental Science&Policy 10, 3 7 0 – 3 8 4.
- Cao, M., Woodward, F.I., 1998. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. Nature 393, 249-252.
- Capoor, K., Ambrosi, P., 2008. State and Trends of the Carbon Market 2008. In. The World Bank, Washington D.C., p. 78.
- Carriere, S.M., Randriambanona, H., 2007. Biodiversité introduite et autochtone : antagonisme ou complémentarité ? Le cas de l'eucalyptus à Madagascar. Bois et Forêts des Tropiques 292, 5-21.
- CCNUCC, S., 1992. Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.
- Cerri, C.E.P., Easter, M., Paustian, K., Killian, K., Coleman, K., Bernoux, M., Falloon, P., Powlson, D.S., Batjes, N., Milne, E., Cerri, C.C., 2007. Simulating SOC changes in 11 land use change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and Cen
- Chang, C.W., Laird, D.A., 2002. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N. Soil Science 167, 110-116.
- Chang, C.-W., Laird, D.A., Mausbach, M.J., Hurburgh, C.R.J., 2001. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy–Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. Soil Science Society of America Journal 65, 480–490.
- Chen, Q., Shen, C., Sun, Y., Peng, S., Yi, W., Li, Z.a., Jiang, M., 2005. Spatial and temporal distribution of carbon isotopes in soil organic matter at the Dinghushan Biosphere Reserve, South China. Plant and Soil 273, 115–128.
- CIRAD&FOFIFA, 1990-1994. Rapport de campagne sur la convention FOFIFA-Projet DEF/GPF Volet "Taillis d'eucalyptus". Madagascar.
- CIRAD, 2006. Etude faisabilité pour la plantation et l'exploitation sécurisée d'essences forestières destinées à l'approvisionnement des utilisateurs de la ville de Tuléar. In. WWF-CIRAD, Madagascar, p. 92.

- Corbeels, M., McMurtrie, R.E., Pepper, D.A., Mendham, D.S., Grove, T.S., O'Connell, A.M.I., 2005. Long-term changes in productivity of eucalypt plantations under different harvest residue and nitrogen management practices: A modelling analysis. *Forest Ecol*
- Coûteaux, M.-M., Berg, B., Rovira, P., 2003. Near infrared reflectance spectroscopy for determination of organic matter fractions including microbial biomass in coniferous forest soils. *Soil Biology & Biochemistry* 35, 1587–1600.
- Cowie, A.L., Smith, P., Johnson, D., 2006. Does soil carbon loss in biomass production systems negate the greenhouse benefits of bioenergy? . *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11, 979–1002.
- Crow, P., Houston, T.J., 2004. The influence of soil and coppice cycle on the rooting habit of short rotation poplar and willow coppice *Biomass and Bioenergy* 26, 497 – 505.
- Dalal, R.C., Allen, D.E., Livesley, S.J., Richards, G., 2008. Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: a review. *Plant Soil* 309, 43–76.
- De'ath, G., 2007. Boosted trees for ecological modeling and prediction. *Ecology* 88, 243-251.
- Du Toit, B., Dovey, S.B., Fuller, G.M., Job, R.A., 2004. Effects of harvesting and site Management on Nutrient Pools and Stand Growth in a South African Eucalypt Plantation. In. E.K.S Nambiar, J Ranger, A. Tiarks and T. Toma CIFOR 2004, Congo, China.
- Du, C.w., Zhou, J., 2009. Evaluation of soil fertility using infrared spectroscopy: a review. *Environmental Chemical Letter* 7, 97-113.
- Du, C.w., Zhou, J., Wang, H., Chen, X., Zhu, A., Zhang, J., 2009. Determination of soil properties using Fourier transform mid-infrared photoacoustic spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy* 49, 32-37.
- Easter, M., Paustian, K., Killian, K., Williams, S., Feng, T., Al-Adamat, L., Batjes, N.H., Bernoux, M., Bhattacharyya, T., Cerri, C.C., Cerri, C.E.P., Coleman, K., Falloon, P., Feller, C., Gicheru, P., Kamoni, P., Milne, E., Pal, D.K., Powlson, D.S., Raw
- 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.
- Ellert, B.H., Janzen, H.H., Entz, T., 2002. Assessment of a method to measure temporal change in soil carbon storage. *Soil Science Society of America Journal* 66, 1687–1695.
- Eswaran, H., Van Den Berg, E., Reich, P., 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal* 57, 192-194.
- FAO, 1991. Plan d'action forestier tropical - Congo: Commercialisation et marché des produits forestiers <http://www.fao.org/docrep/X5657F/x5657f07.htm>.
- FAO, 1994. Gestion durable des ressources naturelles - Kit pédagogique - Volume III: Données de référence. <http://www.fao.org/docrep/X5643F/x5643f04.htm>.
- FAO, 2001. Soil carbon sequestration for improved land management. In, *World Soil Resources Reports*, Rome, p. 75.

- FAO, 2002. TERRASTAT, Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties. In: Land and water Development Division, Rome, Italy.
- FAO, 2006a. Évaluation des Ressources Forestières Mondiales 2005. Progrès vers la gestion forestière durable. In: FAO (Ed.), Rome, p. 351.
- FAO, 2006b. 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, 2006c. Global planted forests thematic study: results and analysis, by A. Del Lungo, J. Ball, J. Carle. In: Planted Forests and trees working paper Rome.
- FAO, 2007. Situation des Forêts du monde 2007. In, Rome, p. 157.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2008. Harmonized World Soil Database (version 1.0). In, FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria, p. 42.
- Fearnside, P.M., 2000. Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Climatic Change* 46, 115-158.
- Fearnside, P.M., 2001. Effects of land use and forest management on the carbon cycle in the Brazilian Amazon. In: Dore, M.H.I. (Ed.), *Climate Change and Forest Management in the Western Hemisphere*. Haworth Press, New York, pp. 79-97.
- Fest, B.J., Livesley, S.J., Drösier, M., Van Gorsele, E., Arndt, S.K., 2009. Soil-atmosphere greenhouse gas exchange in a cool, temperate Eucalyptus delegatensis forest in south-eastern Australia. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 393-406.
- Forrester, D.I., Bauhus, J., Cowie, A.L., 2006. Carbon allocation in a mixed-species plantation of Eucalyptus globulus and Acacia mearnsii. *Forest Ecology and Management* 233, 275–284.
- Friedman, J.H., 2001. Greedy function approximation: a gradient boosting machine *The Annals of Statistics* 29, 1189-1232.
- Giardina, C.P., Ryan, M.G., 2002. Total Belowground Carbon Allocation in a Fast-growing Eucalyptus Plantation estimated Using a Carbon Balance Approach. *Ecosystems* 5, 487–499.
- Gifford, M.R., Roderick, M.L., 2003. Soil carbon stocks and bulk density: spatial or cumulative mass coordinates as a basis of expression. *Gloal Change Biology* 9, 1507-1514.
- Goetz, S.J., Baccini, A., Laporte, N.T., Johns, T., Walker, W., Kellndorfer, J., Houghton, R.A., Sun, M., 2009. Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods. *Carbon Balance and Management* 4 doi:10.1186/1750-068
- Gomez, C., Viscarra Rossel, R.A., McBratney, A.B., 2008. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma* 146, 403–411.
- Gonçalves, J.L.d.M., Stape, J.L., Laclau, J.-P., Smethurst, P., Gava, J.L., 2004. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management* 193, 45–61.
- Gray, J.M., Humphreys, G.S., Deckers, J.A., 2009. Relationships in soil distribution as revealed by a global soil database. *Geoderma* 150, 309-323

- Grinand, C., Arrouays, D., Laroche, B., Martin, M.P., 2008. Extrapolating regional soil landscapes from an existing soil map: Sampling intensity, validation procedures, and integration of spatial context. *Geoderma* 143, 180–190.
- Grinand, C., Rajaonarivo, A., Bernoux, M., Pajot, V., Brossard, M., Razafimbelo, T.M., Albrecht, A., Le Marthret, H., 2009. Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols* 16, 23-33.
- Gueuneau, P., 1969. L'Eucalyptus robusta à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques* 124, 53-65.
- Guo, L.B., Gifford, M., 2002. Soil carbon stocks and land use: a meta analysis. *Global Change Biology* 8, 345-360.
- Guo, L.B., Sims, R.E.H., 1999. Litter decomposition and nutrient release via litter decomposition in New Zealand eucalypt short rotation forests. *Agricultural, Ecosystems & Environment* 75, 133-140.
- Guo, L.B., Sims, R.E.H., Horne, D.J., 2002. Biomass production and nutrient cycling in Eucalyptus short rotation energy forests in New Zealand. I: biomass and nutrient accumulation. *Bioresource Technology* 85, 273–283.
- Gutiérrez, V.H., Zapata, M., Sierra, C., Laguado, W., Santacruz, A., 2006. Maximizing the profitability of forestry projects under the Clean Development Mechanism using a forest management optimization model. *Forest Ecology and Management* 226, 341–350.
- Hansen, J., Sato, M., 2004. Greenhouse gas growth rates. *PNAS* 101, 16109-16114.
- Harmand, J.-M., Njiti, C.F., Bernhard-Reversat, F., Puig, H., 2004. Aboveground and belowground biomass, productivity and nutrient accumulation in tree improved fallows in the dry tropics of Cameroon. *Forest Ecology and Management* 188, 249–265.
- Heim, A., Wehrli, L., Eugster, W., Schmidt, M.W.I., 2009. Effects of sampling design on the probability to detect soil carbon stock changes at the Swiss CarboEurope site Lägeren. *Geoderma* 149, 347–354.
- Heimann, M., Treichstein, M., 2008. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature* 451.
- Heinsoo, K., Slid, A., Koppel, A., 2002. Estimation of shoot biomass productivity in Estonian Salix plantations *Forest Ecology and Management* 170, 67-74.
- Hoffmann, D., Weih, M., 2005. Limitations and improvement of the potential utilisation of woody biomass for energy derived from short rotation woody crops in Sweden and Germany. *Biomass and Bioenergy* 28, 267-279.
- Höhne, N., Wartmann, S., Herold, A., Freibauer, A., 2007. The rules for land use, land use change and forestry under the Kyoto Protocol—lessons learned for the future climate negotiations. *Environmental Science&Policy* 10, 353-369.
- Hornik, K., 2006. The R FAQ. <http://CRAN.R-project.org/doc/FAQ/R-FAQ.html>.
- Houghton, R.A., Goetz, S.J., 2008. New satellites offer a better approach for determining sources and sinks of carbon. *Eos Transactions of the American Geophysical Union* 43, 417-418.

- Houghton, R.A., Goodale, C.L., 2004. Effects of Land-Use Change on the Carbon Balance of Terrestrial Ecosystems. In: Change, E.a.L.U. (Ed.), Geophysical Monograph. the American Geophysical Union, p. 14.
- Humbert H., 1972. La destruction d'une flore insulaire par le feu. Principaux aspects de la végétation à Madagascar. Mémoire de l'Académie malgache, 14 : 77-78.
- Huntington, T.G., Ryan, D.F., 1990. Whole-tree-harvesting effects on soil nitrogen and carbon. *Forest Ecology and Management* 31, 193-204.
- IPCC, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J. T., Ding V., Griggs D. J., Noguer M., van der Linden P., X. D. et Maskell K. (Ed)
- IPCC, 2003. Good Practice Guidance: Land Use Change and Forestry Sector In: Jim Penman, M.G., Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger,, Riitta Pipatti, L.B., Kyoko Miwa, Todd Ngara,, Wagner, K.T.a.F. (Eds.), Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use C
- 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, 2007a. 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, p. 996.
- IPCC, 2007b. Climate Change 2007 – Mitigation of Climate Change - Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In. Cambridge University Press, Cambridge, p. 851.
- Jacobs, M.R., 1982. Les eucalyptus dans le reboisement. Collection FAO Forests, Rome.
- James, S., 1984. Lignotubers and burls— their structure, function and ecological significance in Mediterranean ecosystems *The Botanical Review* 50, 225-266.
- Jandl, R., Vesterdal, L., Olsson, M., Bens, O., Badeck, F., Rock, R., 2007. Carbon sequestration and forest management. In. CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources 2, 1749-8848
- Janik, L.J., Skjemstad, J.O., 1995. Characterization and analysis of soils using mid-infrared partial least-squares .2. Correlations with some laboratory data. *Australian Journal of Soil Research* 33, 637 – 650.
- Janik, L.J., Skjemstad, J.O., Shepherd, K.D., Spouncer, L.R., 2007. The prediction of soil carbon fractions using mid-infrared-partial least square analysis. *Australian Journal of Soil Research* 45, 73–81.
- Jenkinson, D.S., 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Philosophical Transactions of The Royal Society. Lond* 329, 361-368.
- 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.
- Jenny, H., 1941. Factors of soil formation—A system of quantitative pedology. Dover, New York.

- Jong, B.H., Masera, O., Olgun, M., Martı́nez, R., 2007. Greenhouse gas mitigation potential of combining forest management and bioenergy substitution: A case study from Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management* 242, 398–411.
- Karp, A., Shield, I., 2008. Bioenergy from plants and the sustainable yield challenge. *New Phytologist* 179, 15–32.
- Koskela, J., Nygren, P., Berninger, F., Luukkanen, O., 2000. Implications of the Kyoto Protocol for tropical forest management and land use: prospects and pitfalls. In, *Tropical Forestry Reports* University of Helsinki, Department of Forest Ecology, Helsinki
- Krishnan, P., Bourgeon, G., Lo Seen, D., Nair, K.M., Prasanna, R., Srinivas, S., Muthusankar, G., Dufy, L., Ramesh, B.R., 2007. Organic carbon stock map for soils of southern India: A multifactorial approach. *Current Science* 93, 706-710.
- Laclau, J.P., 2001. Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation d'eucalyptus. Effets du reboisement sur un sol de savane du littoral congolais ; conséquences pour la gestion des plantations industrielles. In, *Institut National Antronomie Paris-G*
- Laclau, J.P., Bouillet, J.P., Ranger, J., 2000. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of Eucalyptus in Congo. *Forest Ecology and Management* 128, 181-196.
- Laganière, J., Angers, d.A., Paré, d., 2009. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 1-15.
- Lal, R., 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220, 242-258.
- Landais, D., 2003. Etudes quantitatives et qualitatives du carbone séquestré dans le sol après afforestation au Congo Brazzaville. Mémoire de stage DESS en Sciences de l'Environnement. In, *Université Louis Parteur, France*, p. 33.
- Landis, J.R., Koch, G.G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33, 159--174.
- Langensiepen, M., Fuchs, M., Bergamaschi, H., Moreshet, S., Cohen, Y., Wolff, P., Jutzi, S.C., Cohen, S., G., R.M., Li, Y., Fricke, T., 2009. Quantifying the uncertainties of transpiration calculations with the Penman–Monteith equation under different cli
- Legros J.P., 2006. Mapping of soil, by J.P. Legros (translated by V.A.K. Sharma). Science Publishers, Enfield (2006). ISBN 1-57808-363-X, 409 pp.
- Lemma, B., Kleja, D.B., Olsson, M., Nilsson, I., 2007. Factors controlling soil organic carbon sequestration under exotic tree plantations: A case study using the CO2Fix model in southwestern Ethiopia. *Forest Ecology and Management* 252, 124-131.
- Leuschner, C., Moser, G., Bertsch, C., Roöderstein, M., Hertel, D., 2007. Large altitudinal increase in tree root/shoot ratio in tropical mountain forests of Ecuador. *Basic and Applied Ecology* 8, 219—230.
- Lima, A.M.N., Silva Ivo, R., Neves, J.I.C.L., Novais, R.F., Barros, N.F., Mendonc, E.S., Smyth, T.J., Moreira, M.S., Leite, F.P., 2006. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management* 235, 219-231.

- Livesley, S.J., Kiese, R., Michle, P., Weston, C.J., Butterbach-Bahl, K., Arndt, S.K., 2009. Soil-atmosphere exchange of greenhouse gases in a *Eucalyptus marginata* woodland, a clover-grass pasture, and *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations. *Gl*
- Locatelli, B., Lescuyer, G., 1999. Rôle et valeur des forêts tropicales dans le changement climatique. *Bois et Forêts des Tropiques* 260, 5-17.
- Locatelli, B., Pirard, R., Pedrino, L., Karsenty, A., 2005. Le Mécanisme de Développement Propre va-t-il stimuler la dynamique des plantations forestières à Madagascar ? In, Montpellier, p. 18.
- Loumeto, J.J., Bernhard-Reversat, F., 2001. Soil Fertility Changes with Eucalypt Hybrids and Plantation Age: Soil Organic Matter. In: Bernhard-Reversat, F. (Ed.), *Effect of Exotic Tree Plantations on Plant Diversity and Biological Soil Fertility in the Co*
- Lucot, E., Sánchez-Pérez, J.M., Bariac, T., Trémolières, M., 2008. Water uptake by trees in a riparian hardwood forest (Rhine floodplain, France). *Hydrological Processes* 22, 366-375.
- Lugo, A.E., Brown, S., 1993. Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon. *Plant and Soil* 149, 27-41.
- Luyssaert, S., Schulze, E.D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B.E., Ciais, P., Grace, J., 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455, 213-215.
- Madeira, M.V., Fabião, A., Pereira, J.S., Araújo, M.C., Ribeiro, C., 2002. Changes in carbon stocks in *Eucalyptus globulus* Labill. plantations induced by different water and nutrient availability. *Forest Ecology and Management* 171, 75-85
- Malhi, Y., Baldocchi, D.D., Jarvis, P.G., 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment* 22, 715-740.
- Malhi, Y., Meir, P., Brown, S., 2002. Forests, carbon and global climate. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 360, 1567-1591.
- Maquere, V., Laclau, J.P., Bernoux, M., L., S.-A., Goncalves, L.M., Cerri, C.C., Piccolo, M.C., Ranger, J., 2008. Influence of land use (savanna, pasture, Eucalyptus plantations) on soil carbon and nitrogen stocks in Brazil. *European Journal of Soil Science* 59, 863-877.
- Marin-Spiotta, E., Silver, W.L., Swanston, C.W., Ostertag, R., 2009. Soil organic matter dynamics during 80 years of reforestation of tropical pastures. *Global Change Biology* doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01805.x.
- Martin, B., 2003. L'eucalyptus: un arbre forestier stratégique. *Revue Forestière Française* 2, 141-154.
- Martin, M.P., Lo Seen, D., Boulonne, L., Jolivet, C., Nair, K.M., Bourgeon, G., Arrouays, D., 2009. Optimizing pedotransfer functions for estimating soil bulk density using boosted regression trees. *Soil Science Society of America Journal* 73, 485-493.
- Masserschmidt, I., Cuelbas, C.J., Poppi, R.J., de Andrade, J.C., de Abreu, C.A., Davanzo, C.U., 1999. Determination of organic matter in soils by FTIR/diffuse reflectance and multivariate calibration. *Journal of chemometrics* 13, 265 - 273.
- Mathews, J.A., 2008. Carbon-negative biofuels. *Energy Policy* 36, 940-945.
- McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3-52.

- McBratney, A.B., Odeh, I.O.A., Bishop, T.F.A., Dunbar, M.S., Shatar, T.M., 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma* 97, 293–327.
- Meersmans, J., De Ridder, F., Cantersa, F., De Baets, S., Van Molle, M., 2008. A multiple regression approach to assess the spatial distribution of Soil Organic Carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma* 143, 1-13.
- MEF, 2000. Etude prospective du secteur forestier en 2020 à Madagascar; p. 44.
- Mendham, D.S., O'Connell, A.M., S., G.T., J, R.S., 2003. Residue management effects on soil carbon and nutrient contents and growth of second rotation eucalypts. *Forest Ecology and Management* 181, 357-372.
- Merino, A., Balboa, M.A., Soalleiro, R.R., Gonzalez, J.G.A., 2005. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe. *Forest Ecology and Management* 207, 325–339.
- Merry, R.H., Janik, L.J., 2001. Mid Infrared Spectroscopy for Rapid and Cheap Analysis of Soils. In: Water, C.L.a. (Ed.), Australian Agronomy Conference. The Australian Society of Agronomy, Urrbrae, South Australia.
- MIES, 2005a. Changement climatique; Guide des mécanismes de projet prévus par le Protocole de Kyoto 2ème édition. In, Paris, p. 87.
- MIES, 2005b. Changements climatiques: guide explicatif des accords internationaux. In, France, p. 62.
- Mimmo, T., Reeves, J.B., McCarty, G.W., Galletti, G., 2002. Determination of Biological measures by mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy in soils within a landscape. *Soil Science* 167, 281-287.
- Misra, R.K., Turnbull, C.R.A., Cromer, R.N., Gibbons, A.K., LaSala, A.V., 1998. Below- and above-ground growth of *Eucalyptus nitens* in a young plantation: I. Biomass. *Forest Ecology and Management* 106, 283–293.
- Montagu, K.D., Düttmer, K., Barton, C.V.M., Cowie, A.L., 2005. Developing general allometric relationships for regional estimates of carbon sequestration—an example using *Eucalyptus pilularis* from seven contrasting sites. *Forest Ecology and Management* 204,
- Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., Da Fonseca G.A.B., Kent J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403 : 853-858.
- Nordh, N.-E., Verwijst, T., 2004. Above-ground biomass assessments and first cutting cycle production in willow (*Salix* sp.) coppice—a comparison between destructive and non-destructive methods. *Biomass and Bioenergy* 27, 1-8.
- O'Connell, A.M., Grove, T.S., Mendham, D.S., Rance, S.J., 2004. Impact of harvest residue management on soil nitrogen dynamics in *Eucalyptus globulus* plantations in south western Australia. *Soil Biology & Biochemistry* 36, 39-48.
- Ordonez, J.A.B., De Jong, B.H.J., Garcia-Oliva, F., Avina, F.L., Pérez, J.V., Guerrero, G., BRTinez, R., Masera, O., 2008. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoa
- Pansu M. et Gautheyrou J., 2003. L'analyse du sol : minéralogique, organique et minérale. Springer-Verlag, France.

- Parton, W.D., Schimel, D.S., Cole, C.V., Ojima, D.S., 1987. Analysis of factors controlling soil organic levels of grasslands in the Great Plains. *Soil Science Society of America Journal* 51, 1173-1179.
- Parton, W.J., Rasmussen, P.E., 1994. Long-term effects of crop management in wheat-fallow: II CENTURY model simulations. *Soil Science Society of America Journal* 58, 530-536.
- Patzek T.W. and Pimentel D., 2006. Thermodynamics of Energy Production from Biomass . *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24: 327-364.
- Paukkonen, K., Kauppi, A., 1998. Effect of coppicing on root system morphology and its significance for subsequent shoot regeneration of birches. *Canadian Journal of Forest Research* 28, 1870-1878.
- Paul, K.I., Polglase, P.J., Nyakuengama, J.G., Khanna, P.K., 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management* 168, 241-257.
- Paul, K.I., Polglase, P.J., Richards, G.P., 2003. Predicted change in soil carbon following afforestation or reforestation, and analysis of controlling factors by linking a C accounting model (CAMFor) to models of forest growth (3PG), litter decomposition
- Peltier, R., Forkong, N.C., Ntoupka, M., Manlay, R., Henry, M., Morillon, V., 2007. Évaluation du stock de carbone et de la productivité en bois d'un parc à karités du Nord-Cameroun. *Bois et Forêts des Tropiques* 294, 39-50.
- Peltoniemi, M., Palosuo, T., Monni, S., Mäkipää, R., 2006. Factors affecting the uncertainty of sinks and stocks of carbon in Finnish forests soils and vegetation. *Forest Ecology and Management* 232, 75–85.
- Perttu, K.L., 1998. Environmental justification for short-rotation forestry in sweden *Biomass and Bioenergy* 15, 6 p.
- Phillips, D.L., Brown, S.L., Schroeder, P.E., Birdsey, R.A., 2000. Toward error analysis of large-scale forest carbon budgets *Global Ecology and Biogeography* 9, 305-313.
- Pirie, A., Singh, B., Islam, K., 2005. Ultra-violet, visible, near-infrared and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopis techniques to predict several soil properties. *Australian Journal of Soil Research* 43, 713–772.
- PNUD, 2004. Programme PNUD MAG/97/007-DAP1 « Gouvernement et politiques publiques pour un développement humain durable ». Plan Communal de Développement : Commune Rurale de Sambaina. 40p
- Polglase, P., Snowdon, P., Theiveyanathan, T., Paul, K., Raison, J., Grove, T., Rance, S., 2004. Calibration of the FULLCAM model to Eucalyptus globulus and Pinus radiata and uncertainty analysis. In. *National Carbon Accounting System Technical n° 41*, Aust
- Post, W.M., Izaurralde, R.C., Mann, L.K., Bliss, N., 2001. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil *Climatic Change* 51, 73–99.
- Post, W.M., Known, K.C., 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Gloal Change Biology* 6, 317-328.
- 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.

- Proe, M.F., Craig, J., Griffiths, J., Wilson, A., Reid, E. , 1999. Comparison of biomass production in coppice and single stem woodland management systems on an imperfectly drained gley soil in central Scotland. *Biomass and Bioenergy* 17, 11.
- Proe, M.F., Griffiths, J.H., Craig, J., 2002. Effects of spacing, species and coppicing on leaf area, light interception and photosynthesis in short rotation forestry. *Biomass and Bioenergy* 23, 12.
- PSDR-UPEP, 2006. Plan communal de développement de la commune rurale de Sadabe. 55 pages
- Rakotonarivo, O.S., 2009. Etude de l'effet du modelé et de la position topographique sur les stocks de carbone de la biomasse végétale et du sol des taillis d'*Eucalyptus robusta* des Hautes terres centrales malgaches. In, Département des Eaux et Forêts. Université d'Antananarivo, Antananarivo, p. 115.
- Ramakavelo, S.P., 1999. Revue, compilation et analyse des données existantes sur le secteur des plantations industrielles malgaches d'aujourd'hui. In, Collecte et analyse de données pour l'aménagement durable des forêts -joindre les efforts nationaux et internationaux. Programme de partenariat CE-FAO (1998-2002), Madagascar, p 55.
- Ramamonjisoa, B., 1999. Rapport de compilation et d'analyse des données existantes sur le secteur des plantations forestières de Madagascar : Etat des plantations villageoises et familiales malgaches d'aujourd'hui. In, Collecte et analyse de données pour
- 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-Univer
- 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. Université d'Antananarivo, Madagascar. 117 p
- Randrianjafy, H., 1993. Production et aménagement des taillis d'eucalyptus à courte rotation: le cas des peuplements d'*E. robusta* Smith à vocation de bois d'énergie sur les haute terres centrales de Madagascar. In, Chaire des Sciences forestières et Cha
- Randrianjafy, H., 1999. Les plantations d'*Eucalyptus* à Madagascar : Superficie, rôle et importance des massifs. In. Projet FAO GCP/INT/679/EC, Madagascar, p. 80.
- Ranger, J., Gelhaye, D., Turpault, M.-P., 2002. Effect of semi-intensively managed forest plantations on soil quality and environment *Etude et Gestion des Sols* 9, 159-176.
- Ratsimandresy J., 1999. Contribution à la connaissance pédologique des rizières de submersion des Hauts Plateaux Malagasy, cas de Sambaina-Manjakandriana. Mémoire de DEA en Géochimie-Pédologie, Faculté des Sciences-département des Sciences de la Terre. Un
- Reeves, J., McCarty, G., Mimmoc, T., 2002. The potential of diffuse reflectance spectroscopy for the determination of carbon inventories in soils. *Environmental Pollution* 116, S277-S284.
- Richards, K.R., Stokes, C., 2004. A review of forest carbon sequestration cost studies: a dozen years of research *Climatic Change* 63, 1-48.
- Ridgeway, G., 2007. Generalized boosted models: a guide to the gbm package.<http://cran.r-project.org/web/packages/gbm/vignettes/gbm.pdf>. 12.

- Ringius, L., 2002. Soil Carbon sequestration and the CDM: opportunities and challenges for Africa. *Climatic Change* 54, 471-495.
- Robert, M., Saugier, B., 2003. Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. *C. R. Geoscience* 335, 577-595.
- Robinson, D., 2007. Implications of a large global root biomass for carbon sink estimates and for soil carbon dynamics. *Proceedings of the Royal Society* 274, 2753-2759.
- Roederer P., Bourgeat F., 1971 - Atlas de Madagascar. Tananarive, BDPA, Bureau pour le Développement de la Production Agricole, IGN, Institut Géographique National
- Roxburgh, S.H., Wood, S.W., Mackey, B.G., Woldendorp, G., Gibbons, P., 2006. Assessing the carbon sequestration potential of managed forests: a case study from temperate Australia. *Journal of Applied Ecology* 43, 1149-1159.
- Saint-André, L., 2004. Note technique sur le modèle Eucalypt-Dendro: Bilan et perspective. p. 42.
- Saint-André, L., M'Bou, A.T., Mabilia, A., Mouvondy, W., Jourdan, C., Roupsard, O., Deleporte, P., Hamel, O., Nouvellon, Y., 2005. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a Eucalyptus hybrid in Congo. *Forest Ecology and Management* 205, 199-214.
- Saint-André, L., Roupsard, O., Marsden, C., Thongo, M.B.A., D'Annunzio, R., De Grandcourt, A., Jourdan, C., Derrien, D., Picard, N., Zeller, B., Harmand, J.-M., Levillain, J., Henry, M., Nouvellon, Y., Deleporte, P., Bouillet, J.-P., Laclau, J.-P., 2007. Literature review on current methodologies to assess C balance in CDM Afforestation/reforestation projects and a few relevant alternatives for assessing water and nutrient balance, as a complement to carbon sequestration assessments. Work Package N°6 CarboAfrica Project.
- Santantonio, D., Herman, R.K., Overtos, W.S., 1977. Root biomass studies in forest ecosystems. *Pedobiologia* 17, 1-31.
- Sartori, F., Lal, R., Ebinger, M.H., Eaton, J.A., 2007. Changes in soil carbon and nutrient pools along a chronosequence of poplar plantations in the Columbia Plateau, Oregon, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 122, 325-339.
- Schimel, D.S., House, J.X., Hibbard, K.A., Bousquet, P., Ciais, P., Peylin, P., Braswell, B.H., Apps, M.J., Baker, D., Bondeau, A., Canadell, J., Churkina, G., Cramer, W., Denning, A.S., Field, C.B., Friedlingstein, P., Goodale, C., Heimann, M., Houghton, Schleninger, W.H., 1990. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature* 348, 232-234.
- Schwartz, D., Namri, M., 2002. Mapping the total organic carbon in the soils of Congo. *Global and Planetary Change* 33, 77-93.
- Ségalen P., 1994. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique. Tome I, II et III. Introduction générale: les sols ferrallitiques, leur identification et THESES, 579 p. environnement immédiat. Editions de l'ORSTOM, Collection ETUDES et THESES, p. 579.
- Senelwa, K., Sims, R.E.H., 1998. Tree biomass equations for short rotation eucalypts grown in New Zealand. *Biomass and Bioenergy* 13, 133-140.
- Shea, S., Butcher, G., Ritson, P., Bartle, J., Biggs, P., 1998. The potential for tree crops and vegetation rehabilitation to sequester carbon in Western Australia. Carbon Sequestration Conference – Melbourne, 22 p.

- Sierra, C.A., del Valle, J.I., Orrego, S.A., Moreno, F.H., Harmon, M.E., Zapata, M., Colorado, G.J., Herrera, M.A., Lara, W., Restrepo, D.E., Berrouet, L.M., Loaiza, L.M., Benjume, J.F., 2007. Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia. *Forest Ecology and Management* 243, 299-309.
- Sims, R.E.H., Maiava, T.G., Bullock, B.T., 2001. Short rotation coppice tree species selection for woody biomass production in New Zealand. *Biomass and Bioenergy* 20, 329-335.
- Smith, B.N., Epstein, S., 1971. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of higher plants. *Plant Physiology* 47, 380-384
- Snowdon, P., Eamus, D., Gibbons, P., Khanna, P., Keith, H., Raison, J., Kirschbaum, M., 2000. Synthesis of allometrics, review of root biomass and design of future woody biomass sampling strategies. In, National Carbon Accounting System Technical Report.
- Su, Z.-Y., Xiong, Y.-M., Zhu, J.-Y., Ye, Y.-C., Ye, M., 2006. Soil Organic Carbon Content and Distribution in a Small Landscape of Dongguan, South China. *Pedosphere* 16, 10-17.
- Sørensen, L.K., Dalsgaard, S., 2005. Determination of clay and other soil properties by near infrared spectroscopy. *Soil Sciences and Society of American Journal* 69, 159-167.
- Sumanta, B., 2007. Relationship between size hierarchy and density of trees in a tropical dry deciduous forest of western India. *Journal of Vegetation Science* 18, 389-394.
- Telenius, B., Verwijst, T., 1995. The influence of allometric variation, vertical biomass distribution and sampling procedure on biomass estimates in commercial short-rotation forests. *Bioresource Technology* 51, 247-253.
- Tittonell, P., Shepherd, K.D., Vanlauwe, B., Giller, K.E., 2008. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya—An application of classification and regression tree analysis.
- Tomé, M., Verwijst, T., 1996. Modelling competition in short rotation forests. *Biomass and Bioenergy* 11, 177-187.
- Tornquist, C.G., Mielniczuk, J., Cerri, C.E.P., 2009. Modeling soil organic carbon dynamics in Oxisols of Ibiruba (Brazil) with the Century Model. *Soil & Tillage Research*, doi:10.1016/j.still.2009.1005.1005.
- Trouvé, C., Mariotti, A., Schwartz, D., Guillet, B., 1994. Soil organic carbon dynamics under eucalyptus and pinus planted on savannas in the Congo. *Soil Biology & Biochemistry* 26, 287-295.
- Turner, J., Lambert, M., 1999. Change in organic carbon in forest plantation soils in Eastern Australia. *Forest Ecology and Management* 133, 231-247.
- USAID, 2006. Etude sur la consommation et la production en produits forestiers ligneux à Madagascar. In: Group IRG (Ed.), Madagascar, p. 101.
- Verwijst, T., Telenius, B., 1999. Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *Forest Ecology and Management* 121, 137-146.
- Vesterdal, L., Ritter, E., Gundersen, P., 2002. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management* 169, 137-147.

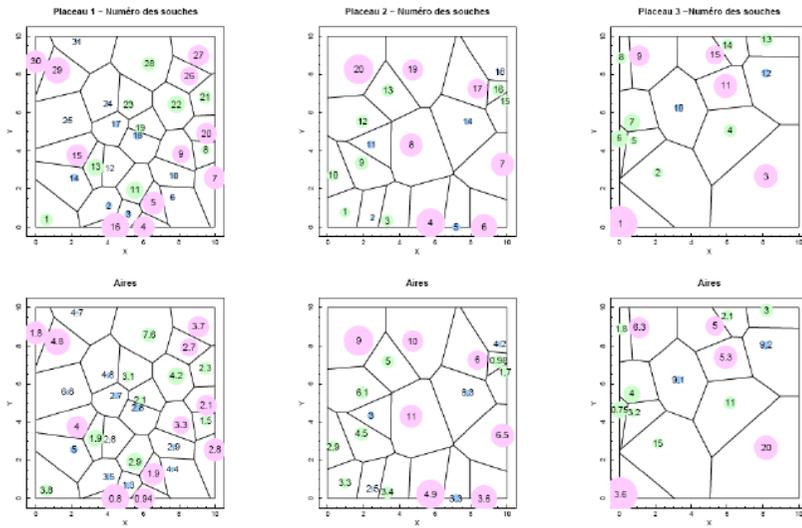
- Wildy, D.T., Pate, J.S., 2002. Quantifying above- and below-ground growth response of the western Australian Oil Mallee, *Eucalyptus kochii* subsp. *plenissima*, to constricting decapitation regimes. *Annals of Botany* 90, 18.
- Yimer, F., Ledin, S., Abdelkadir, A., 2006. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by topographic aspect and vegetation in the Bale Mountains, Ethiopia. *Geoderma* 135, 335–344.
- 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.
- Zhang, Y., Zhao, Y.C., Shi, X.Z., Lu, X.X., Yu, D.S., Wang, H.J., Sun, W.X., Darilek, J.L., 2008. Variation of soil organic carbon estimates in mountain regions: A case study from Southwest China. *Geoderma* 146, 449–456.
- Zianis, D., 2008. Predicting mean aboveground forest biomass and its associated variance. *Forest Ecology and Management* 256, 1400–1407.
- Zingore, S., Manyame, C., Nyamugafata, P., Giller, K.E., 2005. Long-term changes in organic matter of woodland soils cleared for arable cropping in Zimbabwe. *European Journal of Soil Science* 56, 727–736.
- Zornoza, R., Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Scow, K.M., Arcenegui, V., Mataix-Beneyto, J., 2008. Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soils. *Soil Biology & Biochemistry* 40, 1923–1930.

ANNEXES

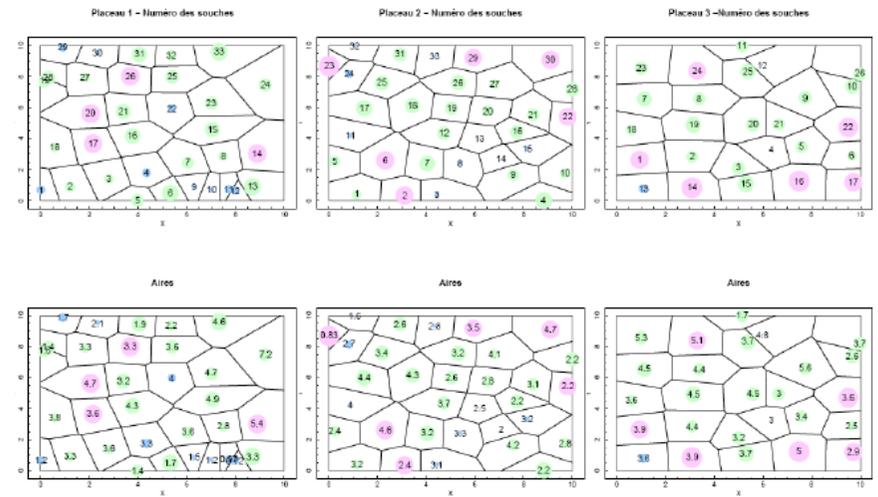
Annexe 1.1 Carte des souches des parcelles d'eucalyptus utilisées lors des mesures destructives de la biomasse

- Cir ≤ 100 cm
- 100 cm < Cir ≤ 200 cm
- Cir < 200 cm

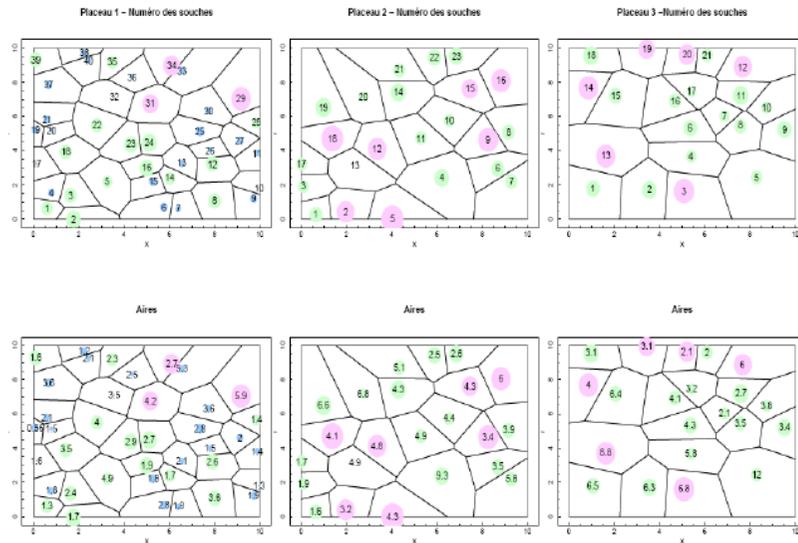
Parcelle Sa 47



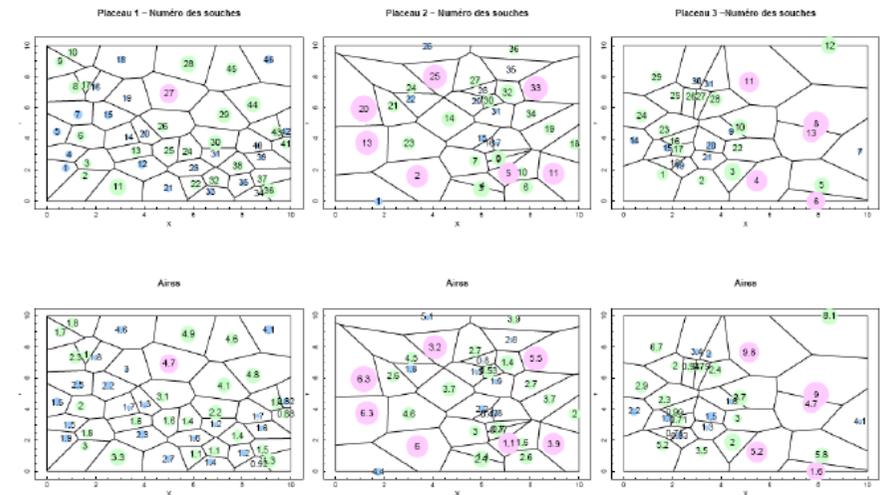
Parcelle Sa 72



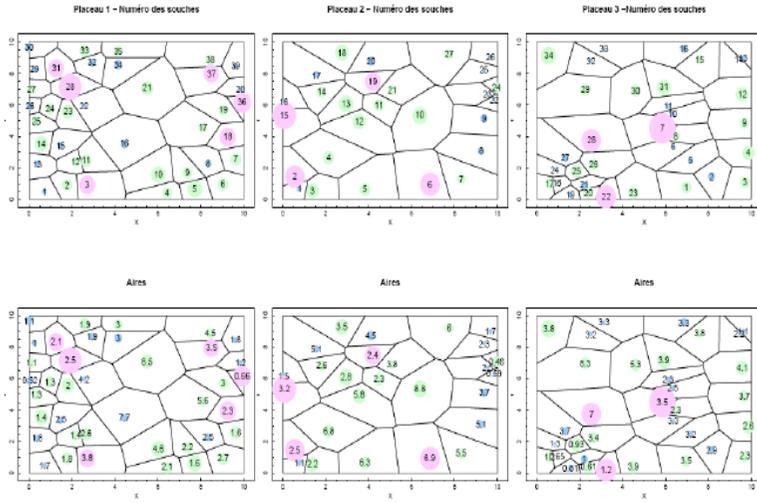
Parcelle AZ 52



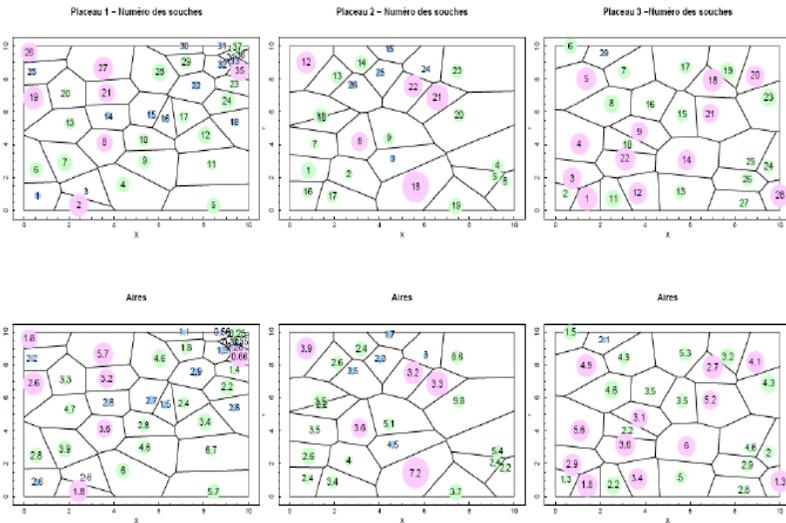
Parcelle AB 72



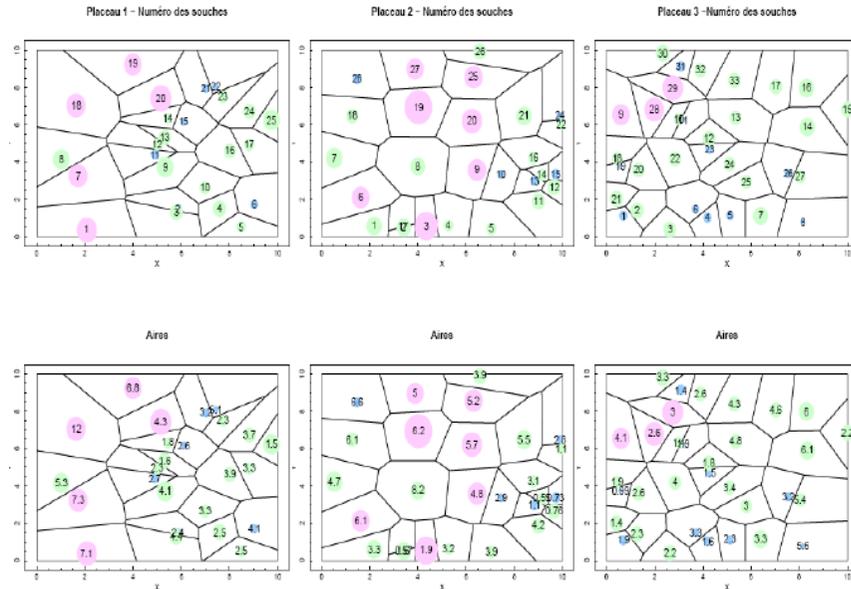
Parcelle AB 77



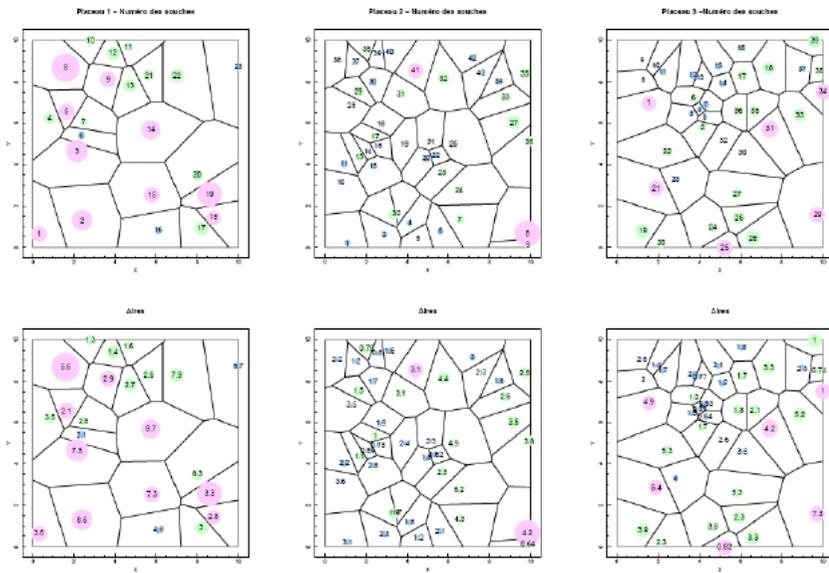
Parcelle AN 87



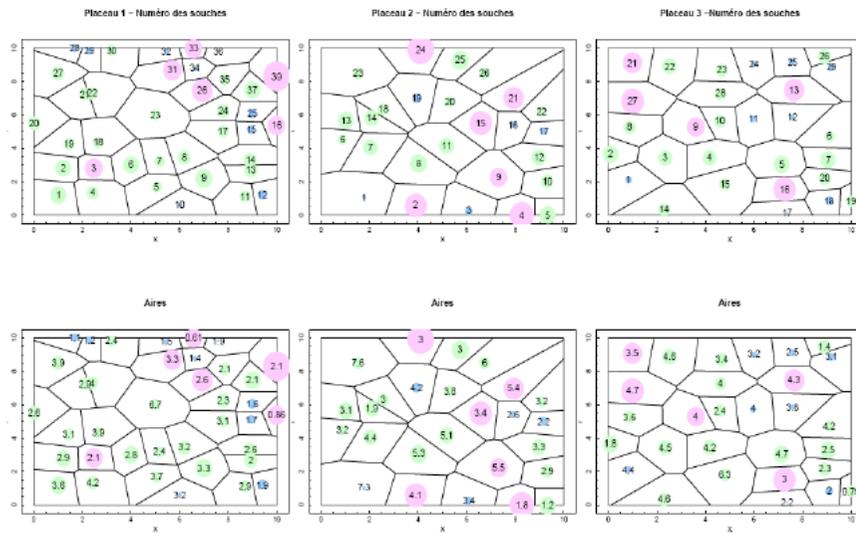
Parcelle Sa 53/100



Parcelle Sa 67

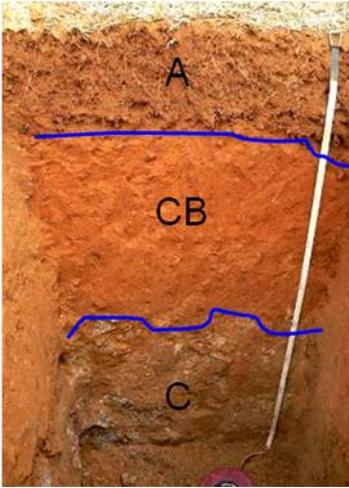


Parcelle AZ 67

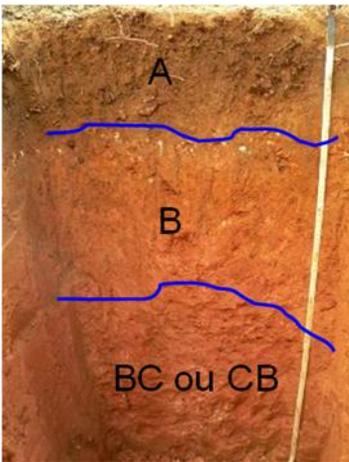


Annexe 1.2 Photos des profils pédologiques des trois principaux types de sol rencontrés dans la CR de Sambaina

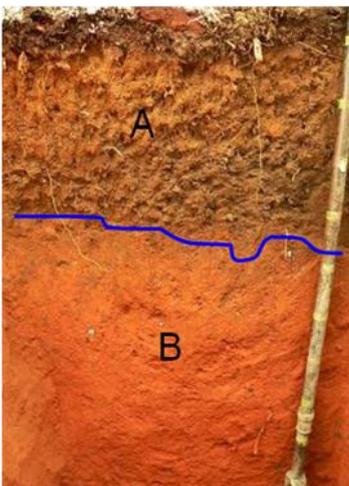
Sol fortement rajeuni



Sol rajeuni

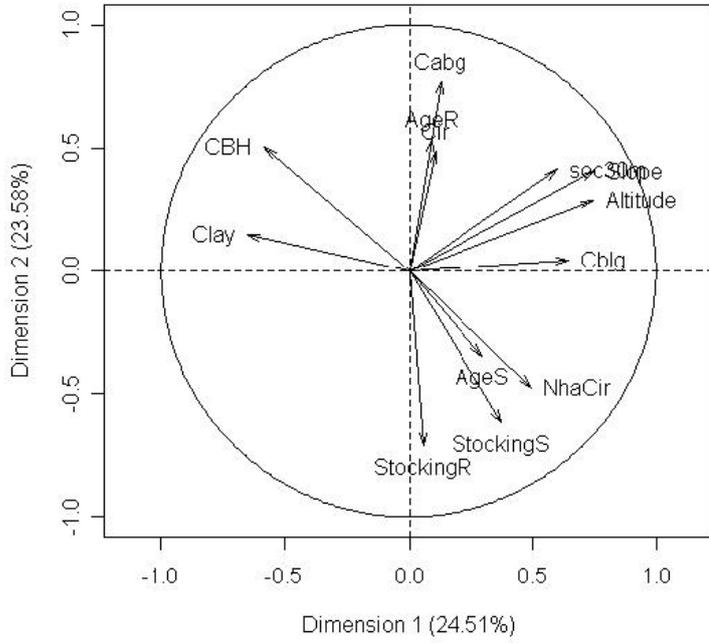


Sol typique

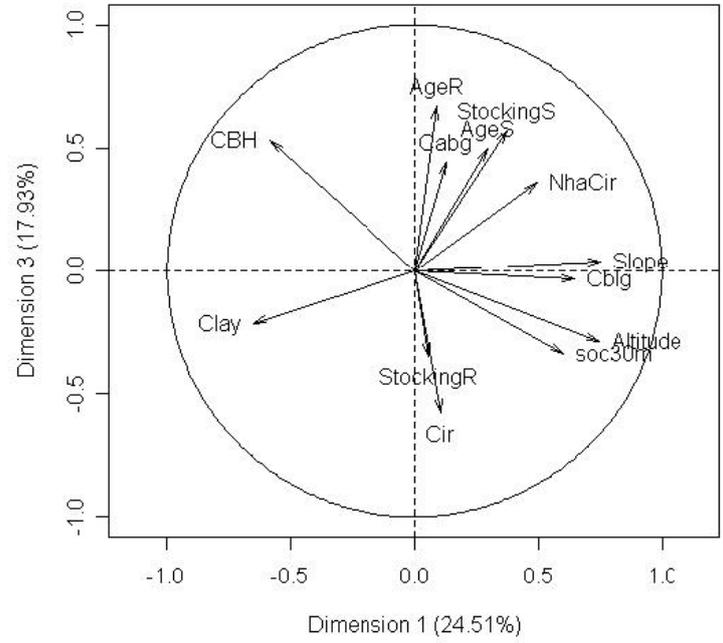


Annexe 5-1: Résultats de l'analyse en composante principale lors des analyses des déterminants du stockage de C dans les plantations d'eucalyptus des Hautes Terres malgaches

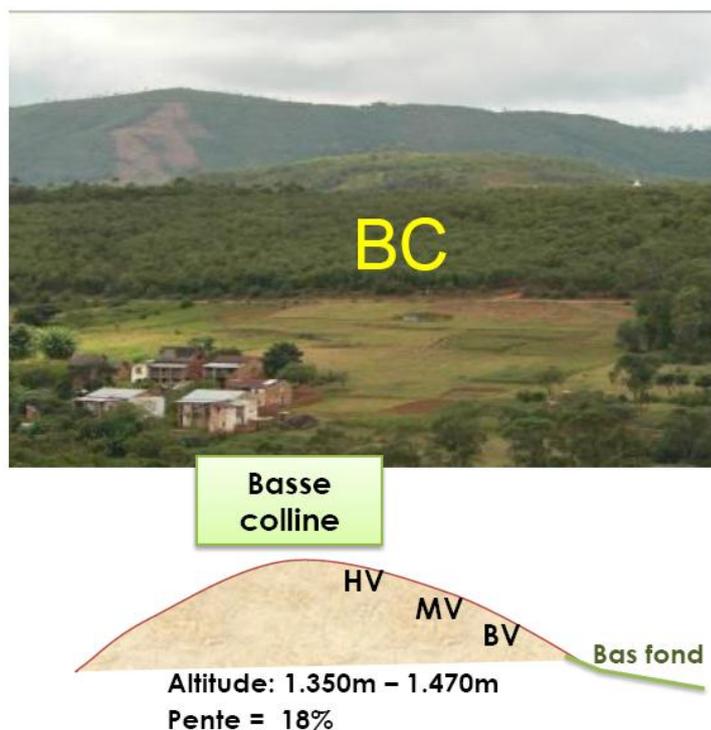
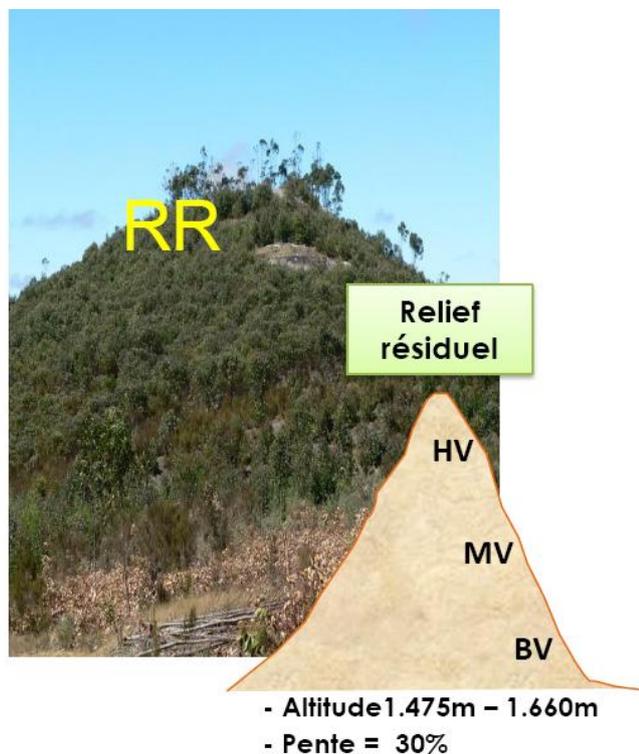
Variables factor map (PCA)



Variables factor map (PCA)



Annexe 5-2 : Synthèses des résultats lors de l'étude sur l'influence du type de modelé et de la position topographique sur les stocks de C des différents compartiments de plantation d'eucalyptus des Hautes Terres malgaches



Effet modelé sur le C du sol

BC	RR
79 ± 8 MgC.ha ⁻¹	100 ± 12 MgC.ha ⁻¹

Effet de la position topographique sur le C aérien

BV	HV et MV
29 ± 7 MgC.ha ⁻¹	19 ± 4 MgC.ha ⁻¹

avec HV : haut du versant ; MV : milieu du versant et BV : bas de versant

LISTE DES TABLEAUX

Introduction

Tableau 0.1 Quelques chiffres sur les stocks de carbone ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) dans les peuplements d'eucalyptus.

Chapitre I

Tableau 1.1 Descriptions synthétiques des deux sites d'étude.

Tableau 1.2 Caractéristiques des situations étudiées dans les deux sites.

Tableau 1.3 Densités apparentes du sol ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) sur les sites d'étude: Sambaina et Sadabe (moyenne \pm écartype, $n = 4$).

Tableau 1.4 Caractéristiques physico-chimique et minéralogique des horizons des profils types à Sambaina.

Chapitre II

Table 2.1 Stand characteristics of the selected Eucalyptus robusta plantations in the central highlands of Madagascar ($n = 9$).

Table 2.2 Below and above-ground allometry equations.

Table 2.3 Biomass production (Mg ha^{-1}) for the selected stands of Eucalyptus robusta in the central highlands of Madagascar ($N = 9$).

Chapitre III

Tableau 3.1 Description des parcelles étudiées sur les Hautes Terres de Madagascar.

Tableau 3.2 Caractéristiques des équations de régression utilisées lors de la quantification de la biomasse des plantations d'eucalyptus des Hautes Terres de Madagascar.

Tableau 3.3 Répartition (%) du stock de C dans les différents compartiments des plantations d'eucalyptus sur les Hautes Terres de Madagascar.

Chapitre IV

Table 4.1 Characteristics and statistics of predictor variables.

Table 4.2 Descriptions and statistics of carbon pools

Table 4.3 Correlation matrix between carbon pools and predictor variables

Table 4.4 Characteristics of models tested for each pool

Chapitre 5

Tableau 5.1 Calculs pour l'analyse de l'évitement de CO_2 dans la CR de Sambaina.

Tableau 5.2 Caractéristiques des parcelles ayant servi à la simulation de prédiction de stock de C (aérien, racinaire, sol) dans la CR de Sadabe.

LISTE DES FIGURES

Introduction

- Figure 0.1 Evolution des concentrations atmosphériques globales de trois gaz à effet de serre.
- Figure 0.2 Emissions globales de GES anthropiques en 2004.
- Figure 0.3 Relation entre la concentration de GES (CO_2 et CH_4) et température de la terre depuis le passé.
- Figure 0.4 Le cycle global du carbone (2000-2006), focus sur l'Agriculture, la Foresterie et les Autres Gestion des Terres.
- Figure 0.5 Emissions de GES par secteur en 2004.
- Figure 0.6 Cycle du C au niveau de la parcelle d'un écosystème forestier.
- Figure 0.7 Forêts plantées productives en 2005: superficie par genre.
- Figure 0.8 Représentation simplifiée du fonctionnement des taillis d'eucalyptus des Hautes terres Centrales Malgaches.

Chapitre I

- Figure 1.1 Aperçus des cartes sur Madagascar ; (a) relief, (b) climat, (c) pédologie, (d) végétation.
- Figure 1.2 Carte de localisation des sites et situations étudiées.
- Figure 1.3 Courbes de la température et de la pluviométrie de la région de Manjakandriana.
- Figure 1.4 Carte des souches d'une parcelle d'eucalyptus âgée de 47 ans
- Figure 1.5 Cartes des emplacements des transects étudiés lors de l'établissement de la carte des modelés et des modelés de la CR de Sambaina.
- Figure 1.6 Histogramme de fréquence des circonférences des souches (Cir, cm) dans les neuf parcelles considérées lors de la mesure destructive de la biomasse.
- Figure 1.7 Histogramme de fréquence des circonférences à hauteur de poitrine des rejets (CHP, cm) dans les neuf parcelles considérées lors de la mesure destructive de la biomasse.
- Figure 1.8 Structure totale des neuf parcelles considérées lors de la mesure destructive de la biomasse.
- Figure 1.9 : Profils des teneurs en C des situations : (a) sous différents modes d'usage dans le site de Sambaina, (b) sous différents modes d'usage dans le site de Sadabe et, (c) sous la chronoséquence de plantations d'eucalyptus.
- Figure 1.10 : Résultats des prédictions en spectroscopie en moyen infrarouge (teneur en carbone mesurée vs prédite) au niveau du site de : (a) Sambaina, (b) Sadabe
- Figure 1.11 Aperçus des cartes des plantations d'eucalyptus dans la CR de Sambaina : (a) âge de plantation et (b) âge des taillis.
- Figure 1.12 Profils pédologiques des principaux types de sol observés à Sambaina.
- Figure 1.13 Aperçu de la carte morphopédologique de la CR de Sambaina.

Chapitre II

- Figure 2.1 Voronoï polygon for stump, CR and MR extractions.
- Figure 2.2 Relationships between stump circumference (cm) and dry weight below-ground biomass components of (a) stumps, (b) coarse roots (CR, with diameter ≥ 10 mm), (c) medium roots (MR, $10 \text{ mm} > \text{diameter} \geq 2 \text{ mm}$) and (d) total below-ground dry biomass (N = 27).
- Figure 2.3 Relationships between shoots basal area ($\text{g in m}^2 \cdot \text{tree}^{-1}$) and dry weight above-ground biomass components of (e) leaves, (f) branches, (g) stems and (h) total above-ground dry biomass (N = 27).

Figure 2.4 Projections of the measured and calculated variables in the principal component spaces: (i) for the space (1, 2) and (j) for the space (1, 3). Abbreviations of variables are given in Table 2.1.

Figure 2.5 Biomass partitioning in below (k) and above-ground (l) parts for the stands of *E. robusta* in the central highlands of Madagascar (N = 9)

Chapitre III

Figure 3.1 Localisation des Communes Rurales étudiées et leur occupation des terres par rapport à la carte de Madagascar.

Figure 3.2 Stock de carbone (Mg C.ha⁻¹) dans le compartiment de la biomasse des divers modes d'usage des terres sur les Hautes Terres Centrales de Madagascar.

Figure 3.3 Résultats des études isotopiques du C du sol : (i) Profil de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) sous les différents modes d'usage des terres sur l'horizon 0 – 40 cm ; (ii) Contribution de l'eucalyptus dans la constitution du C du sol.

Figure 3.4 Répartition du stock de carbone (en %) dans les différents compartiments de chaque mode d'usage des terres des Hautes Terres Centrales de Madagascar.

Figure 3.5 Evolution des stocks de carbone (Mg C.ha⁻¹) des compartiments séquestrants (racinaire et sol) des taillis d'eucalyptus des Hautes Terres Centrales de Madagascar avec leur durée de plantation.

Chapitre IV

Figure 4.1 Map of the study area showing location relative to the map of Madagascar

Figure 4.2 Bar charts giving the relative importance of predictor variables determined by BRT approach and used for estimation of C stock in (a) ABG pool, (b) BLG pool and (c) SOC pool.

Figure 4.3 Graphs of Predicted vs Measured C stocks for each model retained in (d) ABG pool, (e) BLG pool and (f) SOC pool.

Figure 4.4 C stocks (kg m⁻²) distribution maps in the different pools of the study area based on predicted C stocks obtained by the use of boosted regression tree models, in (g) the ABG pool, (h) the BLG pool (i) the SOC pool and (j) all pools. The scale is in 1: 25,000. * 1 Gg = 10³ Mg = 10⁹ g.

Chapitre 5

Figure 5-1. Comparaison des stocks de C des différents compartiments entre les trois modes d'usage des terres

Figure 5.2 Evolution des stocks de C des compartiments séquestrants (racine, sol) sous plantation d'eucalyptus en comparaison avec le système originel (pseudo-steppe).

Figure 5.3 Résultats des simulations de prédiction de stocks de C dans la CR de Sadabe : (a) Occupation du sol à Sadabe et emplacement des parcelles de simulation ; (b) Evolution des stocks de C total (aérien, souterrain, sol) avec la durée du projet/simulation ; (c) Bilan C durant le projet et considérant toutes les parcelles.

LISTE DES PHOTOS

Chapitre I

Photos 1.1 Polygone de Voronoï. Gauche : délimitation, droite : excavation.

Photos 1.2 Manipulation du carottier sur le terrain.

Photos 1.3 Pédocomparateurs issus des prospections sur les transects n° 9 et n° 10.

Chapitre III

Photo 3.1 Importance des plantations d'*Eucalyptus robusta* dominant le paysage des Hautes Terres malgaches.

Photo 3.2 Divers types de reliefs et de versants sont recouverts de plantations d'eucalyptus dans la Commune Rurale de Sambaina-Manjakandriana.

Photo 3.3 Aperçu des taillis d'eucalyptus des HTC malgaches et illustrations de leur utilisation : (a) et (b) Parcelles de taillis en fin de rotation qui seront prochainement recépées, (c) Enfants villageois transportant des branches d'eucalyptus qu'ils ont ramassé pour leur consommation locale de bois de chauffe et d'énergie, (d) Recépage d'une parcelle en fin de rotation assuré par un bûcheron du village, (e) Stocks de bois de chauffe et d'énergie récemment coupés sur la parcelle, (f) Chargement en bois de chauffe et d'énergie d'un camion assurant l'approvisionnement de la capitale, (g) Charbonnière traditionnelle en cuite au niveau de la parcelle, (h) Sacs de charbon prêts pour embarquement en ville.

Photo 3.4 Exploitation de la litière d'eucalyptus (« *fongo* ») : (i) Décapage manuel de la couche fragmentée et humifiée de la litière (à l'aide d'une bêche), (j) Etable dont la litière est à base de « *fongo* ».

Photo 3.5 Un profil du type de sol (jaune sur rouge) rencontré dans les zones d'étude sur une profondeur de 1m.

Photo 3.6 Les autres modes d'usages des terres (autre que taillis d'eucalyptus) étudiés : (k) Pseudo-steppe avec les pieds de *Philippia sp.*, (l) Diverses parcelles de rotation culture (au premier plan) - jachère (en second plan).

Photo 3.7 Compartiment souterrain (souche, grosses et moyennes racines) d'une souche d'eucalyptus géré en taillis en cours d'excavation de son aire de prélèvement (jusqu'à 1m de profondeur).

RESUME

Les écosystèmes forestiers jouent un rôle important dans l'atténuation de la concentration du gaz carbonique (gaz à effet de serre) en raison des fortes quantités de carbone (C) stockées dans leur végétation et le sol. Cette capacité peut être toutefois affectée par différents facteurs, comme le type de forêt, le type d'espèces végétales, l'âge et le mode de gestion. Aussi, la caractérisation de cette fonction de stockage de C de ces écosystèmes forestiers est-elle primordiale. Dans ce contexte, le stockage de C dans les compartiments végétaux (aérien, racinaire et litière) et du sol des plantations d'eucalyptus (E) à courte durée de rotation (5 ans) a été étudié sur les Hautes Terres de Madagascar ; ce sont des plantations destinées à la production de bois d'énergie et de charbon de bois.

Diverses situations sont étudiées : une chronoséquence de plantation d'eucalyptus (âge des souches de 17 à 111 ans, $n = 41$), des systèmes sous rotation culture/jachère (CJ, $n = 6$) et des systèmes sous système originel (pseudo-steppe et savane, B ; $n = 7$). Des mesures destructives de la biomasse aérienne et racinaire ont été réalisées dans ces situations ; un effort particulier a été porté sur la mesure de la biomasse racinaire de l'eucalyptus via la méthode du polygone de Voronoï.

Des équations allométriques reliant la quantité de biomasse (aérienne et racinaire) de ces taillis d'eucalyptus aux variables dendrométriques (circonférence des souches, surface terrière des rejets) ont été développées. L'application de ces équations et la caractérisation du stock de C du sol (0-30 cm) ont montré que les plantations d'eucalyptus présentent un stock total de C élevé en comparaison aux autres modes d'usage des terres : $150,8 \pm 25,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ vs 112 ± 15 pour B et $72,3 \pm 9,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ pour CJ. Ceci est en raison de la contribution importante du système racinaire ($21,22 \text{ Mg C ha}^{-1}$ dans la souche et $20,38 \text{ Mg C ha}^{-1}$ dans les racines à $\varnothing > 2 \text{ mm}$) et du sol (de l'ordre de $84,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$).

L'analyse des relations entre les valeurs de stocks de C dans les différents compartiments de l'eucalyptus mesurés et les variables dendrométriques/spatiales effectuée dans cette étude a montré qu'il n'y a pas de corrélations significatives entre la durée de plantation et les stocks de C dans chaque compartiment d'une part et le C aérien et le C racinaire d'autre part. Ce sont des modèles d'arbre de régression qui ont permis de prédire les stocks de chaque compartiment avec : f (pente, circonférence, âge et densité des rejets) pour le C aérien ($R^2 = 0,74$), f (variable intégrant à la fois la circonférence et la densité des souches, altitude, âge des souches) pour le C racinaire ($R^2 = 0,85$) et f (altitude, pente, âge des souches) pour le C du sol ($R^2 = 0,61$). L'application de ces modèles sur des couches spatiales des variables concernées préalablement établies à l'échelle d'une Commune Rurale des Hautes Terres malgaches (Sambaina) a permis de quantifier le stock de C sur une superficie de 1580 ha. Pour un stock total de $238 \pm 40 \text{ Gg C}$, $32 \pm 13 \text{ Gg C}$ se trouvent dans la biomasse aérienne, $67 \pm 15 \text{ Gg C}$ dans la biomasse racinaire et $139 \pm 36 \text{ Gg C}$ dans les 30 premiers centimètres du sol.

Les résultats de ce travail ont montré que les plantations d'eucalyptus considérées dans cette étude permettent le stockage important de C. Ainsi les méthodologies et résultats acquis lors de cette étude seront-elles applicables à d'autres zones (comme les fronts d'afforestation), afin de valoriser ces nouvelles plantations d'eucalyptus sur le marché du C, en plein développement.

MOTS-CLES : séquestration de carbone, biomasses aérienne et racinaire, sol tropical, taillis d'*Eucalyptus robusta*, chonoséquence, changement de mode d'usage, réchauffement climatique.