

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS.....	i
LISTE DES ANNEXES.....	iii
LISTE DES CARTES.....	iii
LISTE DES FIGURES.....	iii
LISTE DES PHOTOS.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	iv
LISTE DES UNITES ET SYMBOLES CHIMIQUES.....	iv
GLOSSAIRE.....	v
PARTIE 1 : INTRODUCTION.....	1
PARTIE 2 : METHODOLOGIE.....	3
1. Problématique et hypothèses.....	3
1.1. Problématique.....	3
1.2. Hypothèses.....	4
2. Milieu d'étude.....	5
3. Etat des connaissances.....	8
3.1. Bases de données sur le sol et le carbone organique du sol.....	8
3.2. Types de sols dans la région d'Antsirabe et leurs proportions.....	8
3.3.1. Sols ferrallitiques.....	9
3.3.2. Sols peu évolués.....	9
3.3.3. Sols hydromorphes.....	9
3.3.4. Sols minéraux bruts.....	10
3.3.5. Andosols.....	10
4. Méthodes.....	14
4.1. Traitement et analyse de la base de données ValSol.....	14
4.2. Etude pédologique.....	16
4.3. Observations et enquêtes.....	17
4.4. Expérimentation.....	17
4.4.1. Préparation des échantillons à analyser.....	17
4.4.2. Dosage du carbone organique.....	18
4.5. Traitement et analyses des données.....	19
4.5.1. Calcul des stocks de carbone organique du sol.....	19
4.5.2. Analyses statistiques.....	21

4.6. Cartographie	22
5. Cadre opératoire	23
PARTIE 3 : RESULTATS	24
Chapitre 1 : Distribution spatiale du stock de carbone organique du sol.....	24
1.1. Caractérisation des sols de la région d’Antsirabe	24
1.1.1. Types de sols rencontrés au niveau des sites de prélèvement de l’étude	24
1.1.2. Types de sols rencontrés au niveau des sites d’étude du projet BIOVA	25
1.2. Variabilité spatiale des stocks de carbone organique du sol.....	26
2.1.1. Variabilité verticale ou variabilité suivant la profondeur.....	26
2.1.2. Variabilité suivant les types de sol	26
2.1.3. Variabilité suivant les types de sol et la profondeur.....	28
1.3. Représentation spatiale des stocks de carbone organique du sol sur 0-30cm et sur 0-100cm	30
Chapitre 2 : Variabilité temporelle du stock de carbone organique du sol.....	33
2.1. Stocks de carbone au temps ancien.....	33
2.2. Bilan des stocks actuels et des stocks anciens de carbone organique du sol	34
2.3. Différence entre les stocks de carbone organique du sol au temps actuel et au temps ancien.....	35
PARTIE 4 : DISCUSSIONS	36
1. Discussion sur la méthodologie.....	36
1.1. Atouts de l’étude.....	36
1.2. Contraintes et limites	36
1.2.1. Etude de la variabilité spatiale.....	36
1.2.2. Spatialisation des stocks de carbone organique du sol	37
1.2.3. Etude de la variabilité temporelle.....	38
2. Discussion sur les résultats et les hypothèses	41
2.1. Discussions sur les résultats.....	41
2.2. Discussion sur les hypothèses.....	47
3. Perspectives de recherche.....	48
PARTIE 5 : CONCLUSION	53
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	

LISTE DES ABREVIATIONS

ADDM-MPB	: Andosol différencié désaturé mélanique sur matériaux pyroclastiques basiques
ANOVA	: Analyse Of Variance (analyse de variance)
APDM-MPB	: Andosol peu différencié mélanique sur matériaux pyroclastiques basiques
BDD	: Base De Données
BIOVA	: projet de recherche scientifique intitulé BIOmasses Végétales et Animales
CIRAD	: Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
Com. Pers.	: Communication Personnelle
COS	: Carbone Organique du Sol
CPCS	: Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
CSCV	: Complexe sols des cônes volcaniques
CV	: Coefficient de Variation
Da	: Densité apparente du sol
DRDR	: Direction Régionale pour le Développement Rural
FAO	: Food and Agriculture Organization
FOFIFA	: Foibem-pirenena ho an'ny fikarohana ampiharina ho fampandrosoana ny eny Ambanivohitra
GES	: Gaz à Effet de Serre
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GPS	: Global Positioning System
INRA	: Institut National de la Recherche Agronomique
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement
L-CF	: Lithosols sur cuirasse ferrugineuse
L-RV	: Lithosols sur roches volcaniques
L-SC	: Lithosols sur socle cristallin
MEEFT	: Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts et du Tourisme
MOS	: Matière Organique du Sol
N°	: Numéro
ORSTOM	: Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
PEERS-CarSoM	: Programme d'Excellence pour l'Enseignement et la Recherche au Sud - Carbone et sols de Madagascar
PNUE	: Programme des Nations Unies pour l'Environnement
REEM	: Rapport sur l'Etat de l'Environnement à Madagascar

SFFD-AER-M	: Sol ferrallitique fortement désaturé - allitique avec érosion et remaniement sur migmatites
SFFD-AH + SFFDR	: Complexe sols ferrallitiques fortement désaturés allitiques humifères+ sols ferrallitiques fortement désaturés
SFFD-AH-CB	: Sol ferrallitique fortement désaturé, allitique humifère sur coulées basiques
SFFD-AH-MPA	: Sol ferrallitique fortement désaturé, allitique humifère sur matériaux pyroclastiques acides
SFFD-RER-SC	: Sol ferrallitique fortement désaturé, rajeuni avec érosion et remaniement, sur socle cristallin
SFFD-RH-G	: Sol ferrallitique fortement désaturé-rajeuni-humifère-sur gabbro
SFFD-RH-MVB	: Sol ferrallitique-fortement désaturé-rajeuni humifère- sur matériaux volcaniques basiques
SFFD-RM-MVB	: Sol ferrallitique fortement désaturé rajeuni modal sur matériau volcanique basique
SFFD-TR-MV	: Sol ferrallitique fortement désaturé, typique rajeuni, sur matériau volcanique
SFMD en B-H- MV	: Sol ferrallitique moyennement désaturé en B, hydromorphe sur matériau volcanique
SFMD-A-H-CVB	: Sol ferrallitique-moyennement désaturé - allitique-humifère sur coulée volcanique basique
SFMD-RAE-MVB	: Sol ferrallitique-moyennement désaturé rajeuni par apport éolien-sur matériau volcanique basique
SH-HGAA-ARI	: Sol hydromorphe humique à gley à anmoor acide sur alluvions récentes indifférenciées
SH-OO-MV	: Sol hydromorphe organique oligotrophes sur matériaux volcaniques
SH-PG-MV	: Sol hydromorphe à pseudogley sur matériaux volcaniques
SH-PG-SVL	: Sol hydromorphe à pseudogley sur sédiment volcano-lacustre
SHPH-AG-AC	: Sol hydromorphe peu humifère à amphigley sur alluvions cristallines
SHPH-GE-AC	: Sol hydromorphe peu humifère à gley d'ensemble sur alluvions cristallines
SPE-H-RM-MV	: Sol peu évolué humifère-ranker à moder sur matériaux volcaniques
SPE-L-CV	: Sol peu évolué lithique sur coulée volcanique
SPE-NC-E/SL-CV + ADDM-MPB	: Complexe sol peu évolué d'origine non-climatique d'érosion / sol lithique sur coulée volcanique + Andosol
SPE-NC-EH-SC	: Sol peu évolué non-climatique d'érosion hydromorphe sur socle cristallin
SPE-NC-ER-MPA	: Sol peu évolué-non-climatique -d'érosion régosolique-sur matériau pyroclastique acide
SPE-NC-ER-SC	: Sol peu évolué-non-climatique -d'érosion régosolique-sur socle cristallin
t_0	: se réfère au temps initial ou temps ancien (1974)
t_1	: se réfère au temps final ou temps présent, et qui correspond à nos jours (2014)
TVBA	: Dénomination issue de la nomenclature de sauvegarde des données
α	: Seuil de signification
Δ SCOS	: Bilan du stock de COS entre t_1 et t_0

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Correspondance entre les anciens sites de prélèvement et les sites actuels et leurs caractéristiques	I
Annexe 2: Stocks de carbone organique des sols sur 30cm des sites du projet BIOVA avec leurs coordonnées géographiques et leurs correspondances aux sites de Zebrowski.....	II
Annexe 3: Occupation des sols au temps de Zebrowski et celles au temps actuel.....	IV
Annexe 4: Variation due à l'intégration des valeurs des stocks de carbone du sol du projet BIOVA	V
Annexe 5: Bilan du stock de carbone organique du sol avec considération du décalage des sites	VI

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Sites de prélèvement.....	7
Carte 2 : Carte pédologique d'Antsirabe d'après Zebrowski et Ratsimbazafy (1979).....	11
Carte 3 : Répartition des sites d'étude du projet BIOVA par rapport à la « feuille Antsirabe »	15
Carte 4 : Carte de distribution des stocks de carbone organique du sol sur 0-30cm	32
Carte 5 : Carte de distribution des stocks de carbone organique du sol sur 100 cm	32
Carte 6 : Décalage observé entre les anciens sites de prélèvement et les sites actuels.....	40
Carte 7 : Distribution spatiale des stocks de carbone du sol de la région d'Antsirabe sur 0-30cm avec considération du décalage	44
Carte 8 : Distribution spatiale des stocks de carbone du sol de la région d'Antsirabe sur 100cm avec considération du décalage	44

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma simplifié du dispositif de prélèvement	17
Figure 2: Distribution verticale du stock de carbone organique du sol.....	26
Figure 3: Distribution verticale du stock de carbone organique des différents types de sol	29
Figure 4: Effets du décalage des sites sur l'étude de la variabilité temporelle.....	46

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Dispositif de prélèvement des échantillons de sol au cylindre.....	17
Photo 2: Echantillons prélevés à la tarière.....	17
Photo 3: Sols séchés à l'air dans la serre	18
Photo 4: Tamisage à 2mm et broyage à 0,2mm des échantillons de sol.....	18
Photo 5: Echantillons de sol dilués avec de l'eau distillée	19
Photo 6: Titrateur Crison pour titrer l'excès de dichromate.....	19

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Liste exhaustive des catégories de sol de la feuille d'Antsirabe et leurs proportions	12
Tableau 2: Types de sols observés au niveau des sites d'étude et leurs proportions	24
Tableau 3: Types de sols observés au niveau des sites d'étude du projet BIOVA et leurs proportions	25
Tableau 4: Stocks de carbone organique suivant les types de sol.....	27
Tableau 5: Stocks de carbone des sols ferrallitiques sur 30 cm et sur 100 cm	30
Tableau 6 : Stocks de carbone au temps ancien (Mg/ha).....	33
Tableau 7 : Bilan du stock de carbone organique du sol	35
Tableau 8: Changement dans la classification suivant les types de sol des sites décalés	39
Tableau 9: Stocks totaux de C(en Tg) pour 0-30 cm et 0-100 cm avec considération du décalage des sites	43
Tableau 10: Vérification des hypothèses	47

LISTE DES UNITES ET SYMBOLES CHIMIQUES

°C	: degré Celsius
C	: carbone
CO ₂	: dioxyde de carbone
DD	: degré décimal
g	: gramme
Gg	: gigagramme (1Gg = 10 ⁹ g)
GtC	: milliards de tonnes de carbone
h	: heure
H ₂ SO ₄	: acide sulfurique
ha	: hectare
kg	: kilogramme
m	: mètre
Mg	: mégagramme (1 Mg = 1 tonne = 10 ⁶ g)
ml	: millilitre
mn	: minute
Tg	: téragramme (1Tg = 10 ¹² g)

GLOSSAIRE

- **Adaptation aux changements climatiques** : adaptation des systèmes naturels ou humains aux stimuli climatiques réels ou prévus ou à leurs effets, de façon à atténuer leurs inconvénients ou à tirer parti de leurs avantages (GIEC, 2001).
- **Atténuation aux changements climatiques** : intervention de l'homme visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre en provenance des sources ou à renforcer leurs absorptions par les puits (GIEC, 2001).
- **Cartographie** : réalisation et édition de tout type de cartes et de plans géographiques (Microsoft Encarta, 2009).
- **Changement climatique** : variation de l'état du climat, que l'on peut déceler par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus (GIEC, 2007).
- **Différence** : écart quantitatif (entre au moins deux valeurs) (Microsoft Encarta, 2009).
- **Discrétisation** : classification de données statistiques en un nombre limité de classes, définies à partir de calculs mathématiques ou de choix arbitraires (<http://sig-pour-tous.forumactif.com>).
- **Gaz à effet de serre** : gaz qui absorbent une partie des rayons solaires en les redistribuant sous la forme de radiations qui rencontrent d'autres molécules de gaz, répétant ainsi le processus et créant l'effet de serre, d'où augmentation de la chaleur (GIEC, 2007).
- **Horizon** : couche plus ou moins horizontale dans la coupe verticale d'un sol ou profil, qui se distingue par ses caractéristiques : texture, structure, couleur, consistance, etc. (<http://mcarpenter.chez-alice.fr/SOL.htm>).
- **Pool de carbone / pool / réservoir**. Système capable d'accumuler ou de libérer du carbone Exemples : biomasse forestière, produits du bois, sols et l'atmosphère. (GIEC, 2006).
- **Puits** : tout processus, activité ou mécanisme qui élimine de l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol, ou un précurseur d'un gaz à effet de serre. Indiqué dans les étapes finales de la notification par le signe moins (-) (GIEC, 2007).
- **Refus** : éléments supérieurs à 2 mm de diamètre (Collinet, 1969).
- **Séquestration** : processus qui consiste à augmenter la teneur en carbone d'un pool de carbone autre que l'atmosphère. . (Parker et *al.*, 2009)
- **Sol** : partie superficielle de l'écorce terrestre, naturellement meuble ou ameublie par suite de l'altération des roches, souvent différencié en couches distinctes ou horizons, se distinguant de la roche-mère qui leur a donné naissance et les une des autres par certains caractères morphologiques, physiques, chimiques et biologiques (<http://mcarpenter.chez-alice.fr/SOL.htm>).

- **Source** : tout procédé, activité ou mécanisme qui libère dans l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre. Indiqué dans les étapes finales de la notification par le signe plus (+) (GIEC, 2007).
- **Stock de carbone** : masse de carbone par unité de surface. Il s'exprime en [T / ha] (Biëlders et *al.*, 2013) ; quantité absolue de carbone que renferme un réservoir à une période donnée (IPCC, 2007).
- **Stockage** : processus de rétention du CO₂ piégé de façon à ce qu'il ne puisse pas atteindre l'atmosphère (GIEC, 2007).
- **t₀** : se réfère au temps initial, en l'occurrence, à celui des prélèvements des échantillons de sol par Zebrowski et Ratsimbazafy en 1974
- **t₁** : se réfère au temps présent, plus exactement à l'époque de conduite de la présente étude (prélèvements d'échantillons de sol et analyse de ces échantillons effectués entre février et mars 2014)
- **Variabilité** : caractère changeant prévisible mais difficile à évaluer statistiquement (Microsoft Encarta, 2009).
- **Variation** : écart d'amplitude ou d'intensité (rapportés ou non à un état de référence) (Microsoft Encarta, 2009).

PARTIE 1 : INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le changement climatique (CC) est un des problèmes majeurs auxquels le monde d'aujourd'hui est confronté. L'augmentation de la température, la perturbation des saisons et l'intensification des catastrophes naturelles telles que les cyclones, les inondations et la sécheresse sont autant de problèmes engendrés par ce phénomène (GIEC, 2011). Le CC risque ainsi d'accentuer la faim et la malnutrition dans le monde et constitue une menace importante pour la sécurité alimentaire mondiale (FAO, 2007). Dans ce contexte, le sol apparaît comme étant une ressource essentielle de par son fort potentiel d'atténuation du CC.

Le sol assure, en effet, de nombreuses fonctions écosystémiques vitales (FAO, 2010). Parmi elles, figure la régulation climatique via la fixation de carbone (C), un des principaux gaz à effet de serre (GES) responsables du CC. Le compartiment sol, jusqu'à un mètre de profondeur, contient en effet 1580 gigatonnes de C (GtC), soit l'équivalent de la moitié des stocks de carbone dans tous les compartiments terrestres réunis à savoir l'atmosphère, la biomasse terrestre et le sol lui-même (GIEC, 2007). Le carbone stocké s'y retrouve principalement sous forme organique dans la matière organique du sol (MOS) qui, en sus de sa contribution effective à l'atténuation du CC, est aussi favorable au maintien des productivités agricoles.

Mais, le carbone organique du sol (COS) ne reste pas indéfiniment dans la MOS. Il finit par retourner à l'état de CO₂ atmosphérique après un temps de résidence extrêmement variable, allant d'une année (dans la matière organique fraîche) à près d'un millénaire (dans l'humus stable) (Balesdent, 1996 In Quenea, 2004). Par ailleurs, certains modes d'usage des terres et de gestion des sols peuvent induire une perte de COS ainsi qu'une dégradation résultante des terres, ce qui pourrait remettre en cause la continuité de ces services écosystémiques rendus par les sols (FAO, 2007). Cette remise en question a davantage lieu d'être dans des pays comme Madagascar, caractérisé par une multitude de facteurs variables, entre autres d'ordre bioclimatique, édaphique, agronomique. Les sols y subissent, en outre, de fortes pressions en raison de la forte croissance démographique et du besoin d'augmentation de la production agricole (MEEFT et PNUE, 2007 ; Rasolofonirina et Ratohiarijaona, 2009). Ceci peut entraîner une dégradation des sols et influencer sur la stabilité environnementale, économique et sociale (FAO, 2010).

Améliorer les connaissances sur le COS serait, de ce fait, primordial pour gérer durablement la ressource sol et aménager le territoire dans l'optique d'un développement durable. Par ailleurs, la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), adoptée en 1992 et ratifiée par 192 pays, incombe aux gouvernements de ces pays de communiquer un inventaire du COS en considérant trois niveaux de précision (Tier 1 à 3) qui relèvent des échelles internationale, nationale et locale (Nabuurs et *al.*, 2003 In PEERS-CarSoM, 2012). La spatialisation des services écosystémiques, en plus de leur quantification, est aussi préconisée par les grands programmes internationaux d'observation des écosystèmes, tels que le Millenium Ecosystem Assessment (MEA),

REDD (Réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts) et REDD+ pour permettre la mise en œuvre des pratiques et des politiques de gestion environnementale plus adaptées (Le Clec'h et *al.*, 2013).

L'investigation du COS peut toutefois s'avérer être délicate. L'absence de méthodes standards pour le faire et l'existence d'une variabilité intrinsèque des sols constituent des contraintes majeures dans le cadre de l'inventaire des COS. Ils en résultent d'autres contraintes qui relèvent des questions d'ordre méthodologique concernant l'échantillonnage ainsi que les coûts des analyses en laboratoire. Pourtant, les mesures et recommandations internationales préconisent les investigations qui puissent fournir des connaissances fiables en vue d'une meilleure gestion du COS du sol (PEERS-CarSoM, 2012).

Madagascar, en tant que pays ayant ratifié la CCNUCC, est tenu de communiquer un inventaire national des émissions d'origine anthropique selon des sources et des puits de tous les GES. Il a publié sa deuxième communication nationale en 2011 via l'utilisation des données standards au niveau international (Tier 1). Un premier inventaire du COS à Madagascar au 1/1 000 000^{ème} a également été effectué par la collaboration LRI-FOFIFA-IRD (Grinand et *al.*, 2009). Cet inventaire a été réalisé à partir d'une base de données sur le sol et le COS de Madagascar (base de données ValSolMada), résultant des travaux pédologiques de terrain menés depuis 1946 dans la Grande-île.

Néanmoins, les investigations du COS à Madagascar sont restées insuffisantes, particulièrement à l'échelle régionale. Une mise à jour des données anciennes déjà disponibles sur le COS dans une région donnée serait toute aussi utile. C'est dans ce contexte que s'insère cette étude sur l'inventaire régional du COS associé à l'étude de sa variabilité spatiale et temporelle. Mais concrètement, ***comment appréhender la variabilité spatio-temporelle du COS à l'échelle d'une région?***

La présente étude entend y donner des éléments de réponses, en mettant en exergue la variabilité, dans le temps et dans l'espace, du C du sol d'Antsirabe et ses environs, une région à vocation agricole et parmi les plus peuplées de Madagascar. Cette région figure également parmi celles qui disposent déjà de données anciennes sur le COS. Elle a été orientée vers l'analyse en deux temps des stocks de COS et vers l'étude de la variabilité des stocks dans l'espace suivant le type de sol et suivant la profondeur, en passant par la cartographie des stocks de C à cette échelle. Il a été supposé que les stocks de COS varient d'une part dans le temps, et d'autre part, dans l'espace suivant la variabilité verticale (suivant la profondeur) et la variabilité pédologique.

Pour sa part, cet écrit de recherche sera subdivisé en trois parties. La première sera consacrée aux méthodes adoptées et aux matériels utilisés dans le cadre des travaux de terrain, des analyses et du traitement des données collectées. La deuxième partie développera les résultats obtenus à l'issue de cette étude. La troisième partie relèvera des discussions émanant de ces résultats et des méthodes adoptées afin d'en déduire des recommandations pragmatiques, principalement d'ordre méthodologique pour des études ultérieures

PARTIE 2 : METHODOLOGIE

PARTIE 2 : METHODOLOGIE

1. Problématique et hypothèses

1.1. Problématique

Le stockage du carbone dans la MOS fait intervenir plusieurs facteurs interdépendants et complexes qui peuvent être tout aussi important pour appréhender la variabilité du COS.

En effet, outre les facteurs édaphiques tels que la structure et la texture du sol, les déterminants du stockage de la MOS concernent aussi bien les facteurs bioclimatiques, comme la température, les précipitations et la végétation, que les facteurs agronomiques comme le système de culture, le niveau de restitution organique, le travail du sol et la fertilisation (Feller, 2008).

L'évaluation de la quantité de COS de Madagascar, réalisée pour la première fois en 2009 par Grinand *et al.*, a été faite selon les principaux modes d'occupation du sol présents dans le pays. Cette étude, menée à l'échelle nationale, a permis d'établir une carte de C qui reflète de façon sommaire la répartition et la variabilité des stocks de C sur l'île (Grinand *et al.*, 2009).

Des études ultérieures, menées à l'échelle locale, ont considérés d'autres facteurs susceptibles d'être à l'origine de la variabilité de ces stocks. Celle de Rakotonarivo (2010) a ainsi analysé la variabilité des stocks de COS selon la distribution altitudinale et le mode d'usage des terres en climat tropical humide et semi-aride dans la région de Taolagnaro, et celle d'Andriamihaja (2011) a évalué les stocks de COS dans la région d'Ambohitantely suivant les modes d'utilisation des terres et la position topographique.

Ces études ont donné des informations pratiques vis-à-vis de la variabilité spatiale du COS et des facteurs responsables de cette variabilité. Mais aucune d'entre elles n'a exploré la variabilité dans le temps qui est pourtant également nécessaire pour une meilleure gestion du COS et des sols en général. Il en est de même pour la variabilité des stocks de COS à l'échelle régionale.

La problématique soulevée dans la présente étude consiste donc à savoir « **Comment appréhender la distribution spatiale et la variabilité temporelle du carbone du sol à l'échelle d'une région ?** ».

Subséquemment, cette étude se propose de déterminer la variabilité du stock de C des sols malgaches, idéalement sur une profondeur de 100 cm, dans l'optique de développer une méthodologie pouvant être adoptée dans d'autres régions de Madagascar pour quantifier le COS, étudier son évolution et sa distribution dans l'espace.

Spécifiquement, les questions de recherche s'énoncent :

- Comment se présentent la variabilité spatiale du C du sol, sur des sites de prélèvement déjà existants dans la base de données ValSolMada, ainsi que sa répartition dans l'espace à l'échelle de la zone d'étude ?
- Comment se présente la variabilité temporelle du C du sol à cette échelle ?

1.2. Hypothèses

Les hypothèses à vérifier se subdivisent comme suit :

- Hypothèse 1 : Les stocks de COS présentent une variation dans l'espace.
 - o Sous-hypothèse 1.1 : Les stocks de COS présentent une variation dans l'espace suivant le type de sol.

Les stocks de COS sont conditionnés par la quantité de matière organique, le processus de décomposition de la MOS et la teneur en argile (en %) du sol (Zinn et *al.*, 2005 ; Feller et Beare, 1997 ; Feller et *al.*, 1991, Boissezon, 1973). Les conditions de décomposition de la MOS devraient être pratiquement les mêmes pour une échelle locale voire régionale étant donné la faible variation des facteurs climatiques à cette échelle. L'apport de matière organique dépend principalement du mode d'usage des sols, et éventuellement, des pratiques agronomiques. Ainsi, pour des sols de même mode d'usage, les variations du stock de COS seraient principalement dues à la différence en termes de teneur en argile et donc du type de sol.

Par ailleurs, la distribution des stocks de carbone à l'échelle de Madagascar est directement liée aux types de sols (Grinand, 2009). Il est ainsi possible d'envisager que cette affirmation puisse rester valable à l'échelle régionale.

- o Sous-hypothèse 1.2 : Les stocks de COS présentent une variation dans l'espace suivant la profondeur.

Généralement, l'ensemble de la MOS se trouve dans le premier mètre du sol (Locatelli, 1999). La teneur en matière organique du sol décroît avec la profondeur (Verneyre, 2007). En outre, dans le cadre de son étude, Arrouays et *al.*, (2003) ont montré l'existence d'une variation des stocks de COS de la surface vers la profondeur. Tout ceci permet de supposer que les stocks de COS à l'échelle de la région d'Antsirabe peuvent présenter une variation dans l'espace suivant la profondeur.

- Hypothèse 2 : Les stocks de COS varient avec le temps.

La MOS est considérée comme une forme très instable, en perpétuelle évolution. Le C organique de la MOS finit, tôt ou tard, par retourner à l'état de CO₂ atmosphérique après la décomposition de la matière. Le temps de résidence du carbone dans le sol est néanmoins très variable. Il va d'une année, pour la MO fraîche, à plus d'un millénaire pour l'humus stable (Parton et *al.*, 1993; Balesdent, 1996 In Quenea, 2004).

Mais si la teneur en carbone du sol dépend des principaux facteurs à long terme de la formation du sol, elle peut aussi être fortement modifiée, dégradée ou améliorée par les changements d'utilisation du sol et la gestion du sol (FAO, 2002). Les conditions de gestion des écosystèmes sol-plante conditionnent leurs aptitudes à être une source de CO₂ (lorsqu'ils séquestrent du CO₂ atmosphérique) ou un puits (lorsqu'ils en émettent). Une modification du mode d'usage des sols

dans le temps est donc susceptible d'entraîner une variation du stock dans le sens d'une augmentation si la pratique est plus séquestrante (agriculture de conservation, « Agroécologie ») ou de réduction si au contraire le mode d'usage favorise l'émission de C (déforestation).

2. Milieu d'étude

3.1. Présentation de la zone d'étude

a) Situation géographique et administrative

La zone d'étude correspond à la zone d'intervention de Zebrowski et Ratsimbazafy en 1979 qui a servi à l'élaboration de la carte pédologique d'Antsirabe et ses alentours.

Cette zone d'étude, correspondant à la « feuille Antsirabe (N49) », est incluse dans la région Vakinankaratra qui est située au sud d'Antananarivo et qui s'étend sur une superficie de 19205.km² (PRDR Vakinankaratra, 2007). Elle est comprise entre 19°36' et 20° de latitude Sud et entre 46°48' et 47°06' de longitude Est. Elle occupe une superficie de 1315,59 km² et englobe une partie des districts de Faratsiho, Betafo, Antsirabe I et Antsirabe II.

b) Géomorphologie et types de sol

Le relief est accidenté avec une prédominance des massifs montagneux à pentes fortes qui présentent des phénomènes d'érosion et de rajeunissement intenses des sols.

Cette région est constituée par trois ensembles géologiques : le socle cristallin, le massif volcanique et les alluvions volcano-lacustres.

Le socle cristallin constitue les parties ouest et sud de la feuille. Il est constitué de schistes cristallins (socle migmatitique, micaschistes et quartzites) et de roches éruptives (essentiellement granites et gabbros). Les migmatites et migmatites granitoïdes constituent une grande partie des affleurements du socle, notamment dans le sud de la zone étudiée. Les granites occupent une importante surface au nord-ouest de la carte où ils forment le massif des Vavavato. Au sud de Betafo, ils constituent le massif de l'Andaingo. Les gabbros forment des massifs peu importants au nord-est de Betafo.

Le massif volcanique est observé dans la partie nord-est. La détermination exacte des roches n'étant pas toujours possible, seul le caractère acide ou basique des roches a été apprécié.

Les sédiments volcano-lacustres occupent la partie centre-est de la feuille (Zebrowski et Ratsimbazafy, 1979).

Les types de sols observés sont : les sols ferrallitiques fortement à moyennement désaturés, les sols peu évolués, les andosols, les sols minéraux bruts et les sols hydromorphes.

c) Climat

La région d'Antsirabe est caractérisée par un climat tropical à saison sèche plus ou moins marquée suivant l'altitude notamment dans les parties élevées de l'est et du centre (Antanifotsy, Antsirabe I et Antsirabe II, Faratsiho, Ambatolampy). La température est très modérée toute l'année avec des minima négatifs fréquents. La température moyenne annuelle régionale est d'environ 17°C avec une moyenne maximale de 25°C (octobre à novembre) et une minimale de 5°C (en juin). Les gelées sont fréquentes à Faratsiho, à Antsirabe, à Ambatolampy et à Antanifotsy. La pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 1300 mm. Elle décroît d'Est en Ouest (PRDR Vakinankaratra, 2007).

d) Unités de végétation

Cette région correspond globalement à des zones agropastorales qui laissent place en certains endroits à des reboisements productifs de pins (*Pinus patula*, *Pinus merkusii* (PINACEAE)) et d'eucalyptus (*Eucalyptus robusta* (MYRTACEAE)).

Le paysage est aussi composé par :

- des savanes herbeuses basses (*bozaka*) dominées par des graminées pérennes et cespiteuses comme *Pennisetum pseudotriticoides*, *Trachypogon spicatus* ou *Aristida rufescens* (GRAMINEAE);
- des jachères plus ou moins récentes, envahies par des espèces nitrophiles ou par des espèces qui vivent spontanément dans les sites fortement transformés par l'activité humaine telles que : *Euphorbia hirta* (EUPHORBIACEAE), *Cassia mimosoides* (CAESALPINIACEAE), *Rhynchelytrum repens*, *Cynodon dactylon*, *Eragrostis atrovirens*, *Alloteropsis semialata*, *Sporobolus pyramidatus*, *Digitaria longiflora* (GRAMINEAE) (Razafindramanana, 2011).

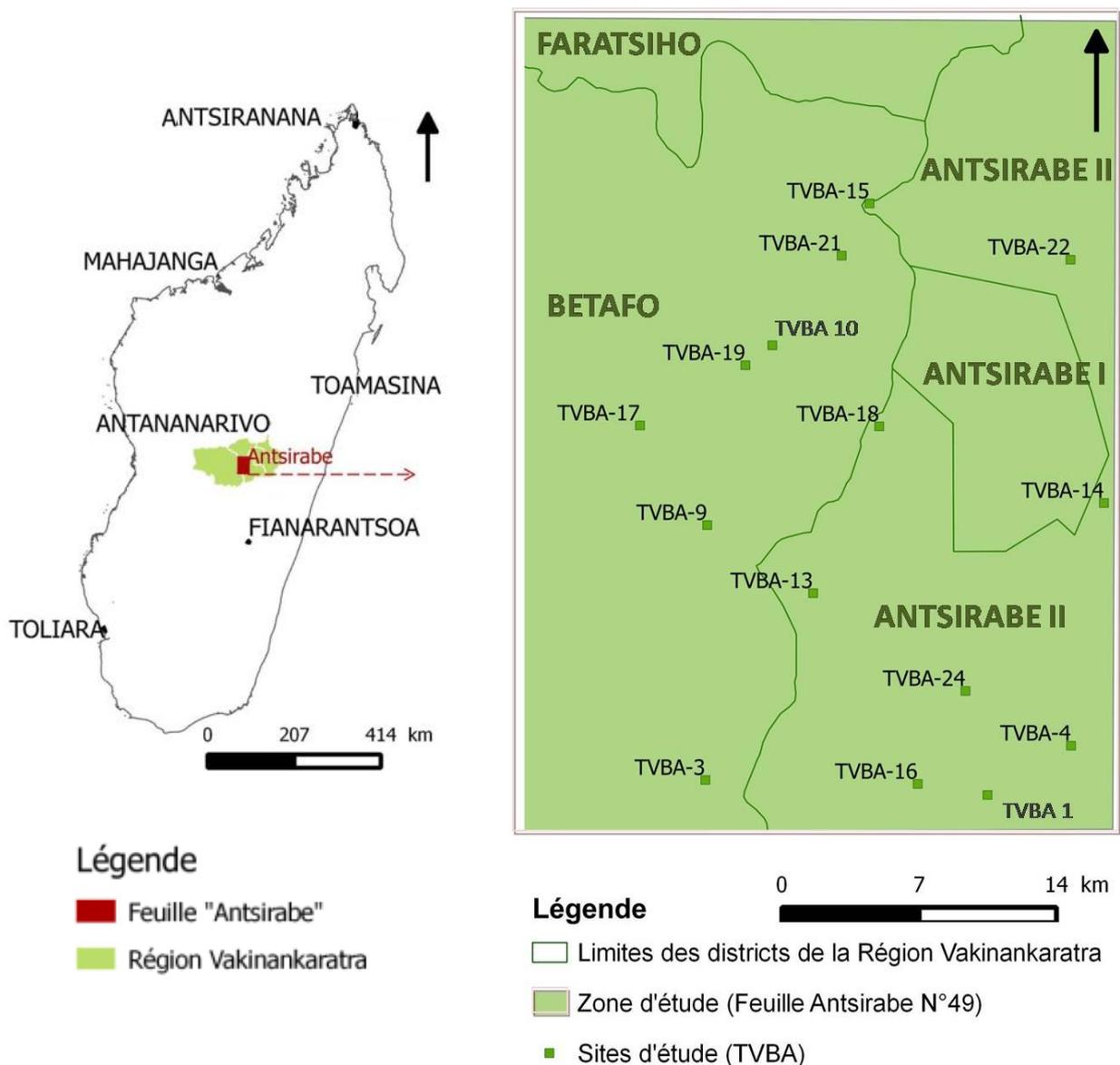
e) Milieu humain

La population de la région Vakinankaratra est caractérisée par une densité de 95 habitants/km² (en 2004) avec une prépondérance de ruraux (79,9 % en 2004). En 2005, 84,9% de la population travaillait dans l'agriculture dont 80% dans l'élevage (<http://www.antsirabe-tourisme.com/geographie.php>). L'agriculture est dominée par les cultures vivrières (riz, maïs, pomme de terre, manioc, patate douce, carotte et fruits) et les cultures industrielles (orge, tabac). L'élevage est plus orienté vers l'élevage porcin (production de viande) et l'élevage bovin (production laitière) (PRDR Vakinankaratra, 2007).

3.2. Présentation des sites d'étude

21 sites d'étude ont été utilisés par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) pour établir la carte pédologique d'Antsirabe à une échelle de 1/100 000.

Toutefois, seuls 15 sites sur les 21 ont été ré-échantillonnés en raison de l'inaccessibilité de certains sites compte tenu du mauvais état des pistes en saison des pluies (Razafimahatratra, 2014). Ils correspondent aux sites TVBA : 1 ; 3 ; 4 ; 9 ; 10 ; 13 ; 14 ; 15 ; 16 ; 17 ; 18 ; 19 ; 21 ; 22 et 24 (Carte 1). Ces sites correspondent à des parcelles carrées de 10 m de côté. Leurs coordonnées géographiques et leurs caractéristiques sont données en Annexe 1.



Carte 1 : Sites de prélèvement

Sources : Base de données 1/500.000 FTM (1998) et carte pédologique numérisée de la feuille Antsirabe
Auteur en 2014, adapté de Razafimahatratra, 2014

3. Etat des connaissances

3.1. Bases de données sur le sol et le carbone organique du sol

Les "prospections pédologiques" menées par les pédologues de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M), puis de l'IRD, en vue de l'élaboration des cartes des sols ont abouti à la production et à l'accumulation de données et d'informations en quantité abondante (Leprun et *al.*, 2010). Ces données accumulées ont permis à des Pédologues et Informaticiens de l'IRD de concevoir un modèle de la base de données, accessible sur le web (<http://miruram.mpl.ird.fr/valpedo/miruram/index.html>). Les outils développés ont été ensuite mis à la disposition des partenaires (ex. BUNASOL au Burkina Faso, Embrapa au Brésil, ValSolMada à Madagascar). Puis, des formations pour la prise en main de la BDD et des concepts d'organisation des données pour la saisie de l'information ont été effectuées (Beaudou et Le Martret, 2004).

A Madagascar, les travaux pédologiques menés depuis 1946, ont construit un patrimoine pédologique et environnemental considérable (PEERS-CarSoM, 2012). La base de données ValSolMada (BDD ValSol), un ensemble de données cartographiques et pédologiques dont des cartes, des rapports, des publications, résulte de ces soixante-huit années de travaux pédologiques de terrain à Madagascar. Ces données anciennes d'inventaires et cartographies des sols (Leprun et *al.*, 2010) ont servi de base à l'inventaire des COS à Madagascar effectué par Grinand et *al.* en 2009. En dépit des modifications de l'utilisation des sols depuis ce temps, ce premier inventaire des stocks de COS de Madagascar constitue une « ligne de base » acceptable pour tenter d'évaluer les modifications actuelles (PEERS-CarSoM, 2012). Ces outils ont donc permis de constituer une première version d'une base de données sur les sols de Madagascar (Brossard et Rajaonarivo, 2008).

Actuellement, un risque de perte de ce patrimoine est constaté, particulièrement pour les données anciennes. Pourtant, ces données sont pratiquement les seules données sols-environnement sur de nombreuses régions de Madagascar (Brossard et Rajaonarivo, 2008). Elles offrent un potentiel pour répondre aux besoins nationaux, régionaux ou locaux pour l'aménagement de la ressource « Sol » dans le cadre de la sécurisation alimentaire, mais aussi du changement climatique (PEERS-CarSoM, 2012).

3.2. Types de sols dans la région d'Antsirabe et leurs proportions

Les sols représentent 99,81 % de la superficie totale de la «feuille d'Antsirabe» qui s'étend sur une superficie réelle de 1315,59 km². Le reste (0,19 %) est occupé par des lacs (Tritrivakely, Andraikiba et Andranobe).

30 types de sol, pouvant être regroupés en cinq (5) principaux types, sont observés dans cette région d'après la carte pédologique d'Antsirabe réalisée par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979). Cette carte a été établie suivant l'ancienne classification française des sols de la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS) de 1967. Ce système de classification est basé sur la

description des processus de pédogenèse et les caractères des profils (Duchaufour, 1998 In Razafimahatratra, 2011).

Les parts respectives de ces 5 principaux types de sol dans la « feuille d'Antsirabe », en termes de superficie, sont cependant très inégalement réparties (tableau 1).

3.3.1. Sols ferrallitiques

Les sols ferrallitiques résultent de la phase terminale de l'évolution des sols de la région équatoriale humide et sans saison sèche (Razafimahatratra, 2011). Ils sont caractérisés par un profil A-B-C avec un horizon B de moins de 150 cm d'épaisseur et un horizon d'altération C qui peut atteindre quelques mètres d'épaisseur (Zebrowski et Ratsimbazafy, 1979). Ces sols peuvent être subdivisés en 2 sous-classes : les sols ferrallitiques fortement désaturés, qui représentent près de 90% de ces sols, et les sols ferrallitiques moyennement désaturés. Ces sous-classes peuvent encore être différenciées en groupes et sous-groupes : humifères, allitiques, rajeunis ou hydromorphes suivant que le processus de ferrallitisation ait été accompagné par des processus physico-chimiques ou mécaniques (accumulation humifère, allitisation, rajeunissement, remaniement et hydromorphie) (Razafimbelo, 2005). Les sols ferrallitiques représentent 60,53 % de la superficie totale de la « feuille d'Antsirabe ».

3.3.2. Sols peu évolués

Les sols peu évolués sont des sols à faible degré d'évolution et d'altération (Razafimahatratra, 2011). Ils possèdent un profil A-C avec un horizon A plus ou moins riche en matière organique et un horizon C qui présente souvent une altération de type ferrallitique (Razafimbelo, 2005). L'absence d'un horizon B ne permet cependant pas de les classer parmi les sols ferrallitiques. Les sols peu évolués de la région se distinguent en sols peu évolués humifères et en sols peu évolués non-climatiques suivant la teneur en matière organique de l'horizon A. Les sols peu évolués représentent 20,09 % de la superficie totale.

3.3.3. Sols hydromorphes

Les sols hydromorphes résultent d'un processus d'hydromorphie qui consiste en un engorgement permanent ou temporaire de toute ou partie du profil par l'eau, provoquant un déficit en oxygène et des phénomènes de réduction du fer. Ces sols bien qu'ils aient été à la base des sols ferrallitiques ne sont plus classés comme tel en raison de la prédominance du caractère hydromorphe. Les sols hydromorphes se distinguent en effet par un horizon G de couleur gris verdâtre, riche en fer ferreux, avec des taches de couleur rouille (fer ferrique) se formant au contact de l'oxygène encore présent dans la zone de battance de la nappe phréatique. Ils sont caractérisés par une accumulation de la matière organique. La sous-classe des pseudogley correspond à une hydromorphie temporaire de surface, celle des gley à une hydromorphie profonde permanente, celle des amphigley à une hydromorphie de surface et à une hydromorphie profonde à la fois (Razafimahatratra, 2011). La superficie occupée par les sols hydromorphes représente 9,27 % de la superficie totale de la feuille.

3.3.4. Sols minéraux bruts

Les sols minéraux bruts sont des sols à profil A-C. Ils peuvent être d'origine climatique (sous un climat très sec ou très froid pendant l'année empêchant l'évolution du sol), ou d'origine non-climatique comprenant les sols minéraux bruts d'érosion ou squelettiques et les sols minéraux bruts d'apport. Les sols minéraux bruts au niveau de la zone d'étude sont composés de lithosols sur socle cristallin, de lithosols sur roche volcanique et de lithosols sur cuirasse ferrugineuse. Ils occupent 7,21% de la superficie totale de la « feuille d'Antsirabe ».

3.3.5. Andosols

Les andosols sont des sols dont l'évolution est conditionnée par la présence d'une roche mère volcanique très altérable produisant des allophanes (produits mal cristallisés). Ils sont donc riches en produits amorphes silico-alumineux mais ils sont peu épais et sensibles à l'érosion. Les andosols se rencontrent dans des régions volcaniques sur des matériaux pyroclastiques basiques datant des émissions les plus récentes du volcanisme d'Ankaratra (Période III) (Zebrowski et Ratsimbazafy, 1979). Suivant la présence ou l'absence d'un horizon B-C intermédiaire, les andosols de la région d'Antsirabe se subdivisent en andosols peu différenciés (sans un horizon B-C) et en andosols différenciés (avec un horizon B-C). Les andosols ne représentent que 0,37 % de la superficie totale.

Remarque

Deux ou plusieurs types de sols, considérés par ailleurs en unités simples, peuvent être associés au niveau d'une région, donnant lieu à des unités cartographiques complexes.

Ces associations peuvent être :

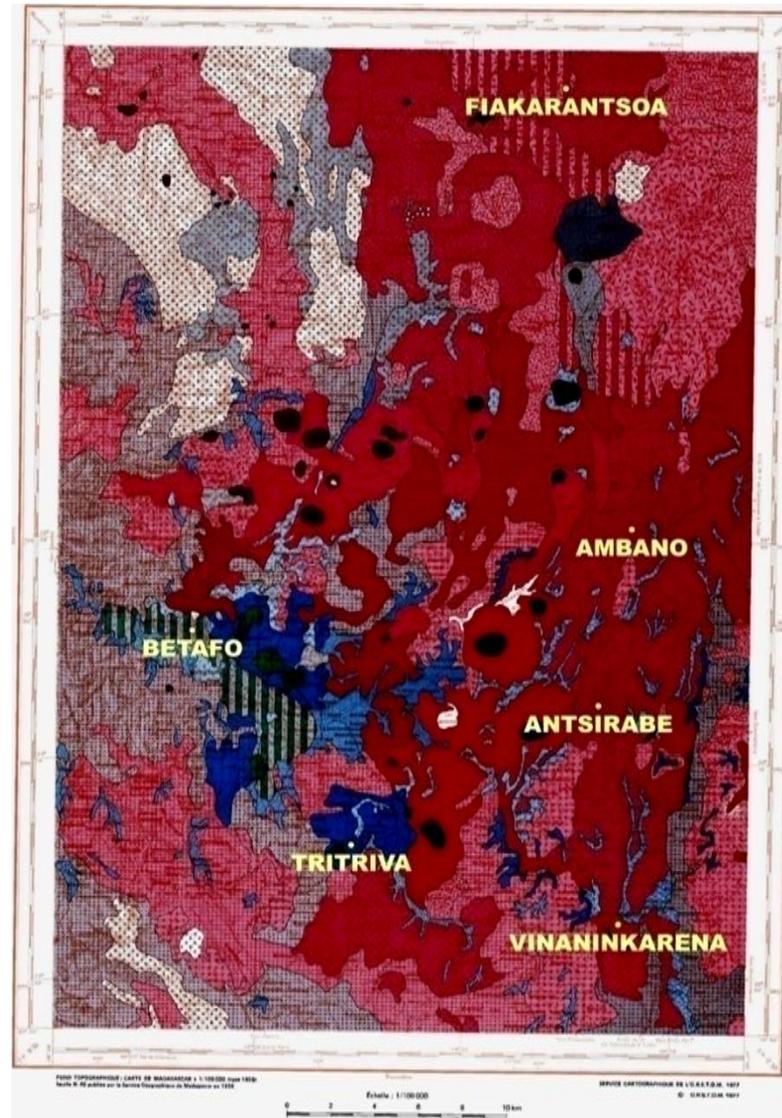
- *des séquences de sols* (avec une règle de répartition des sols dans l'espace), comme dans le cas du complexe « sol peu évolué d'origine non-climatique d'érosion sol lithique sur coulée volcanique (observés sur les sommets) + Andosols différenciés désaturés mélaniques sur matériaux pyroclastiques basiques (observés dans les creux ou vallons) » ;
- *ou des juxtapositions* (sans règle de répartition précise), dans le cas du complexe « sol des cônes volcaniques ».

Ces complexes occupent 2,35 % de la superficie totale de la « feuille d'Antsirabe ».



Légende

- Feuille "Antsirabe"
- Région Vakinankaratra



UNITÉS CARTOGRAPHIQUES COMPLEXES

- II 4 + IV 2
- X 7 + X 11
- Sols des cônes volcaniques
- Nombreux affleurements de roches
- Blocs de cuirasse démantelée

I - SOLS MINÉRAUX BRUTS D'ORIGINE NON CLIMATIQUE D'ÉROSION LITHOSOLS

- 1 Sur socle cristallin
- 2 Sur roche volcanique
- 3 Sur cuirasse ferrugineuse

II - SOLS PEU ÉVOLUÉS HUMIFÈRES RANKERS À MODER

- 1 Sur matériaux volcaniques associés à X 7

D'ORIGINE NON CLIMATIQUE D'ÉROSION REGOSOLIQUES

- 1 Sur matériaux pyroclastiques acides
- 2 Sur socle cristallin associés à X 11
- LITHIQUES**
- 4 Sur coulée volcanique
- HYDROMORPHES**
- 5 Sur socle cristallin

XI - SOLS HYDROMORPHES ORGANIQUES À TOURBE SEMI-FIBREUSE OLIGOTROPHES

- Sur matériaux volcaniques

MOYENNEMENT ORGANIQUES HUMIFIQUES À GLEY À ANMOOR ACIDE

- Sur alluvions récentes indifférenciées

PEU HUMIFÈRES À GLEY PROFOND

- Sur alluvions du socle associés à XI 4

À AMPHIGLEY À BATTEMENT DE NAPPE PHRÉATIQUE DE FORTE AMPLITUDE

- Sur alluvions du socle

À PSEUDO-GLEY DE SURFACE

- Sur sédiments volcano-lacustres
- Sur matériaux volcaniques

X - SOLS FERRALLITIQUES MOYENNEMENT DESATURÉS RAJEUNIS PAR APPORT ÉOLIEN

- Sur matériaux volcaniques basiques associés à X 13

ALLITIQUES HUMIFÈRES

- Sur coulées et matériaux pyroclastiques basiques associés à X 5

HYDROMORPHES

- Sur coulées et matériaux pyroclastiques basiques

FORTEMENT DESATURÉS TYPIQUES RAJEUNIS

- Sur matériaux volcaniques basiques

ALLITIQUES HUMIFÈRES

- Sur coulées et matériaux pyroclastiques basiques

Sur matériaux volcano-lacustres

- Sur matériaux pyroclastiques acides

AVEC ÉROSION ET REMANIEMENT

- Sur socle cristallin

RAJEUNIS MODAUX

- Sur matériaux volcaniques basiques

HUMIFÈRES

- Sur matériaux volcaniques basiques

Sur matériaux volcaniques acides

- Sur gabbro

AVEC ÉROSION ET REMANIEMENT

- Sur socle cristallin

à stone line proche de la surface

- à stone line en profondeur

IV - ANDOSOLS PEU DIFFÉRENCIÉS DESATURÉS MELANIQUES

- 1 Sur matériaux pyroclastiques basiques

DIFFÉRENCIÉS DESATURÉS MELANIQUES

- 2 Sur matériaux pyroclastiques basiques

Carte 2 : Carte pédologique d'Antsirabe d'après Zebrowski et Ratsimbazafy (1979)

Tableau 1 : Liste exhaustive des catégories de sol de la feuille d'Antsirabe et leurs proportions

Classes	Sous-classes	Groupes et sous-groupes	Codes	Superficie (%)	
Sols ferrallitiques	Sols ferrallitiques fortement désaturés	Sol ferrallitique fortement désaturé - allitique avec érosion et remaniement sur migmatites	SFFD-AER-M	55,03	60,53
		Complexe (17+21) sols ferrallitiques fortement désaturés allitiques humifères+ sols ferrallitiques fortement désaturés	SFFD-AH+SFFDR		
		Sol ferrallitique fortement désaturé, allitique humifère sur coulées basiques	SFFD-AH-CB		
		Sol ferrallitique fortement désaturé, allitique humifère sur matériaux pyroclastiques acides	SFFD-AH-MPA		
		Sol ferrallitique fortement désaturé, rajeuni avec érosion et remaniement, sur socle cristallin	SFFD-RER-SC		
		Sol ferrallitique fortement désaturé-rajeuni-humifère-sur gabbro	SFFD-RH-G		
		Sol ferrallitique-fortement désaturé-rajeuni humifère- sur matériaux volcaniques basiques	SFFD-RH-MVB		
		Sol ferrallitique fortement désaturé rajeuni modal sur matériau volcanique basique	SFFD-RM-MVB		
		Sol ferrallitique fortement désaturé, typique rajeuni, sur matériau volcanique	SFFD-TR-MV		
	Sols ferrallitiques moyennement désaturés	Sol ferrallitique moyennement désaturé en B, hydromorphe sur matériau volcanique	SFMD en B-H-MV	5,50	
		Sol ferrallitique-moyennement désaturé - allitique-humifère sur coulée volcanique basique	SFMD-A-H-CVB		
		Sol ferrallitique-moyennement désaturé rajeuni par apport éolien-sur matériau volcanique basique	SFMD-RAE-MVB		
	Sols peu évolués	Sols peu évolués humifères	Sol peu évolué humifère-ranker à moder sur matériaux volcaniques	SPE-H-RM-MV	
Sols peu évolués non-climatiques (+lithiques)		Sols peu évolués lithiques sur coulée volcanique	SPE-L-CV	19,46	
		Sol peu évolué non-climatique d'érosion hydromorphe sur socle cristallin	SPE-NC-EH-SC		
		Sol peu évolué-non-climatique -d'érosion régosolique-sur matériau pyroclastique acide	SPE-NC-ER-MPA		
		Sol peu évolué-non-climatique -d'érosion régosolique-sur socle cristallin	SPE-NC-ER-SC		

Classes	Sous-classes	Groupes et sous-groupes	Codes	Superficie (%)	
Sols hydromorphes		Sols hydromorphes humiques à gley à anmoor acide sur alluvions récentes indifférenciées	SH-HGAA-ARI	9,27	
		Sols hydromorphes organiques oligotrophes sur matériaux volcaniques	SH-OO-MV		
		Sols hydromorphes à pseudogley sur matériaux volcaniques	SH-PG-MV		
		Sols hydromorphes à pseudogley sur sédiment volcano-lacustre	SH-PG-SVL		
		Sol hydromorphe peu humifère à amphigley sur alluvions cristallines	SHPH-AG-AC		
		Sol hydromorphe peu humifère à gley d'ensemble sur alluvions cristallines	SHPH-GE-AC		
Sols minéraux bruts (Lithosols)		Lithosols sur cuirasse ferrugineuse	L-CF	7,21	
		Lithosols sur roches volcaniques	L-RV		
		Lithosols sur socle cristallin	L-SC		
Andosols	Andosols différenciés	Andosols différenciés désaturés mélaniques sur matériaux pyroclastiques basiques	ADDM-MPB	0,04	0,37
	Andosols peu différenciés	Andosols peu différenciés mélaniques sur matériaux pyroclastiques basiques	APDM-MPB	0,33	
Complexes		Complexe sols des cônes volcaniques	CSCV	2,35	
		Complexe (7+10) sol peu évolué d'origine non-climatique d'érosion sol lithique sur coulée volcanique (7) + Andosol	SPE-NC-E/SL-CV + ADDM-MPB		

Source : Zebrowski et Ratsimbazafy, 1979 In Razafimahatratra, 2014 adapté par l'auteur, 2014

4. Méthodes

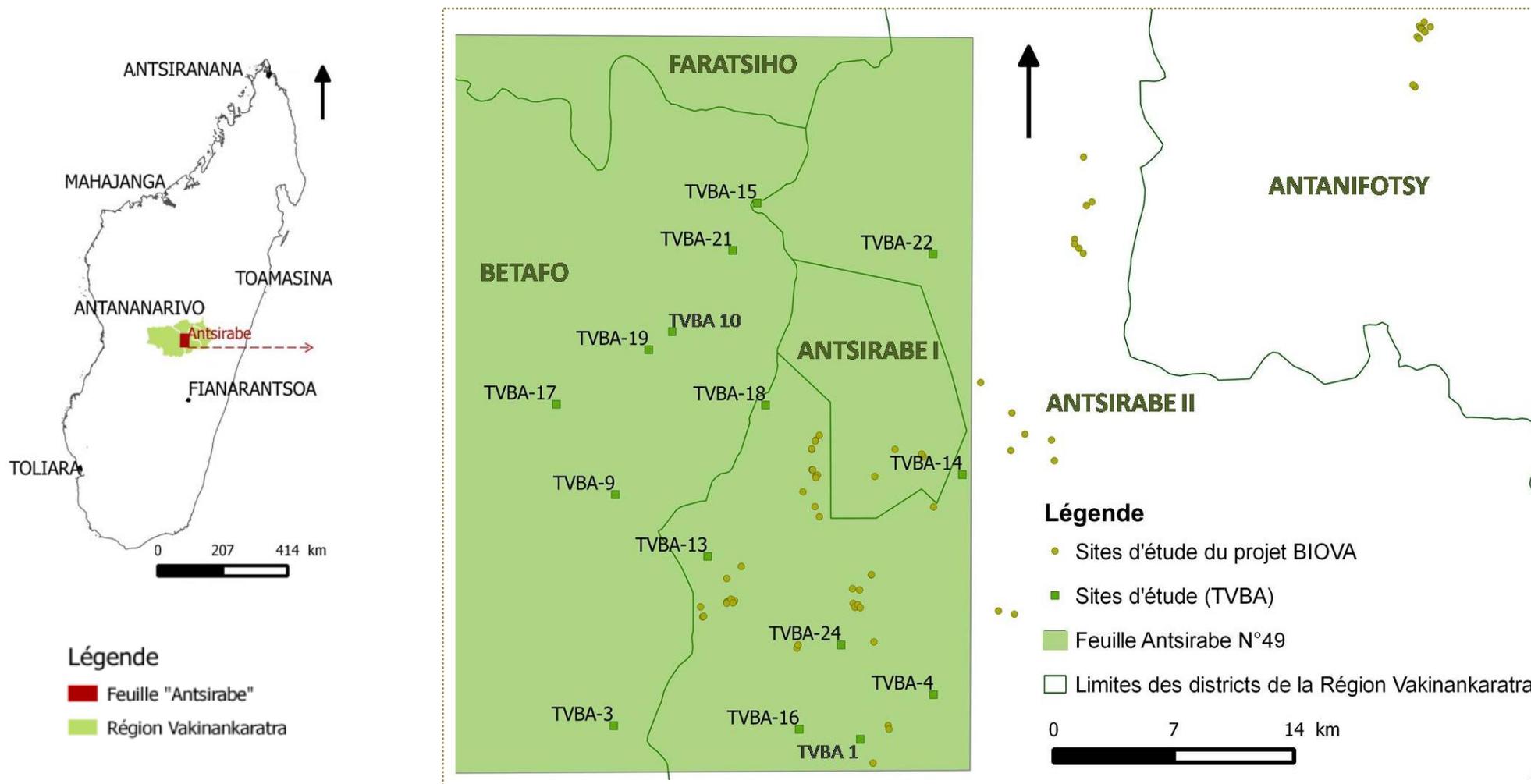
4.1. Traitement et analyse de la base de données ValSol

La base de données pédologiques sur les sols de Madagascar et leur environnement est composée par des données anciennes de nature extrêmement variée, dont notamment des données cartographiques et des données pédologiques de nombreuses régions de l'île (Beaudou et Le Martret, 2004 ; Brossard et Rajaonarivo, 2008). Les cartes pédologiques produites sont souvent accompagnées de notices explicatives. Celles-ci renferment des descriptions des sols, leurs contraintes édaphiques et leurs potentialités agricoles, leurs caractéristiques physico-chimiques et des données analytiques anciennes sur le carbone, le phosphore et des éléments-traces métalliques.

L'exploitation de cette BDD ValSol a donc constitué un préalable à la conduite de cette étude. Elle a été effectuée par Razafimahatratra et a consisté en la prise de connaissance des données anciennes disponibles (des données cartographiques, des données pédologiques dont des données analytiques anciennes sur le carbone) en vue de l'identification d'une zone propice à la conduite de la présente étude.

La consultation de cette BDD a ainsi permis d'identifier des sites ayant fait l'objet de prospection pédologique antérieure et disposant : de données analytiques anciennes sur le carbone, d'une carte pédologique à l'échelle 1/100.000 et où il est possible de refaire des prélèvements dans l'optique d'effectuer une analyse en deux temps du stock de COS. Parmi les sites répondant à ces critères, la région d'Antsirabe étudiée par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) a été choisie en raison de sa facilité d'accès. La feuille d'Antsirabe est la quatrième carte pédologique à l'échelle de 1/100.000 utilisant le découpage et les fonds topographiques de l'Institut Géographique National. Elle est associée à une notice explicative (notice n°83) contenant des descriptions des profils pédologiques sur 21 sites de prélèvement et des résultats d'analyses de certains éléments, dont le C organique, qui ont été effectués à cette époque au niveau de ces sites.

Les données pédologiques « récentes » (à partir des années 2000) n'ayant pas été encore intégrées dans cette BDD, une étude bibliographique orientée vers des études pédologiques récentes menées dans la zone d'étude a été effectuée en parallèle à l'exploitation de cette BDD pour étayer les informations disponibles. Des études en cours, menées dans le cadre du projet BIOVA (BIOmasses Végétales et Animales), ont également été considérées dans cette étude. Le projet se focalise sur le recyclage des biomasses végétales et animales dans les systèmes d'agriculture et d'élevage en vue de l'amélioration de l'alimentation des animaux et de la fertilité des sols de culture. La considération des résultats du projet BIOVA a été possible dans la mesure où la zone d'étude choisie pour la réalisation de ce projet se chevauche avec celle de la présente étude (Carte 3). Sur les 72 sites d'étude du projet BIOVA, 43 sites sont contenus dans la feuille Antsirabe. Leurs caractéristiques sont données en annexe 2.



Carte 3 : Répartition des sites d'étude du projet BIOVA par rapport à la « feuille Antsirabe »

Sources : Base de données 1/500.000 FTM (1998) et carte pédologique numérisée de la feuille Antsirabe

Auteur, 2014, adapté de Razafimahatratra, 2014

4.2. Etude pédologique

L'étude pédologique a été effectuée sur le terrain, dans le cadre d'une mission dirigée par Razafimahatratra, entre février et mars 2014.

Les travaux de terrain ont consisté à :

- la localisation à l'aide d'un GPS des sites de prélèvement mentionnés dans la BDD Valsol par le biais de leurs coordonnées géographiques ;
- la validation des sites par rapport à leurs descriptions dans la notice de la carte pédologique (type de sol, roche mère, couleur) ;
- les prélèvements d'échantillons de sol.

3 protocoles d'échantillonnages différents ont été adoptés pour l'ensemble des 15 sites.

Au niveau du premier site exploré : TVBA 22, les échantillons ont été prélevés avec des cylindres métalliques par horizon de 10 cm (0-10, 10-20, 20-30, 50-60, 80-90 cm) pour la mesure de la densité apparente (Da) du sol et les analyses futures au laboratoire (Photo 1). 2 répétitions sur les extrémités A et D d'un carré de prélèvement de 10 m x 10 m ont été réalisées (Figure 1).

Au niveau de 6 sites (TVBA 4;10;14;16;17;19), les prélèvements ont été effectués avec des cylindres métalliques jusqu'à 90cm. 2 répétitions de Da ont ainsi été faites. Les troisièmes répétitions sont entièrement constituées par des échantillons prélevés à la tarière (même profondeur que pour la Da) (Photo 2).

Au niveau des 8 autres sites (TVBA 1;3; 9;13;15;18;24;21), 3 répétitions de Da pour 0-10 , 10-20 et 20-30 cm et une seule pour 50-60 et 80-90 cm (extrémité A). Les 2 autres répétitions pour ces horizons 50-60 et 80-90 cm ont été obtenues par des échantillons prélevés à la tarière à ces mêmes profondeurs.

Les prélèvements d'échantillons de sol dans le cadre du projet BIOVA ont été réalisés sur 72 sites correspondants à des parcelles paysannes choisies en fonction de quatre critères : la dimension de la parcelle, la culture installée, l'apport de fertilisant et le type de sol. Les sites choisis correspondent ainsi à des parcelles de plantes fourragères, non encore fertilisées pour la saison de culture en cours et sur des sols ferrallitiques afin d'homogénéiser les sols de prélèvement (leurs caractéristiques) et ainsi faciliter l'interprétation des résultats. Les prélèvements d'échantillons de sol ont été effectués à l'aide d'un carottier à moteur (Atlas Copco Cobra TT de diamètre intérieur 8,9 cm) sur une profondeur de sol de 100 cm. Pour chaque site, quatre répétitions ont été effectuées sur chaque extrémité d'un carré de 10m de côté. Les cinq horizons prélevés sont 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 50-60 cm et 80-90 cm.

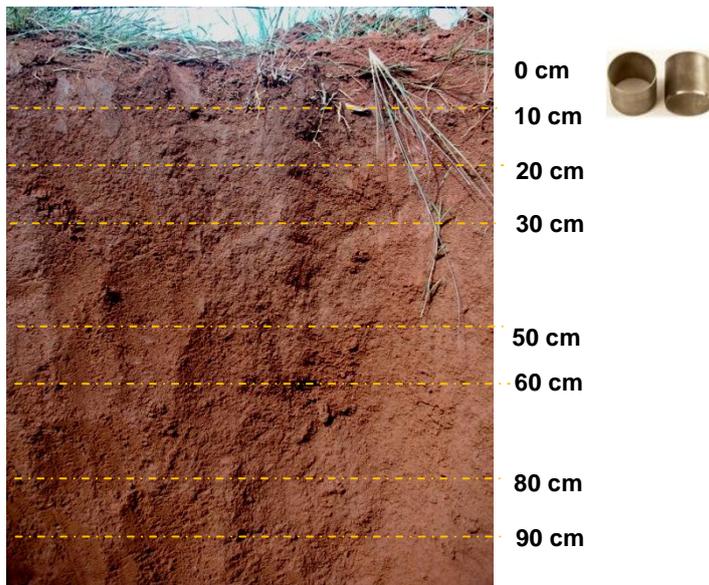


Photo 1: Dispositif de prélèvement des échantillons de sol au cylindre
Cliché de Razafimahatratra, 2014.



Photo 2: Echantillons prélevés à la tarière
Cliché de Razafimahatratra, 2014.

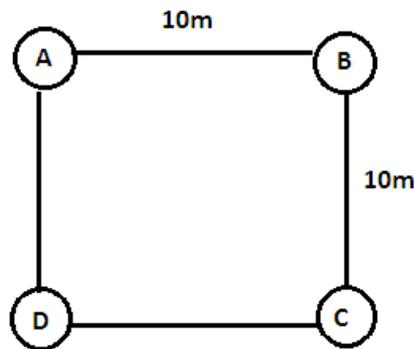


Figure 1: Schéma simplifié du dispositif de prélèvement

4.3. Observations et enquêtes

Les informations recueillies sur les sites d'étude ont trait à l'historique des modes d'usage des sols. Elles ont été recueillies à travers des entretiens auprès des propriétaires des parcelles et/ou de la population riveraine. Des photos du paysage et des échantillons de sol sur 100 cm ont également été prises (Razafimahatratra, 2014).

4.4. Expérimentation

4.4.1. Préparation des échantillons à analyser

Les échantillons destinés au laboratoire sont soumis au préalable à différents traitements. Ils sont d'abord pesés pour déterminer leur poids à l'état humide. Puis une fraction représentative de l'échantillon est séchée à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Celle-ci est obtenue après 48h. La différence entre le poids avant et après séchage exprime la teneur en eau de l'échantillon initial. Les échantillons sont ensuite séchés à l'air dans une serre avant d'être broyé (photo 3). Les mottes de terre sont d'abord réduites par pilage avant de passer sur un tamis de 2mm de mailles (photo 4). Tout

élément retenu par le tamis, est considéré comme du refus ($d > 2 \text{ mm}$). Les refus sont pesés et retirés de l'échantillon initial qui sera broyé dans un mortier jusqu'à obtention de terre fine de $0,2\text{mm}$.

Concernant les échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet BIOVA, des échantillons composites ont été réalisés au préalable en mélangeant les sols prélevés sur un horizon identique au sein d'une parcelle. Les analyses en laboratoire ont été effectuées uniquement sur les échantillons composites des horizons de surface (0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm).



Photo 3: Sols séchés à l'air dans la serre



Photo 4: Tamisage à 2mm et broyage à 0,2mm des échantillons de sol



4.4.2. Dosage du carbone organique

Les analyses en laboratoire, dans le cadre de cette étude, ont été réalisées au LRI. Elles ont consisté au dosage du C organique dans 217 échantillons de sol (permettant en général 3 répétitions intra-sites) en vue de déterminer leur teneur en C. La méthode « Walkley-Black » (1934) a été utilisée pour ce faire. Par cette méthode, la matière organique est oxydée sans chauffage externe par une solution sulfurique de dichromate de potassium. L'excès de dichromate est ensuite dosé par le sel de Mohr. Dans la pratique, une prise d'essai P de 0,25 à 5 g de sol selon sa teneur en matière organique présumée, est dosée avec 10 ml de l' H_2SO_4 concentré et 5 ml de dichromate de potassium si $P < 0,5\text{g}$ ou 10 ml si $P > 0,5\text{g}$. Après 30 mn, le mélange est dilué avec 100 ml d'eau distillée (photo 5) puis le résultat est lu sur le titrateur Crison. La valeur donnée par le titrateur correspond au volume de la descente de sel de Mohr nécessaire pour doser l'excès de dichromate (photo 6).

Les résultats sont corrigés par un facteur d'humidité étant donné que la prise d'échantillon se fait sur un sol sec à l'air qui contient toujours une humidité résiduelle alors que les résultats des analyses de sols sont exprimés par rapport à un sol sec à 105°C .

Les analyses de la teneur en C des échantillons au temps de Zebrowski et Ratsimbazafy ont été faites au laboratoire des sols du Centre O.R.S.T.O.M d'Antananarivo, organisme aujourd'hui remplacé par l'IRD (Institut de recherche pour le développement). La méthode utilisée pour ce faire à cette époque a été la méthode de Anne (1945). Cette méthode consiste en une oxydation à chaud (à ébullition pendant 5mn) de la matière organique par du bichromate de potassium en milieu

sulfurique. Le bichromate doit être en excès, la quantité réduite est, en principe, proportionnelle à la teneur en carbone organique. L'excès de bichromates de potassium est titré par une solution de sel de Mohr en présence de diphénylamine (Dabin, 1970).

Les analyses des teneurs en C totaux des échantillons de sol du projet BIOVA ont pour leur part été effectuées à Montpellier SupAgro (Cirad-INRA-IRD). Les teneurs en C ont été déterminés par un microanalyseur élémentaire CHN (Carlo Erba NA 2000) après combustion par voie sèche. La méthode consiste à analyser le C – et éventuellement l'azote (N) et l'hydrogène (H) – contenus dans des aliquotes d'échantillons de sol broyés à 0,2 mm par chromatographie en phase gazeuse.

Pour ce faire, des échantillons, de poids inférieur à 100mg, sont pesés au 1/10 de mg, mis dans des capsules en étain et passés dans un four (à 1050°C) en condition oxydante. Le carbone et l'azote des échantillons sont transformés respectivement en CO₂ et divers oxydes d'azote réduit en azote moléculaire. Les gaz ainsi obtenus sont dosés par chromatographie en phase gazeuse. Les éléments C et N sont dosés simultanément et rapidement. Le C total de l'aliquote dosé représente le C organique étant donné que les sols ne sont pas carbonatés (Razafimbelo, 2005).



Photo 5: Echantillons de sol dilués avec de l'eau distillée



Photo 6: Titrateur Crison pour titrer l'excès de dichromate

4.5. Traitement et analyses des données

4.5.1. Calcul des stocks de carbone organique du sol

➤ Densité apparente

La densité apparente du sol, paramètre indispensable pour calculer le stock de carbone, est obtenue par la formule suivante :

$$Da \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{masse sèche de l'échantillon (g)}}{\text{volume de l'échantillon à l'état humide (cm}^3\text{)}}$$

La masse sèche est obtenue par soustraction de la masse de l'humidité de l'échantillon sur sa masse fraîche. Le volume de l'échantillon correspond à celui du cylindre utilisé pour le prélever, soit un volume égal à 500 cm³.

➤ **Teneur en carbone organique du sol**

La teneur en COS correspond à la quantité de C contenu dans une masse de sol donnée (Biielders et *al.*, 2013). Il s'exprime souvent en [%o] ou en [g de C / 1000 g de sol]. La teneur en carbone est obtenue par la formule suivante :

$$C (\%) = (V_t - V_s) \times \frac{19,5}{V_t} \times \frac{1}{P}$$

Avec C (g.kg⁻¹) : poids de carbone en g pour 1 kg de sol (g/kg)

V_t : volume de sel de Mohr 0,5 N en ml pour le témoin

V_s : volume de sel de Mohr 0,5 N en ml pour l'échantillon

P : prise d'essai en grammes

➤ **Stock de C organique du sol**

✚ **Stock actuel de C organique du sol**

Le stock de COS correspond à la masse de carbone par unité de surface (Biielders et *al.*, 2013). Il s'exprime en [Mg / ha ou T / ha]. Les stocks de C organique dans le sol sont quantifiés au moyen de la formule suivante (Ellert et Bettany, 1995 In Rakotonarivo, 2010) :

$$\text{Stock C} = C \times Da \times (1 - \text{Refus}) \times e \times 0,1$$

Avec : Stock C = stock de carbone dans le sol (Mg.ha⁻¹)

C = teneur en carbone de l'horizon de sol (g.kg⁻¹)

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

Refus = éléments grossiers de d > 2 mm (Mg)

e = épaisseur de l'horizon (cm)

Le stock pour une épaisseur de 0 à 30cm est obtenu par la somme des stocks calculés pour chaque épaisseur (0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm) (Grinand et *al.*, 2009). Il en est de même pour les stocks pour une épaisseur de 0-100 cm. Mais les stocks de C au niveau des horizons non prélevés sur terrain, et donc non analysés au laboratoire (30-40 cm ; 60-70 cm ; 70-80 cm ; 90-100 cm), ont été déterminés au préalable par interpolation à partir d'une équation de régression des autres horizons (Razafimahatratra et *al.*, 2014).

Les stocks de C de TVBA 9, 10 et 19 ont été éliminés des données à traiter en raison des valeurs incohérentes des teneurs en carbone observées au niveau de ces sites. Ce qui fait que le nombre de sites étudiés a finalement été arrêté à 12.

✚ Stock ancien de C organique du sol

La notice explicative de la carte de Zebrowski ne renferme que des teneurs en C du sol et non des stocks de COS. Ni la détermination de la densité apparente du sol, ni les refus n'ont été considérée à cette époque. Par conséquent, aucun de ces paramètres n'est disponible.

Pour déterminer le stock de COS d'un horizon donné, au temps t_0 , il a donc fallu déterminer au préalable la valeur de D_a à attribuer à cet horizon. Pour cela, il a été supposé que les densités apparentes ne varient pas en profondeur (au-dessous de 30 cm). Ainsi, pour des profondeurs supérieures à 30 cm, les valeurs de D_a obtenues dans le cadre de cette étude ont été considérées comme étant égales aux D_a de l'époque (Com. Pers., Brossard, 2014). Les refus issus des échantillons prélevés dans le cadre de cette étude étaient pratiquement négligeables voire nuls. Par conséquent, les stocks de COS estimés avec considération des refus étaient généralement les mêmes que ceux estimés sans. Pour cette raison, les stocks de C au temps de Zebrowski (t_0) ont été estimés indépendamment des refus.

Les stocks de C pour des profondeurs données ont donc été estimés (en Mg/ha) en n'utilisant que les D_a actuelles affectées à la profondeur en question, l'épaisseur égale à 10 cm et les teneurs en C des sols correspondantes si elles existent. Ces stocks de COS anciens s'obtiennent donc comme suit : **Stock C = C × D_a × e × 0,1**

✚ Bilan de stock de COS

Faire un bilan des stocks de COS revient à estimer les gains ou les pertes en termes de stocks de COS entre le temps actuel (t_1) et le temps ancien (t_0).

Les stocks anciens n'ont pas pu être calculés pour un profil complet au niveau d'un site donné mais seulement pour les horizons dont les teneurs en C sont disponibles. Les données actuelles ayant pu être interpolées pour obtenir des stocks de COS pour une profondeur donnée, les données anciennes étaient donc les plus contraignantes pour l'étude de la variation des stocks de COS dans le temps. Par conséquent, elle n'a été réalisée que pour les horizons au niveau d'un site donné dont les stocks de COS anciens ont pu être estimés.

4.5.2. Analyses statistiques

La première hypothèse selon laquelle « Les stocks de COS présentent une variation dans l'espace suivant le type de sol et suivant la profondeur. » est à vérifier par l'existence d'une différence significative : entre les moyennes des stocks de COS sur 30cm et 100cm, entre les stocks de COS de chaque type de sol et entre les stocks de COS de chaque type de sol sur 30cm et 100cm. Le test ANOVA à un facteur (profondeur ou type de sol) et celui à deux facteurs (types de sol et profondeur) ont été utilisés pour la comparaison de ces stocks.

La deuxième hypothèse qui stipule que « Les stocks de COS varient avec le temps. » est à vérifier par la comparaison des stocks de C au temps de Zebrowski et Ratsimbazafy (stocks à t_0) avec les stocks actuels (stocks à t_1). Aussi, les stocks de C pour ces 2 instants t ont été comparés entre eux

afin de tester s'il y a une différence significative entre les périodes. Les valeurs de stocks devaient être considérées séparément, pour chaque site, pour ne pas fausser les conclusions à en tirer. Le test des rangs signés de Wilcoxon, un test non-paramétrique destiné à comparer des données quantitatives issues de 2 échantillons appariés, a été utilisé pour ce faire.

4.6. Cartographie

Les cartes des stocks de COS de la zone d'étude sur 0-30cm et 0-100cm ont été élaborées à partir d'une carte pédologique numérisée intitulée « Cartes pédologiques de Madagascar : à 1/100.000 : Feuille Antsirabe (N 49) ». Cette carte a été établie suivant l'ancienne classification française des sols de la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS) de 1967.

Les moyennes des stocks de COS actuels tirés de la présente étude sont les principales données considérées pour l'élaboration de ces cartes. Néanmoins, pour augmenter le nombre d'unités pédologiques (types de sol) couvertes par cette étude, des valeurs de stocks sur des types de sol non étudiés dans le cadre de la présente étude mais pourtant disponibles via les données du projet BIOVA, ont été intégrées dans les résultats en vue de faire la spatialisation des stocks de COS de la région d'Antsirabe sur 0-30 cm. Seules les données relatives au COS des sites d'étude du projet BIOVA incluses dans la « feuille Antsirabe » ont été exploitées à cette fin. Parmi elles, seules les valeurs de stocks sur des types de sol non étudiés dans le cadre de la présente étude mais pourtant disponibles via les données du projet BIOVA, ont ensuite été intégrées dans les résultats en vue de faire la spatialisation des stocks de COS de la région d'Antsirabe sur 0-30 cm. L'intégration des stocks de C au niveau des sites d'étude du projet BIOVA avec ceux de la présente étude (stocks de C des TVBA) a en effet entraîné de fortes variations à l'intérieur d'un même type de sol (écart-types et coefficient de variation élevés) (Annexe 4). Conséquemment, la différence entre les stocks de C des différents types de sol (sites BIOVA et sites TVBA confondus) n'est plus significative. Concernant les types de sols de la zone d'intervention qui n'ont finalement pas été inventoriées par cette étude, ils ont été laissés comme étant non identifiés ou encore non étudiés.

Le découpage en classes (discrétisation) a été réalisé après avoir effectué les analyses de variance (ANOVA) entre les stocks de COS des types de sol pour la profondeur considérée (0-30cm ou 0-100cm). Elle a été faite avec XLStat et par la méthode « k-means ». Le nombre de classes a été déterminé en fonction du résultat du regroupement donné par l'ANOVA lorsque la significativité des différences est transitive. Généralement, le nombre de classes choisies pour la cartographie est de 5.

5. Cadre opératoire

L'approche méthodologique utilisée pour mener à bien la présente étude est synthétisée comme suit.

Problématique : Comment appréhender la distribution spatiale et la variabilité temporelle du carbone du sol à l'échelle d'une région ?				
Hypothèses et sous-hypothèses		Indicateurs	Méthodes objectives	Procédés
H ₁ : Les stocks de COS présentent une variation dans l'espace.	Les stocks de COS présentent une variation dans l'espace suivant le type de sol	Différence entre les stocks de COS selon les types de sol	<ul style="list-style-type: none"> - Identifier une zone d'étude - Déterminer les types de sol présents et les sites représentatifs - Faire des prélèvements d'échantillons de sol sur ces sites - Déterminer si les stocks de COS des différents types de sols sont significativement différents entre eux 	<ul style="list-style-type: none"> - Exploitation BDD ValSol existant et étude bibliographique - Prélèvements de sol - Analyse au laboratoire - Tests statistiques (ANOVA entre les stocks de COS de chaque type de sol). - Discrétisation (méthode « k-means ») - Spatialisation des stocks de C
	Les stocks de COS présentent une variation dans l'espace suivant la profondeur.	Différence entre les stocks de COS selon la profondeur	<ul style="list-style-type: none"> - Déterminer si les stocks de COS sur 0-30cm / 0-100cm sols sont significativement différents entre eux 	<ul style="list-style-type: none"> - Tests statistiques (ANOVA entre les moyennes des stocks de COS sur 30cm et 100cm, entre les stocks de COS de chaque type de sol sur 30cm et 100cm).
H ₂ : Les stocks de COS varient avec le temps.	ΔS_{COS} (variation stocks de COS entre t_1 et t_0)		<ul style="list-style-type: none"> - Calculer les stocks de COS t_0 (à partir des données dans BDD ValSol) - Comparer avec les stocks de COS à t_1 	<ul style="list-style-type: none"> - Exploitation BDD et étude bibliographique - Estimation des stocks de C t_0 - Calcul des $\Delta SCOS$
	Différence entre les stocks de COS au temps t_1 et t_0		<ul style="list-style-type: none"> - Déterminer si les stocks aux temps t_1 et t_0 sont significativement différents entre eux 	<ul style="list-style-type: none"> - Tests statistiques (test des rangs signés de Wilcoxon entre les stocks aux temps t_1 et t_0)

PARTIE 3 : RESULTATS

PARTIE 3 : RESULTATS

Chapitre 1 : Distribution spatiale du stock de carbone organique du sol**1.1. Caractérisation des sols de la région d'Antsirabe****1.1.1. Types de sols rencontrés au niveau des sites de prélèvement de l'étude**

Les échantillons prélevés au niveau des sites d'étude appartiennent à la classe générale des sols ferrallitiques, à l'exception de ceux au niveau du site TVBA 1 qui appartiennent à la classe des sols peu évolués (celle des sols peu évolués non-climatiques) (Tableau 2). Les sols minéraux bruts (lithosols), les sols hydromorphes, les andosols et les complexes n'ont pas pu être échantillonnés dans le cadre de cette étude. Au total, cette étude ne concerne que 11 types de sol, sur les 30 présents dans la feuille de la région d'Antsirabe. Mais ces 11 types de sol, observés au niveau de ces 12 sites représentatifs, représentent 70,19 % de la superficie totale de la feuille (Tableau 2), soit 70,32 % de la superficie totale des sols de la feuille d'Antsirabe.

Tableau 2: Types de sols observés au niveau des sites d'étude et leurs proportions

Sites	Types de sol	Codes	Superficie (%)
TVBA 1	Sol peu évolué-non-climatique -d'érosion régosolique-sur socle cristallin	SPE-NC-ER-SC	16,02
TVBA 3	Sol ferrallitique fortement désaturé, rajeuni avec érosion et remaniement, sur socle cristallin	SFFD-RER-SC	19,41
TVBA 4			
TVBA 13	Sol ferrallitique-moyennement désaturé rajeuni par apport éolien-sur matériau volcanique basique	SFMD-RAE-MVB	1,18
TVBA 14	Sol ferrallitique fortement désaturé rajeuni modal sur matériau volcanique basique	SFFD-RM-MVB	0,37
TVBA 15	Sol ferrallitique-fortement désaturé-rajeuni humifère-sur matériaux volcaniques basiques	SFFD-RH-MVB	3,93
TVBA 16	Sol ferrallitique-moyennement désaturé - allitique-humifère sur coulée volcanique basique	SFMD-A-H-CVB	3,88
TVBA 17	Sol ferrallitique moyennement désaturé en B, hydromorphe sur matériau volcanique	SFMD en B-H-MV	0,43
TVBA 18	Sol ferrallitique fortement désaturé, typique rajeuni, sur matériau volcanique	SFFD-TR-MV	6,30
TVBA 21	Sol ferrallitique fortement désaturé, allitique humifère sur matériaux pyroclastiques acides	SFFD-AH-MPA	3,68
TVBA 22	Sol ferrallitique-fortement désaturé-rajeuni-humifère-sur gabbro	SFFD-RH-G	5,01
TVBA 24	Sol ferrallitique fortement désaturé- allitique avec érosion et remaniement sur migmatites	SFFD-AER-M	9,98
Total :			70,19

Source : Zebrowski et Ratsimbazafy, 1979 In Razafimahatratra, 2014 adapté par l'auteur, 2014

1.1.2. Types de sols rencontrés au niveau des sites d'étude du projet BIOVA

Les sites d'étude du projet BIOVA ne concernent que sept (7) types de sol sur les 30 présents dans la feuille d'Antsirabe (Tableau 3). Parmi eux, quatre (4) types de sol ont déjà été échantillonnés dans le cadre de la présente étude. Les trois (3) restants (en gris dans le tableau 3), correspondent à des types de sol non échantillonnés dans cette étude. Ils appartiennent tous à la classe générale des sols hydromorphes. Les sols au niveau des sites de prélèvement du projet BIOVA (concernés par cette étude) ne représentent que 40,42 % de la superficie totale des sols de la feuille d'Antsirabe compte tenu de leur plus faible représentativité en termes de diversité.

Ainsi, même en combinant les données issues des sites d'étude du projet BIOVA avec celles de la présente étude, les sols minéraux bruts (lithosols), les andosols et les complexes restent encore non échantillonnés. Toutefois, la proportion des types de sol échantillonné, en termes de superficie, arrive quand même à atteindre 75,79 % de la superficie totale des sols de la feuille d'Antsirabe.

Tableau 3: Types de sols observés au niveau des sites d'étude du projet BIOVA et leurs proportions

Nombre de sites du projet BIOVA	Types de sol (codes) sur ces sites	Correspondance aux sols des sites anciens	Superficie (%)
1	Sol peu évolué-non-climatique-d'érosion régosolique-sur socle cristallin (SPE-NC-ER-SC)	TVBA 1	16,02
2	Sol ferrallitique fortement désaturé - allitique avec érosion et remaniement sur migmatites (SFFD-AER-M)	TVBA 22	5,01
16	Sol ferrallitique-moyennement désaturé-allitique-humifère sur coulée volcanique basique (SFMD-A-H-CVB)	TVBA 16	3,88
20	Sol ferrallitique fortement désaturé-allitique avec érosion et remaniement sur migmatites (SFFD-AER-M)	TVBA 24	9,98
1	Sol hydromorphe peu humifère à gley d'ensemble sur alluvions cristallines (SHPH-GE-AC)	TVBA 26	2,10
1	Sols hydromorphes à pseudogley sur sédiment volcano-lacustre (SH-PG-SVL)	TVBA 29	1,13
2	Sols hydromorphes organiques oligotrophes sur matériaux volcaniques (SH-OO-MV)	TVBA 30	2,23
		Total :	40,35

Source : Auteur, 2014

1.2. Variabilité spatiale des stocks de carbone organique du sol

2.1.1. Variabilité verticale ou variabilité suivant la profondeur

Pour tous types de sol confondus, une différence significative est notée entre les stocks sur 100 cm (0-100cm) et ceux sur 30 cm (0-30cm) (p -value < 0,0001 ; $n=70$, $\alpha=0.05$). Les stocks sur 100cm ($197,44 \text{ Mg/ha} \pm 63,76$) sont bien évidemment plus importants que ceux sur 30 cm ($102,2 \text{ Mg/ha} \pm 25,87$). Toutefois, ces stocks sur 100 cm sont constitués à hauteur de 51.76 %(en moyenne) par les stocks obtenus sur 30 cm (Figure 2).

La prépondérance des stocks sur 30 cm pourrait être due au fait que les matières organiques s'accumulent essentiellement au ras du sol. Ceci pourrait contribuer à cette importance des stocks de C en surface.

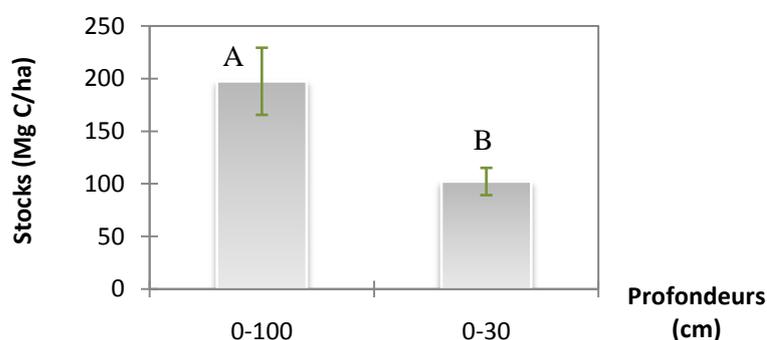


Figure 2: Distribution verticale du stock de carbone organique du sol

Source : Auteur, 2014

2.1.2. Variabilité suivant les types de sol

Les stocks de COS des différents types de sol sont significativement différents entre eux (p -value < 0,0001, $n=360$, $\alpha=0,05$). Les stocks les plus faibles sont rencontrés sur des sols ferrallitiques fortement désaturés, typiques rajeunis, sur matériau volcanique (SFFD-TR-MV) (TVBA 18) ($9,44 \pm 12,14 \text{ Mg.ha}^{-1}$) et les plus élevés (TVBA 24) sur des sols ferrallitiques fortement désaturés- allitiques avec érosion et remaniement sur migmatites (SFFD-AER-M) ($28,77 \pm 15,78 \text{ Mg.ha}^{-1}$).

En termes de stocks de COS, les sols ferrallitiques moyennement désaturés en B, hydromorphes sur matériau volcanique (SFMD en B-H-MV) ($16,87 \pm 4,75 \text{ Mg.ha}^{-1}$) et les sols ferrallitiques - moyennement désaturés – allitiques -humifère sur coulée volcanique basique (SFMD-A-H-CVB) ($18,68 \pm 12,08 \text{ Mg.ha}^{-1}$) ne sont pas significativement différents (respectivement TVBA 17 et 16). Il en est de même pour les stocks de C des sols ferrallitiques fortement désaturés, rajeunis avec érosion et remaniement, sur socle cristallin (SFFD-RER-SC) ($20,42 \pm 15,07 \text{ Mg.ha}^{-1}$) et ceux des sols ferrallitiques -fortement désaturés– rajeunis- humifères- sur gabbro (SFFD-RH-G) ($25,00 \pm 12,60 \text{ Mg.ha}^{-1}$) (TVBA 3 et 4 ; TVBA 22).

L'effet combiné des taux de saturation du sol et de la nature des roches-mères pourraient être les facteurs qui influencent les stocks de C de chaque type de sol.

Par ailleurs, de très fortes variations (CV très élevés) sont constatées pour les stocks de COS de chaque type de sol (Tableau 4). Ces faits sont particulièrement avérés pour les sols ferrallitiques fortement désaturés, typiques rajeunis, sur matériau volcanique (SFFD-TR-MV) (TVBA 18) et les sols ferrallitiques fortement désaturés, allitiques humifères sur matériaux pyroclastiques acides (SFFD-AH-MPA) (TVBA 21) dont les CV dépassent les 100%. Ceci peut résulter du fait que les profondeurs n'ont pas été prises en compte puisque les stocks de COS ont été obtenus en faisant la moyenne des stocks de C des 10 profondeurs (0-10 à 90-100). D'ailleurs, le test d'ANOVA a démontré que seuls 15% ($R^2 = 0,15$) des variations des stocks de COS sont expliqués par ce facteur type de sol.

Tableau 4: Stocks de carbone organique suivant les types de sol

Type de sol (Code)	Stock de COS (Mg.ha ⁻¹)	Ecart-type	CV (%)	Groupe
Sol ferrallitique fortement désaturé, typique rajeuni, sur matériau volcanique (SFFD-TR-MV)	9,44	12,14	128,59	A
Sol peu évolué-non-climatique -d'érosion régosolique-sur socle cristallin (SPE-NC-ER-SC)	14,40	13,02	90,37	AB
Sol ferrallitique fortement désaturé, allitique humifère sur matériaux pyroclastiques acides (SFFD-AH-MPA)	14,72	15,25	103,62	ABC
Sol ferrallitique moyennement désaturé en B, hydromorphe sur matériau volcanique (SFMD en B-H-MV)	16,87	4,75	28,15	ABCD
Sol ferrallitique fortement désaturé rajeuni modal sur matériau volcanique basique (SFFD-RM-MVB)	17,18	10,52	61,23	ABCD
Sol ferrallitique-moyennement désaturé-allitique-humifère sur coulée volcanique basique (SFMD-A-H-CVB)	18,68	12,08	64,65	ABCDE
Sol ferrallitique fortement désaturé, rajeuni avec érosion et remaniement, sur socle cristallin (SFFD-RER-SC)	20,42	15,07	73,82	BCDE
Sol ferrallitique-fortement désaturé-rajeuni-humifère-sur gabbro (SFFD-RH-G)	25	12,60	50,41	BCDE
Sol ferrallitique-fortement désaturé-rajeuni humifère-sur matériaux volcaniques basiques (SFFD-RH-MVB)	25,54	13,58	53,18	CDE
Sol ferrallitique-moyennement désaturé rajeuni par apport éolien-sur matériau volcanique basique (SFMD-RAE-MVB)	26,16	11,49	43,92	DE
Sol ferrallitique fortement désaturé- allitique avec érosion et remaniement sur migmatites (SFFD-AER-M)	28,77	15,78	54,87	E

Source : Auteur, 2014

2.1.3. Variabilité suivant les types de sol et la profondeur

Les stocks de C des types de sol à une profondeur de 100 cm et 30cm sont significativement différents entre eux ($p\text{-value} = 0,00046 < \alpha = 0.05 ; n=70$) (figure 3). Néanmoins, aucune tendance générale n'est observée (figure 3). En particulier, il n'est pas possible d'affirmer par exemple quels groupes de sol, sur telles roches mères, sont plus riches ou plus pauvres que d'autres en termes de stocks de COS.

Les sols peu évolués non-climatique - d'érosion régosolique-sur socle cristallin (SPE-NC-ER-SC sur TVBA 1) ne semblent pas être si différents des sols ferrallitiques du point de vue des stocks de COS. Sur 30cm, les stocks obtenus sur ce type de sol ($95,70 \text{ Mg C/ha} \pm 3,94$) sont semblables à ceux des sols ferrallitiques-moyennement désaturés rajeunis par apport éolien-sur matériau volcanique basique (SFMD-RAE-MVB) ($88,54 \text{ Mg C/ha} \pm 10,68$) et des sols ferrallitiques fortement désaturés rajeunis modals sur matériau volcanique basique (SFFD-RM-MVB) ($88,79 \text{ Mg C/ha} \pm 20,36$). Ce n'est que pour les stocks de COS sur 100 cm ($144,04 \text{ Mg C/ha} \pm 6,59$) qu'ils constituent un groupe à part.

Les sols de type ferrallitiques fortement désaturés - allitiques avec érosion et remaniement sur migmatites (SFFD-AER-M) représentés par le site TVBA 24 possèdent les plus grands stocks de COS sur 100 cm ($287,67 \text{ Mg C/ha} \pm 21,73$) comme sur 30 cm ($144 \text{ Mg C/ha} \pm 2,23$). Ceci pourrait être expliqué par le fait que ce site se trouve sur sédiments volcano-lacustres d'où ce stock de C élevé sur 100 cm. En outre, il correspond à une parcelle en jachère de 2 ans après culture de maïs associée au riz pluvial (Annexe 3). Laissé non cultivé pour lui permettre de se reconstituer, le sol pourrait avoir bénéficié des apports de matières organiques par la végétation spontanée au-dessus en plus des éventuels résidus de culture.

Les stocks de COS les plus faibles sur 100 cm ($94,37 \text{ Mg C/ha} \pm 11,10$) ont été obtenus au niveau du site TVBA 18 qui représente les sols ferrallitiques fortement désaturés, typiques rajeunis, sur matériau volcanique (SFFD-TR-MV). Sur 30cm, les stocks les plus bas ($62,81 \text{ Mg C/ha} \pm 4,03$) se retrouvent au niveau du site TVBA 17 qui représente les sols ferrallitiques moyennement désaturés en B, hydromorphes sur matériau volcanique (SFMD en B-H-MV) (Figure 3).

Une grande variabilité en termes de stocks de COS est aussi observée au sein des sols de types ferrallitiques sur 30 cm ($103,46 \text{ Mg C/ha} \pm 26,98$) comme sur 100 cm ($201,44 \text{ Mg C/ha} \pm 64,53$), qu'ils soient fortement ou moyennement désaturés. Une différence significative est en effet constatée entre les stocks de COS des différents types de sol ferrallitiques que ce soit pour la profondeur de 0-30 cm que pour celle de 0-100 cm ($p\text{-value} = 0,0001 ; \alpha = 0.05 ; n=32$) (Tableau 5). 74% de la variation des stocks de COS du sol sont expliqués par le type de sol (15%) et la profondeur (59%). Globalement, les variations intra-sites sont acceptables (CV entre 1,55 à 40,6 %). Les sites correspondants aux sols ferrallitiques fortement désaturés, rajeunis avec érosion et

remaniement, sur socle cristallin (SFFD-RER-SC) et aux sols ferrallitiques fortement désaturés rajeunis modals sur matériau volcanique basique (SFFD-RM-MVB) sont ceux qui présentent les plus grandes variabilités intra-sites à la fois pour les profondeurs 0-30 et 0-100cm. Dans le cas des SFFD-RER-SC, la variabilité intra-site est due à l'existence de 2 sites représentatifs distincts pour ce même type de sol (TVBA 3 et TVBA 4). Les variabilités dans les cas des SFFD-RM-MVB, des SFMD en B-H-MV, des SFMD-A-H-CVB et des SFMD-RAE-MVB pourraient être expliquées par des variations locales des teneurs en argile.

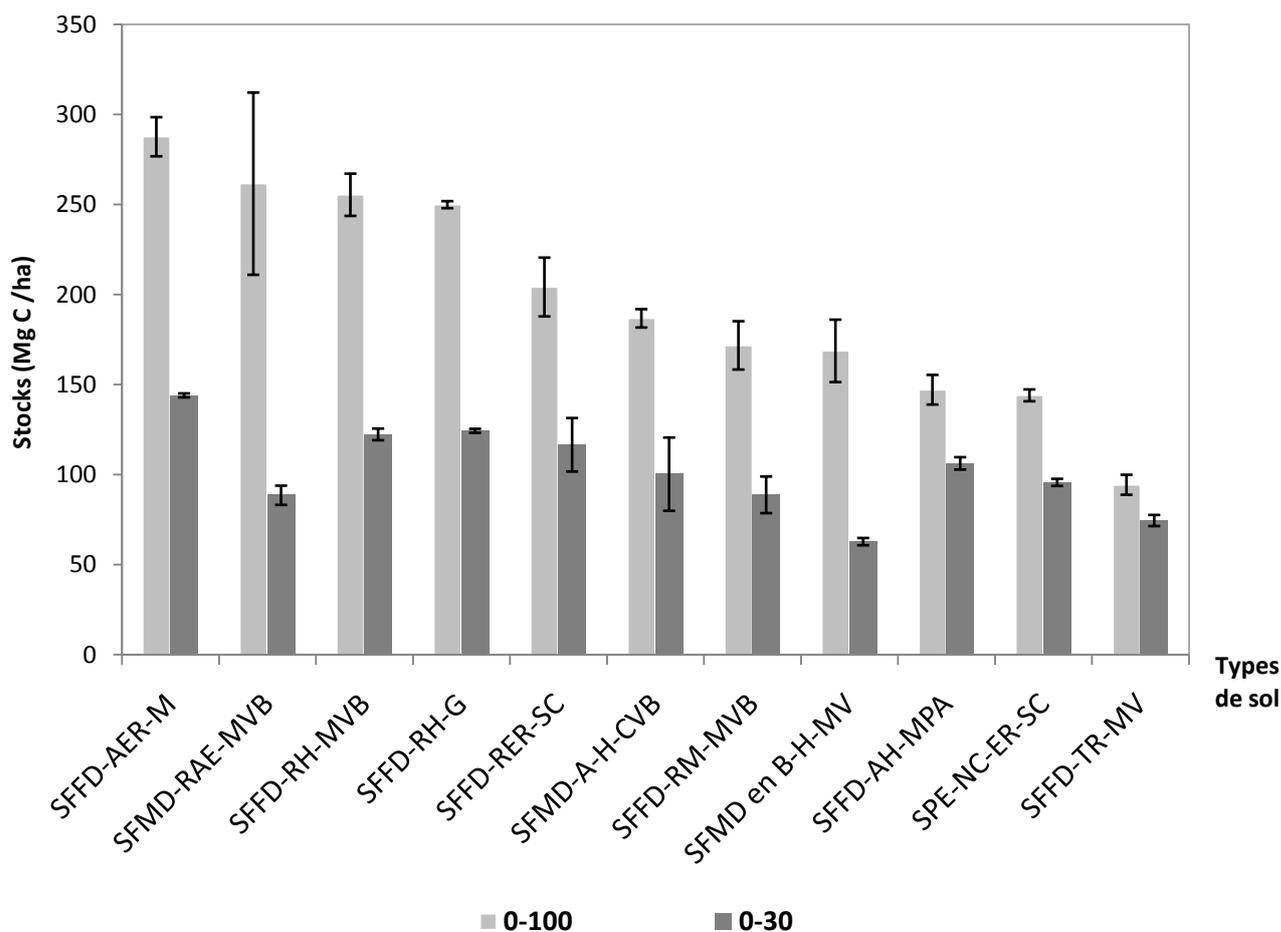


Figure 3: Distribution verticale du stock de carbone organique des différents types de sol

Cette figure a été réalisée en classant les stocks de COS sur 0-100cm par ordre décroissant

Source : Auteur, 2014

Tableau 5: Stocks de carbone des sols ferrallitiques sur 30 cm et sur 100 cm

Type de sol	0-30 cm			0-100 cm		
	Stock C ± Écart-type	Groupe	CV (%)	Stock C ± Écart-type	Groupe	CV (%)
SFFD-AER-M	144,00 ± 2,23	c	1,55	287,66 ± 21,73	D	7,55
SFFD-AH-MPA	106,26 ± 6,88	abc	6,48	147,17 ± 16,48	AB	11,20
SFFD-RER-SC	116,59 ± 29,70	bc	25,47	204,21 ± 32,66	BCD	16,00
SFFD-RH-G	124,36 ± 2,19	bc	1,76	249,96 ± 3,90	BCD	1,56
SFFD-RH-MVB	122,36 ± 6,48	bc	5,30	255,43 ± 23,46	BCD	9,18
SFFD-RM-MVB	88,79 ± 20,35	ab	22,93	171,79 ± 26,84	ABC	15,62
SFFD-TR-MV	74,52 ± 6,18	a	8,29	94,37 ± 11,10	A	11,76
SFMD en B-H-MV	62,81 ± 4,03	a	6,42	168,75 ± 34,68	ABC	20,55
SFMD-A-H-CVB	100,26 ± 40,71	abc	40,60	186,82 ± 10,21	ABCD	5,47
SFMD-RAE-MVB	88,54 ± 10,68	ab	12,06	261,60 ± 101,22	CD	38,69

Source : Auteur, 2014

Dans le cas de cette étude, l'effet de la profondeur semble être le plus déterminant pour la variation des stocks de COS à l'échelle de la région d'Antsirabe. Pour 10 sites sur 12, plus de la moitié des stocks de C se trouve dans la couche superficielle de 0-30cm.

1.3. Représentation spatiale des stocks de carbone organique du sol sur 0-30cm et sur 0-100cm

Les stocks de COS de la région d'Antsirabe varient dans l'espace suivant la profondeur et les types de sol (sur 0-30cm : p-value < 0,0001 ; $\alpha=0,05$ n= 40 et sur 0-100cm : p-value = 0,005 ; $\alpha=0,05$ n= 35).

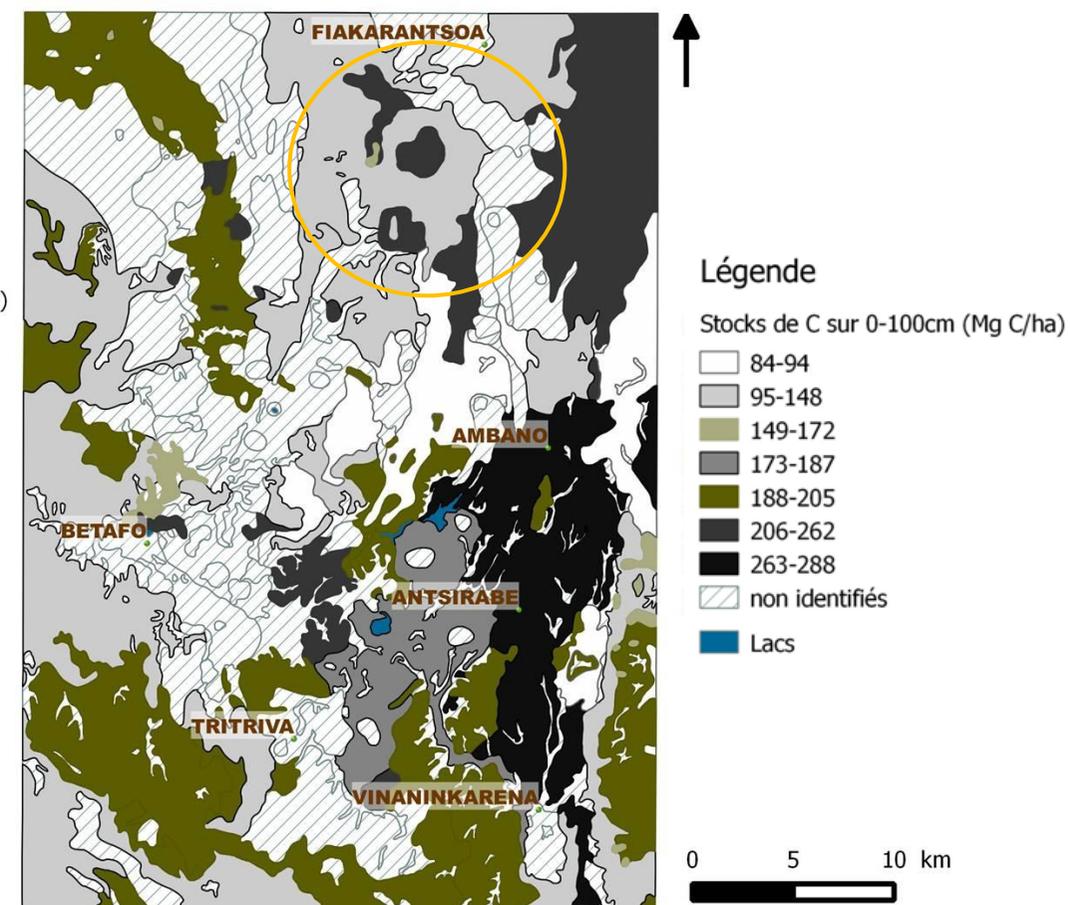
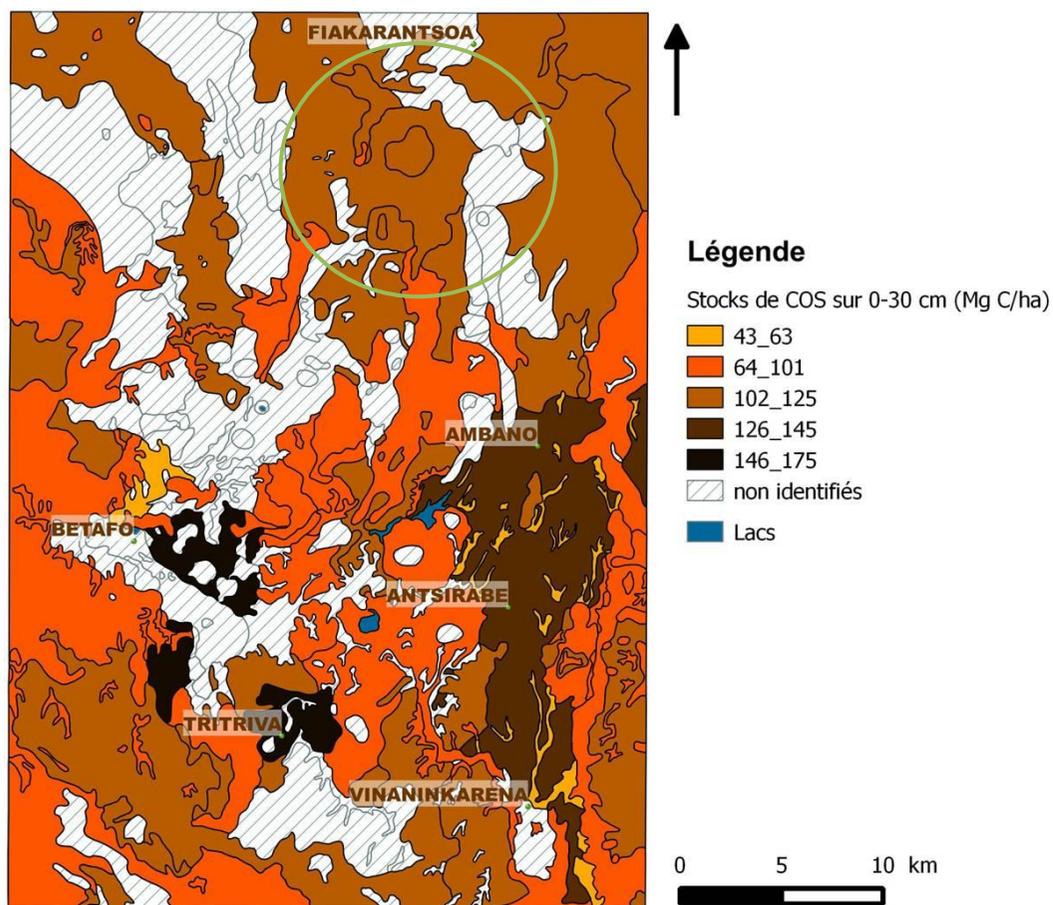
Sur 0-30cm, les types de sol dont les stocks aient pu être déterminés sont plus nombreux (14 sur les 30 types de sol dans la carte pédologique) que sur 100cm (10 sur les 30) à cause des autres types de sol dont les stocks sur 0-30 cm ont été déterminés au niveau des parcelles du projet BIOVA. Il s'agit des : SFFD-AER-M (Sol ferrallitique fortement désaturé - allitique avec érosion et remaniement sur migmatites), SHPH-GE-AC (Sol hydromorphe peu humifère à gley d'ensemble sur alluvions cristallines), SH-PG-SVL (Sols hydromorphes à pseudogley sur sédiment volcano-lacustre) et des SH-OO-MV (Sols hydromorphes organiques oligotrophes sur matériaux volcaniques). La « surface couverte », pour la carte sur 0-30cm (75,81% de la superficie totale des sols dans la feuille), n'est pas pour autant très éloignée de celle pour la carte sur 0-100cm qui est de 70,20%.

Au niveau de la région d'Antsirabe, les stocks actuels moyens, estimés sur 0-30 cm des types de sol échantillonnés, varient de 43 à 175 Mg C/ha (carte 4). Sur 100 cm, ils varient de 84 à 288 Mg C/ha (carte 5). Ces valeurs sont relativement proches probablement en raison de la variabilité verticale de la distribution des stocks de COS qui se concentrent davantage sur les 30 premiers centimètres du sol. Par ailleurs, des stocks de C sur sols hydromorphes ont été considérés dans l'élaboration de cette carte de distribution des stocks de COS sur 0-30cm, en l'occurrence via les données des parcelles BIOVA. Ces sols hydromorphes organiques (SH-OO-MV), caractérisés par des stocks de COS élevés, n'ont pourtant pas pu être considérés dans le cadre de l'élaboration de la carte des stocks de C sur 100cm, ce qui pourrait expliquer en partie ce rapprochement de valeurs de stocks de COS.

Au total, au niveau des unités pédologiques échantillonnées qui représentent 75,81% de la superficie totale des sols de la zone d'étude, le stock de C dans les 30 premiers cm du sol et sur une superficie de 99 546,89 ha (995,47 km²) est de $11,01 \pm 1,23$ téragramme (Tg) de C [1Tg = 10³ Gigagramme (Gg) = 10⁶ Mg = 10¹² g]. Dans les 100 premiers cm du sol, et pour une superficie de 92 356,43 ha (923,56 km²) qui représente 70,33% de la superficie totale des sols de la zone d'étude, le stock total de C est de $18,03 \pm 1,82$ Tg.

Ramenés à la superficie des unités pédologiques échantillonnées dans chaque cas, les stocks totaux de C pour les 30 premiers cm et pour les 100 premiers cm restent donc relativement proches. Néanmoins, compte tenu de la plus vaste superficie des unités pédologiques échantillonnées pour la profondeur 0-30 cm, les stocks totaux de C pour les 30 premiers cm paraissent être plus petits. Ainsi, dans une certaine mesure, la tendance observée dans le cadre de l'analyse de la variabilité verticale, qui a révélé que les stocks sur 100 cm sont constitués de moitié par les stocks obtenus sur 30 cm, semble être maintenue.

Enfin, d'un point de vue global, les zones à plus grands stocks de COS pour 0-30cm tendent à correspondre à celles à plus grands stocks de COS pour 0-100cm (Carte 4 et 5). Toutefois, quelques fragmentations peuvent être observées au niveau de certaines zones notamment aux alentours de la partie Nord - Est de la feuille Antsirabe (cartes 4 et 5). Cette fragmentation peut être le résultat du fait que le nombre de classes dans la carte des stocks de COS pour 0-30 cm est de 5 alors qu'il est de 7 dans la carte pour 0-100 cm.



Stocks de COS sur 0-30 cm : $11,01 \pm 1,23$ Tg de C sur $995,47 \text{ km}^2$

Stocks de COS sur 0-100 cm : $18,03 \pm 1,82$ Tg de C sur $923,56 \text{ km}^2$

Carte 4: Carte de distribution des stocks de carbone organique du sol sur 0-30cm

Carte 5: Carte de distribution des stocks de carbone organique du sol sur 0-100 cm

Source : Auteur, 2014

Source : Auteur, 2014

$$1Tg = 10^3 Gg = 10^6 Mg = 10^{12} g$$

Chapitre 2 : Variabilité temporelle du stock de carbone organique du sol

2.1. Stocks de carbone au temps ancien

Les stocks de C (Mg/ha) au temps de Zebrowski (t_0) ne concernent que 16 horizons (tableau 6). Ils ont été limités par la disponibilité des teneurs en C (‰) à ce temps t_0 au-delà de 30 cm, profondeur à partir de laquelle la D_a actuelle (t_1) est supposée rester la même que pour (t_0).

Dans l'ensemble, les valeurs de stocks de COS obtenues semblent être à peu près cohérentes. Elles tendent à respecter des tendances générales (diminution de stocks de COS suivant la profondeur). Toutefois, celui de TVBA 1 semble être trop faible, même à cette profondeur de 60-70cm (ligne en gris dans le tableau 6).

Tableau 6 : Stocks de carbone au temps ancien (Mg C/ha)

	Profondeur (cm)	Teneur C (‰)	D_a	Stock ancien (Mg C/ha)
TVBA 1	60-70	0.2	1.53	0.31
TVBA 3	30-40	7.8	1.34	10.43
TVBA 4	20-40	12.28	1.40	17.17
TVBA 13	30-40	34.4	1.03	35.32
TVBA 13	60-80	5.6	0.99	5.53
TVBA 14	90-100	1.09	0.96	1.04
TVBA 15	30-40	5.6	0.88	4.93
TVBA 16	40-60	15.85	1.27	20.13
TVBA 16	80-100	4.39	1.45	6.34
TVBA 17	20-60	49.9	0.94	46.96
TVBA 17	90-150	7.91	0.97	7.67
TVBA 18	20-40	17.2	1.10	18.85
TVBA 21	25-40	34.3	0.96	32.93
TVBA 21	80-95	1.8	1.01	1.82
TVBA 22	100-120	1.8	1.11	2.00
TVBA 24	30-40	26.98	0.95	25.63

Source : Auteur, 2014

2.2. Bilan des stocks actuels et des stocks anciens de carbone organique du sol

L'écart d'amplitude rapporté à l'état de référence S_{COS} au temps t_0 (ΔS_{COS}), a tendance à être positive. Ceci se présente dans les cas de 10 horizons sur les 16 étudiés, ce qui traduit une augmentation des stocks de COS dans le temps. En effet, d'un point de vue global, les occupations des sols actuels peuvent laisser entendre un mode de gestion plus séquestrant et donc susceptible d'entraîner une augmentation du stock de COS (Annexe 3).

TVBA 13, 16, 17, 18 et 21 présentent néanmoins des ΔS_{COS} négatives qui traduisent une diminution des stocks de COS. En outre, des valeurs incohérentes sont constatées. Elles sont observées au niveau des sites TVBA 13, 14, 15, 22 et surtout TVBA 1 (ΔS_{COS} entre t_1 et t_0 en gras dans le tableau 7).

Ces valeurs de ΔS_{COS} incohérentes pourraient avoir pour causes :

- des valeurs incorrectes des stocks de COS au temps t_0 ;
- des valeurs incorrectes des D_a interpolées et des stocks de COS actuels correspondants ;
- ou un décalage dans l'espace entre les sites de prélèvement de Zebrowski et ceux actuels qui fait qu'ils correspondent en réalité à des sols de natures différentes dont les propriétés physico-chimiques sont aussi carrément différentes.

Les valeurs incorrectes des stocks de COS au temps ancien (t_0) pourraient être expliquées par l'existence d'un changement de mode d'usage des sols entre les 2 temps t_0 et t_1 . En raison de ce changement de mode d'usage des sols, l'adoption de l'hypothèse de la D_a constante peut ne plus être valide. Pourtant, la plupart de ces sites (TVBA 1 ; 3 ; 4 ; 14 ; 16 ; 18 ; 21 ; 22) correspondaient autrefois à des strates herbacées et plus rarement à des terrains cultivés ou à des parcelles en jachère. De nos jours, ces sites sont occupés par quelques arbres voire une plantation tout entière d'arbres qui sont en plus à enracinement profond (eucalyptus, pin, mimosa). Ce cas est vérifié entre autres pour TVBA 22 qui était au temps t_0 une strate herbacée à *Pennisetum pseudotriticoïdes*, *Trachypogon spicatus*, *Ctenium concinum* et qui est devenu actuellement une plantation de pins (pins de 5 ans et déjà bien avant) (Annexe 3).

Les valeurs incorrectes des D_a interpolées et des stocks de COS actuels correspondants, si elles ont lieu d'être, seraient purement d'ordre méthodologique avec des méthodes d'interpolation inappropriées.

Tableau 7 : Bilan du stock de carbone organique du sol

n = 16

	Profondeur (cm)	Stocks anciens C (Mg/ha)	Stocks actuels correspondants (Mg/ha)	Δ SCOS	Δ SCOS (%)
TVBA 1	60-70	0.31	6.573	6.27	2046.96
TVBA 3	30-40	10.43	20.776	10.35	99.25
TVBA 4	20-40	17.17	26.26	9.09	52.90
TVBA 13	30-40	35.32	25.544	-9.77	-27.68
TVBA 13	60-80	5.53	23.51	17.98	325.42
TVBA 14	90-100	1.04	8.141	7.10	679.37
TVBA 15	30-40	4.93	35.078	30.15	611.82
TVBA 16	40-60	20.13	18.00	-2.13	-10.59
TVBA 16	80-100	6.34	3.50	-2.85	-44.88
TVBA 17	20-60	46.96	17.65	-29.31	-62.42
TVBA 17	90-150	7.67	12.717	5.04	65.74
TVBA 18	20-40	18.85	9.78	-9.07	-48.11
TVBA 21	25-40	32.93	16.797	-16.13	-48.99
TVBA 21	80-95	1.82	2.137	0.32	17.57
TVBA 22	100-120	2.00	12.960	10.96	548.64
TVBA 24	30-40	25.63	36.055	10.42	40.67

t_0 : temps ancien (1974) ; t_1 : temps actuel (2014)

Source : Auteur, 2014

2.3. Différence entre les stocks de carbone organique du sol au temps actuel et au temps ancien

Le résultat du test des rangs signés de Wilcoxon pour échantillons appariés a montré que la distribution des stocks de COS au temps t_1 et t_0 (même jeu de données que dans le tableau 7) n'est pas significativement différente (p-value : $0,34 > \alpha : 0,05$).

L'écart quantitatif entre ces stocks de COS n'étant pas significatif, il n'existe pas de différence significative entre les périodes.

Somme toute, il existe une variation des stocks de COS de la région d'Antsirabe au temps ancien et ceux au temps actuel (Δ SCOS) mais des valeurs incohérentes sont aussi constatées. Par ailleurs, la différence entre les stocks aux temps ancien et actuel n'est pas significative.

PARTIE 4 : DISCUSSIONS

PARTIE 4 : DISCUSSIONS

1. Discussion sur la méthodologie

1.1. Atouts de l'étude

La BDD ValSol a permis de faciliter la conduite d'une analyse en 2 temps. Il a suffi de refaire des prélèvements au niveau de ces sites et d'exploiter les données anciennes pour avoir des valeurs de stocks de COS des temps ancien (t_0) et actuel (t_1).

L'existence de valeurs de stocks de COS issues d'une étude récente menée aux alentours de la zone d'intervention (données BIOVA) a permis d'obtenir des stocks de COS pour des types de sol pourtant non échantillonnés dans le cadre de la présente étude.

1.2. Contraintes et limites

1.2.1. Etude de la variabilité spatiale

Les types de sols disponibles et les données y afférentes (teneur et stock en C actuels) sont non entièrement représentatifs des sols de la région à cartographier.

Ainsi, pour combler les données manquantes, il fallait recourir à des données relatives à des études pédologiques «récentes» menées aux environs d'Antsirabe.

Les travaux de Razafimbelo (2005) et de Grinand et *al.*, (2009) qui traitent respectivement du stock de COS à l'échelle régionale (région d'Antsirabe) et à l'échelle nationale ont été identifiés comme étant des références appropriées pour cette étude. Néanmoins, ils n'ont pas pu être intégrés dans le cadre de la cartographie. Ceci résulte du fait que ces valeurs concernent généralement des classes générales de sol et non des types de sol classés jusqu'au niveau groupe.

Des travaux de Razafimbelo et *al.* (2006) (In Grandière et *al.*, 2007) se sont portés sur des sols ferrallitiques fortement désaturés, typique, rajeunis, humifères, sur matériau volcanique acide (SFFD-TRH-MVA). Ils ressemblent aux sols au niveau de TVBA 15 (qui eux sont sur matériau volcanique basique) mais ne correspondent à aucun des sols de la zone d'étude.

Par ailleurs, ces valeurs de stocks de COS ont été obtenues à masse équivalente et leur intégration dans les résultats de la présente étude risque de biaiser les résultats.

L'introduction des sites du projet BIOVA inclus dans la feuille d'Antsirabe et des valeurs de stocks de COS obtenues au niveau de ces sites a constitué une autre alternative aux contraintes dues à ce faible effectif des sites de prélèvements. Pourtant, pour un même type de sol et à une même profondeur (30cm), les stocks de C obtenus dans le cadre du projet BIOVA et ceux de la présente étude ne sont pas réellement comparables puisque les modes de gestion ne sont pas souvent les mêmes.

1.2.2. *Spatialisation des stocks de carbone organique du sol*

Réaliser une carte de C à une échelle 1/100.000 sous-entend qu'une certaine précision en termes de distribution des stocks de C dans l'espace est recherchée (d'où la considération de l'échelle régionale). Pourtant, les sites de prélèvement utilisés pour ce faire ne sont qu'au nombre de 15 (plus tard, ils ont encore été réduits à 12). Qui plus est, les échantillons prélevés ne sont pas représentatifs de la zone à cartographier. Quelques types de sol n'ont pas du tout été inventoriés (sols minéraux bruts, sols hydromorphes) dans le cadre de l'étude. Par ailleurs, ils ne sont pas uniformément répartis dans l'espace, et les répétitions effectuées sont restées au niveau intra-parcellaire.

Pour y remédier, il a fallu intégrer des valeurs de stocks de COS issues du projet BIOVA. Mais cette initiative n'a résolu qu'une partie du problème. D'abord, parce que seule la carte de distribution des stocks de COS de la région d'Antsirabe sur 0-30 cm peut être réalisée de cette manière, le projet BIOVA n'ayant fait les prélèvements que sur 30 cm de profondeur. Ensuite, parce que seules les valeurs de stocks sur des types de sol non étudiés dans le cadre de la présente étude, mais pourtant disponibles via les données du projet BIOVA, ont été intégrées dans les résultats en vue de faire la spatialisation de ces stocks de COS de la région d'Antsirabe sur 0-30cm. La raison en est que, l'intégration des stocks de C au niveau des sites d'étude du projet BIOVA avec ceux de la présente étude (stocks de C des sites TVBA) entraîne de fortes variations à l'intérieur d'un même type de sol (écart-types et coefficient de variation élevés) (Annexe 4). Conséquemment, la différence entre les stocks de C des différents types de sol (sites BIOVA et sites TVBA confondus) n'est plus significative. Il convient néanmoins de remarquer que les variations sont toutes aussi importantes au sein des sites BIOVA de même type de sol (Annexe 4). Ces variations plus ou moins importantes résultent probablement de l'influence du mode d'usage des sols. Mais, elles pourraient aussi témoigner une insuffisance de la taille d'échantillonnage.

Une autre initiative qui aurait pu également solutionner ce problème d'échantillonnage consiste à rechercher des valeurs de stocks de C des types de sol manquants dans la littérature, en privilégiant celles obtenues dans les régions environnantes. Cette initiative reste cependant contestable dans la mesure où elle est susceptible d'introduire des biais dus entre autres à l'écart dans le temps des campagnes de mesures (entraînant l'introduction d'un ΔS_{COS} dans le temps), ou encore à des différences d'ordre méthodologique comme le calcul des stocks de C à masses équivalentes. En outre, les valeurs de stocks de C retrouvés dans la littérature sont souvent celles d'une classe générale de sols (cas en l'occurrence des sols minéraux bruts ou encore des sols ferrallitiques in Grinand et *al.*, 2009). Pourtant la présente étude requiert un niveau de classification plus détaillée (jusqu'au groupe et sous-groupe) pour répondre à la précision recherchée en vue de l'élaboration de la carte de distribution des COS à l'échelle 1/100000.

L'absence de valeurs de stocks de C pour une grande partie des types de sol de la feuille d'Antsirabe est donc à l'origine des zones laissées comme étant non identifiées sur la carte de distribution des stocks de COS sur 30 cm et surtout sur 100 cm.

Concernant la méthode de discrétisation, celle de la discrétisation standardisée qui consiste à prendre les moyennes comme centre de classe et les écarts-types comme amplitudes, aurait été la plus adéquate pour mettre en exergue les erreurs de mesure sur la carte (Poidevin, 1999). Mais l'existence de groupes intermédiaires, dont l'écart-type recouvre ceux des autres groupes de sols auxquels ils constituent des intermédiaires, a rendu cette méthode peu pratique vis-à-vis de cette étude.

1.2.3. Etude de la variabilité temporelle

- Les données utilisées dans le cadre de cette étude résultent majoritairement de méthodes différentes qui peuvent biaiser les résultats. Cette différence d'ordre méthodologique est valable d'abord pour le protocole d'échantillonnage utilisé pour l'obtention des données actuelles. Mais elle l'est davantage dans le cadre de la comparaison des données anciennes avec les données actuelles. Pour les données anciennes par exemple, la localisation des sites a été effectuée par précision graphique sur un fond de carte au 1/100000 alors que les procédés utilisés pour la ré-identification de ces mêmes sites ne sont pas les mêmes. Ce qui a en partie contribué à l'existence d'un décalage entre les points (Com. Pers., Brossard, 2014). Ensuite, les teneurs en COS ont été mesurées par horizon à intervalles variables au temps de Zebrowski et Ratsimbazafy (1975) alors qu'elles ont été faites par horizon de 10 cm pour avoir les données actuelles. L'absence de Da pour ces sols est aussi une contrainte majeure si bien qu'il a fallu affecter les Da actuelles en profondeur.

- Les informations relatives à l'historique exact du site depuis les premiers prélèvements effectués par Zebrowski jusqu'à nos jours ne sont pas complètes, voire non disponibles dans certains cas. Celles-ci sont pourtant nécessaires pour l'interprétation des résultats obtenus.

- La comparaison des stocks de COS aurait dû se porter sur des stocks de tout un profil (horizons 0-10 à 90-100) pour les 2 temps t_0 et t_1 . Mais, si l'interpolation a été utilisée pour estimer les stocks actuels des horizons non échantillonnés, ceci n'est pas réalisable pour les stocks de COS à t_0 qui dans bien des cas n'ont été estimés que pour un seul horizon. Il a donc fallu se contenter des stocks de COS disponibles.

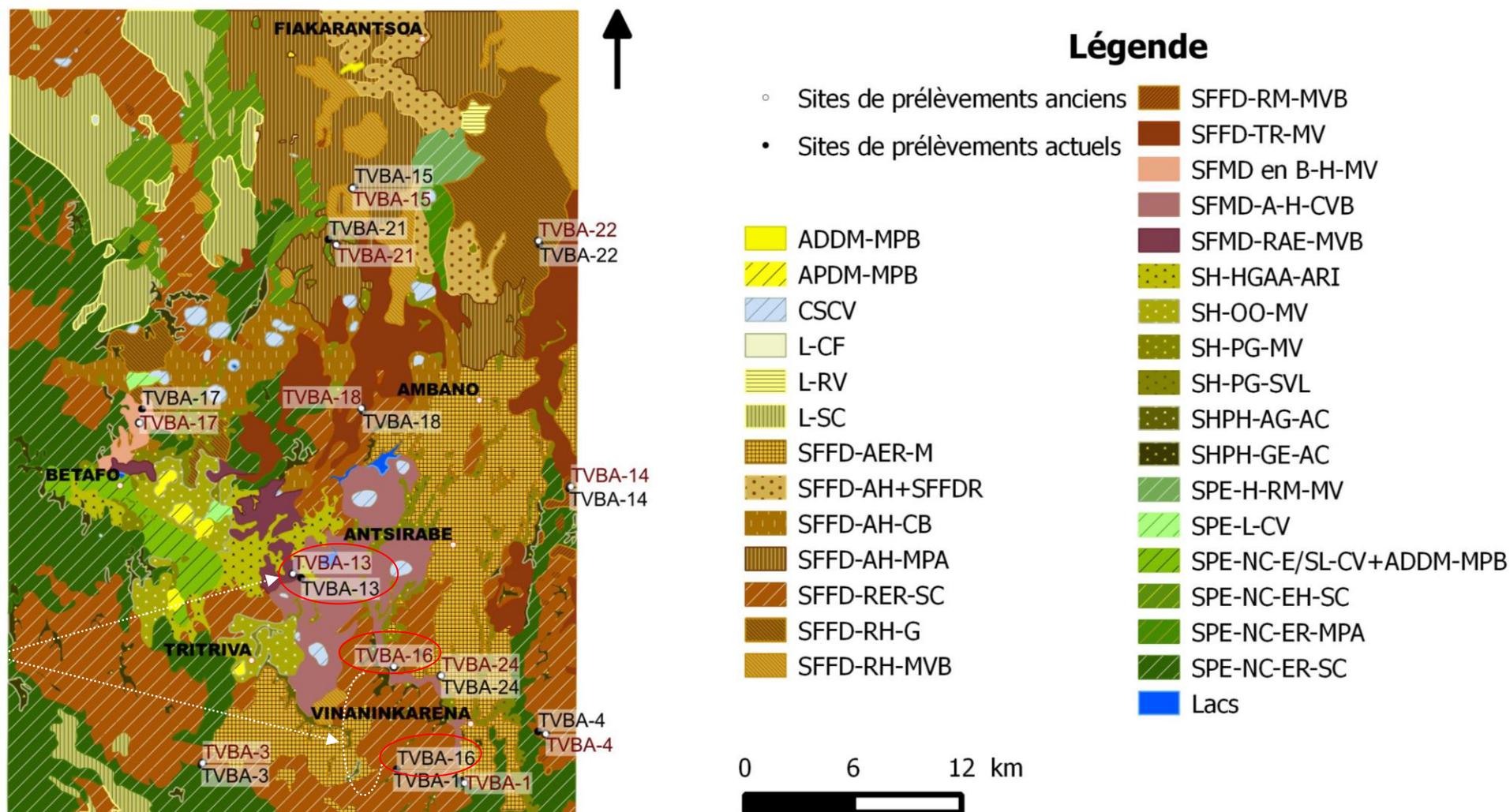
Mais la principale limite de cette étude résulte probablement de l'existence d'un certain décalage entre les anciens sites de prélèvement et les nouveaux (Carte 6). Ce décalage est particulièrement tangible au niveau du site TVBA 16. Il est presque nul au niveau du site TVBA 24. Dans certains cas, le décalage des sites est accompagné d'un changement dans la classification des sites échantillonnés suivant les types de sol et, par conséquent, de leurs caractéristiques. Ce cas est rencontré au niveau de TVBA 1, TVBA 13, TVBA 16 et TVBA 21 qui, en réalité, correspondent respectivement aux types de sol au niveau de TVBA 2, TVBA 16, TVBA 3 et

TVBA 5 (Tableau 8). La fiabilité des résultats de l'analyse en deux temps portant sur les valeurs des stocks de COS peut ainsi être remise en cause tout comme les cartes de distribution des stocks de COS (sur 0-30 cm et sur 0-100cm) effectués à partir de ces données erronées.

Tableau 8: Changement dans la classification suivant les types de sol des sites décalés

Classification sans considération du décalage	Classification exacte après considération du décalage
<p>TVBA 1 (SPE-NC-ER-SC) <i>Sol peu évolué-non-climatique-d'érosion régosolique-sur socle cristallin</i></p> <p>Sol à texture sableuse ; sur migmatites ; à teneurs très variables en MO (1 à 6 %) ; à pH acide en surface (5,1 à 5,5) et neutre (5,3 à 6,3) en profondeur</p>	<p>TVBA 2 (SFFD-AER-M) <i>Sol ferrallitique fortement désaturé - allitique avec érosion et remaniement sur migmatites</i></p> <p>Sol à texture argileuse ; sur migmatites ; à teneurs élevées en MO (5 à 8 %) ; à pH acide en surface (4,8 à 5,3) et neutre en profondeur (< 5,8)</p>
<p>TVBA 13 (SFMD-RAE-MVB) <i>Sol ferrallitique-moyennement désaturé rajeuni par apport éolien-sur matériau volcanique basique</i></p> <p>Sol sur matériaux volcaniques basiques ; à teneurs élevées en MO ; à pH acide (5,1 à 5,7) en surface et neutre (5,8 à 6,5) en profondeur</p>	<p>TVBA 16 (SFMD-A-H-CVB) <i>Sol ferrallitique-moyennement désaturé - allitique-humifère sur coulée volcanique basique</i></p> <p>Sol sur coulée scoriacée basique ; à teneurs élevées en MO (10 à 15 %) sur 30 à 40 cm ; à pH acide en surface (5 à 5,5)</p>
<p>TVBA 16 (SFMD-A-H-CVB) <i>Sol ferrallitique-moyennement désaturé-allitique-humifère sur coulée volcanique basique</i></p> <p>Sol sur coulée scoriacée basique ; à teneurs élevées en MO (10 à 15 %) sur 30 à 40 cm ; à pH acide en surface (5 à 5,5)</p>	<p>TVBA 3 (SFFD-RER-SC) <i>Sol ferrallitique fortement désaturé, rajeuni avec érosion et remaniement, sur socle cristallin</i></p> <p>Sol sur migmatites ; à teneurs en MO très variables mais généralement faibles ; à pH acide en surface (5)</p>
<p>TVBA 21 (SFFD-AH-MPA) <i>Sol ferrallitique fortement désaturé, allitique humifère sur matériaux pyroclastiques acides</i></p> <p>Sol à texture argilo-limoneuse, sur projections altérées, à teneurs élevées en MO (10 à 12 %), à pH acide en surface (4,4 à 4,8).</p>	<p>TVBA 5 (SPE-NC-EH-SC) <i>Sol peu évolué non-climatique d'érosion hydromorphe sur socle cristallin</i></p> <p>Sol à texture sablo-limoneuse; sur granite ; à teneurs élevées en MO (10 à 12 %) ; à pH acide (5 à 5,2) même en profondeur</p>

Source : Auteur, 2014, données tirées de Zebrowski et Ratsimbazafy, 1979



Carte 6 : Décalage observé entre les anciens sites de prélèvement et les sites actuels

Source : Auteur, 2014

2. Discussion sur les résultats et les hypothèses

2.1. Discussions sur les résultats

- **Etude de la variabilité spatiale**

- **Variabilité verticale**

Une différence significative est notée entre les stocks sur 0-100cm et ceux sur 0-30cm. Cependant, les stocks obtenus sur 30 cm représentent plus de la moitié des stocks sur 100 cm. Ceci confirme les résultats de Buringh, en 1984 qui lui aussi a trouvé 68% de la matière organique dans les 25 premiers centimètres du sol. Cet horizon de surface correspondrait à une zone d'accumulation des résidus organiques (Razafimbelo et *al.*, 2008) et elle est fortement affectée par les modes de gestion du sol, particulièrement pour les parcelles cultivées (Vagen et Winowiecki, 2013).

Sur 0 - 30 cm, les stocks de C varient de $62,81 \pm 4,03$ Mg C/ha à $144 \pm 2,23$ Mg C/ha avec une moyenne de $102,2 \pm 25,87$ Mg/ha. Ces stocks de COS sont à peu près cohérents avec ceux de Grinand *et al.*, (2009) avec une moyenne de 61,3 Mg/ha et un maximum de 163,2 Mg C/ha pour les sols ferrallitiques de Madagascar. Sur 0-100 cm, ils sont de $94,37 \pm 11,10$ Mg C/ha à $287,67 \pm 21,73$ Mg C/ha avec une moyenne de $197,44 \pm 63,76$ Mg/ha.

La variation des stocks de l'horizon 0-30 est due à la texture des sols et au mode de gestion des terres. Cette profondeur de 30 cm correspond en effet à l'horizon recommandé par l'IPCC (2007) pour étudier l'effet des changements d'usage sur les stocks de COS. Par contre, la variation des stocks de COS en profondeur résulte essentiellement de la nature des roches mères et de la teneur en argile (Razafimahatratra et *al.*, 2014).

- **Variabilité suivant les types de sol**

Les stocks de COS des différents types de sol à profondeurs confondues sont significativement différents entre eux ($p\text{-value} < 0,0001$, $n = 360$, $\alpha = 0,05$). Ceci rejoint les conclusions de Grinand et *al.*, en 2009 de l'étude sur l'estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. Cette variabilité suivant le « type de sol » est due à la texture même du sol (Grinand et *al.*, 2009). Cependant, de très fortes variations sont constatées pour les stocks de COS de chaque type de sol, ce qui suggère que ce facteur ne peut expliquer à lui seul les variations des stocks de COS.

- **Variabilité verticale et suivant les types de sol**

Effectivement, les stocks de C des sols sont aussi fonction de la variabilité géologique (nature des roches mères) et du mode d'usage des sols notamment au niveau de l'horizon de surface. Ceci explique en partie l'existence d'une grande variabilité des stocks pour un même type de sol, cas en l'occurrence avec la classe des sols ferrallitiques. Au niveau de la région d'Antsirabe, "le volcanisme (basaltes, basanites)", le plutonisme (granites)" et le plutonisme-metamorphisme (migmatites)" constituent les 3 domaines prédominants (Razafimahatratra et *al.*, 2014). Les sites étudiés se trouvent majoritairement sur des basaltes ou sur des migmatites (Annexe 1). Sur ce point, Zebrowski et

Ratsimbazafy ont affirmé en 1979 que « l'accumulation humifère est plus importante sur matériaux volcaniques que sur socle ». Pourtant, cette tendance n'est plus vérifiée dans le cadre des résultats de la présente étude. La tendance notée réside uniquement au niveau de la forte teneur en C observée au niveau des sols avec une teneur élevée en argile.

○ **Spatialisation des stocks de carbone organique du sol sur 0-30cm et sur 0-100cm**

- **Représentation spatiale des stocks de carbone organique du sol sur 0-30cm et sur 0-100cm**

En tenant compte du décalage de certains sites accompagné d'un changement dans la classification des sites échantillonnés suivant les types de sol, les stocks moyens estimés sur 0-30 cm des types de sol échantillonnés dans la région d'Antsirabe oscillent entre 43 à 175 Mg C/ha. Les sols hydromorphes à pseudogley sur sédiment volcano-lacustre (SH-PG-SVL) et les sols ferrallitiques moyennement désaturés en B, hydromorphe sur matériau volcanique (SFMD en B-H-MV) ont les stocks de C les plus faibles. Les sols ayant les stocks de C les plus élevés restent les sols hydromorphes organiques oligotrophes sur matériaux volcaniques (SH-OO-MV) (175,14 Mg C/ha).

Sur 100 cm, ils sont de 94 à 262 Mg C/ha. Les sols ferrallitiques fortement désaturés, typique rajeunis, sur matériau volcanique (SFFD-TR-MV), représentés par TVBA 18, sont ceux qui ont des stocks de COS de 94 Mg C/ha. Les sols ferrallitiques-fortement désaturés-rajeunis-humifères- sur gabbro (SFFD-RH-G) (TVBA 22 et 25) ; les sols ferrallitiques-fortement désaturés-rajeunis humifères- sur matériaux volcaniques basiques (SFFD-RH-MVB) (TVBA 15) et les sols ferrallitiques-moyennement désaturés - allitiques-humifères sur coulée volcanique basique (SFMD-A-H-CVB) (TVBA 16) sont ceux qui se retrouvent dans la classe des sols à stocks de C entre 217 à 262 Mg C/ha.

En outre, les types de sol dont les stocks ont pu être déterminés pour la cartographie ont été réduits à 13 (sur les 30 types de sol dans la carte pédologique) sur 0-30 cm, et à 9 (sur les 30 types de sol) sur 100cm. La « surface couverte » est aussi plus vaste pour la carte sur 0-30cm (72,94 %) de la superficie totale des sols dans la feuille) que pour la carte sur 0-100 cm (52,55 %).

Quoi qu'il en soit, les zones à plus grands stocks de COS pour 0-30cm tendent toujours à correspondre à celles à plus grands stocks de COS pour 0-100 cm (Carte 7 et 8). Des cas de fragmentation peuvent encore être observés, notamment aux niveaux des parties Nord - Ouest et Sud de la feuille et ceci en dépit du fait que le nombre de classes soit le même dans les 2 cartes.

Même si les erreurs dues au décalage des sites de prélèvement (erreurs relatives à la reconnaissance des sites) ont été corrigées (carte 7 et 8), la validité de ces cartes n'est pas pour autant confirmée. Les limites entre les diverses unités de classification des sols sont rarement bien claires en raison de la nature des processus de formation du sol. Aussi, même en absence du décalage, l'appartenance pédologique des points de prélèvement à proximité des zones de jonction de 2 ou plusieurs unités pédologiques n'est pas figée. L'existence de variations locales marquées (d'origine naturelle ou d'origine anthropique avec la modification du mode d'usage des sols) n'est pas non plus

à écarter. Des erreurs relatives aux analyses en laboratoire peuvent aussi exister. La méthode Walkley-Black aurait tendance à sous-estimer la teneur en C des sols à faible quantité de MOS et à surestimer les teneurs élevées (Moreno et *al.*, 2001 in Gasser et *al.*, 2011).

- **Stocks totaux de C, sur 0-30cm et sur 0-100cm, pour la région d'Antsirabe**

Les stocks de C, exprimés en total de Tg pour les unités pédologiques échantillonnées dans la zone d'étude et à des profondeurs spécifiées, avec considération des décalages sont présentés dans le tableau 9. Ces valeurs de stocks de COS semblent être acceptables comparées : (i) à la valeur estimée pour la couche superficielle des sols (0-30 cm) de Madagascar qui contient 2795 Tg de C selon Grinand et *al.*, en 2009 et (ii) à celle observée sur les 30 premiers cm du sol, sous une plantation d'eucalyptus de 1580 ha située dans une Commune rurale des Hautes Terres malgaches (Sambaina), et qui est de $0,139 \pm 0,036$ Tg C (Razakamanarivo, 2009). La différence avec les résultats de Razakamanarivo, serait due à la différence en termes de superficie, mais aussi de type de sol et de climat. Selon Grinand et *al.*, 2009, la région d'Antsirabe figurerait effectivement parmi les régions à valeurs des stocks de C les plus élevées de l'Île.

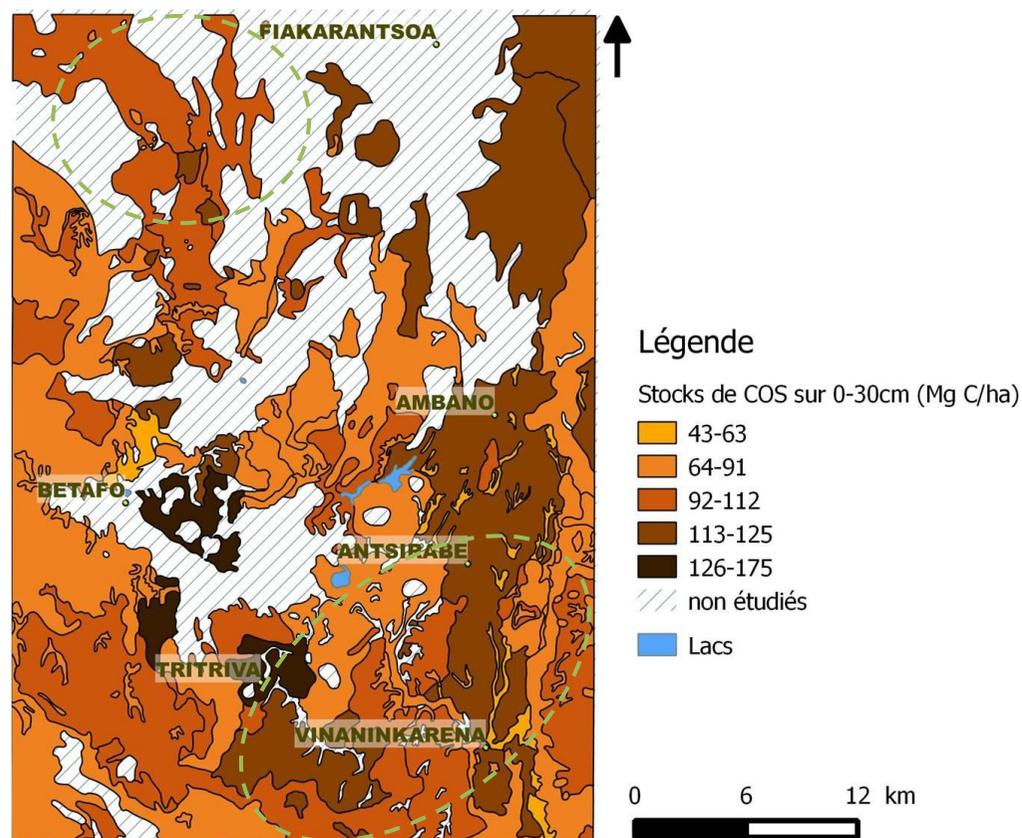
Sans recours aux stocks de COS issus des sites d'étude du projet BIOVA, les stocks totaux de C sur 0-30 cm représentent toujours près de la moitié des stocks sur 0-100 cm. En considérant les stocks de COS des sites du projet BIOVA pour la profondeur 0-30 cm, une augmentation des stocks de COS totaux est constatée. Mais cette augmentation est plus faible, et est associée à une plus grande variabilité de la valeur des stocks de COS de la zone étudiée, quand tous les sites du projet BIOVA (y compris ceux qui représentent des types de sols déjà échantillonnés par la présente étude) sont considérés. Ainsi, la méthode utilisée pour la spatialisation des stocks de COS, qui consiste à ne considérer que les sites du projet BIOVA correspondant à des types de sols non échantillonnés dans le cadre de la présente étude, semble être la plus appropriée. En effet, elle a permis de rendre acceptable la variabilité des stocks de COS au sein d'une unité pédologique.

Tableau 9: Stocks totaux de C (en Tg) pour 0-30 cm et 0-100 cm avec considération du décalage des sites

	Profondeur (cm)	Superficie (ha)	Proportion par rapport à la superficie totale des sols de la zone d'étude (%)	Stocks totaux de C (Tg)
Sites TVBA uniquement	0-30	69 000,88	52,55	$7,45 \pm 1,18$
	0-100	69 000,88	52,55	$13,77 \pm 0,07$
Sites TVBA et sites BIOVA (types de sol non échantillonnés)	0-30	95 780,07	72,94	$10,16 \pm 1,36$
Sites TVBA et sites BIOVA au complet	0-30	95 780,07	72,94	$9,96 \pm 1,60$

$$(1\text{Tg} = 10^3 \text{ Gg} = 10^6 \text{ Mg} = 10^{12} \text{ g})$$

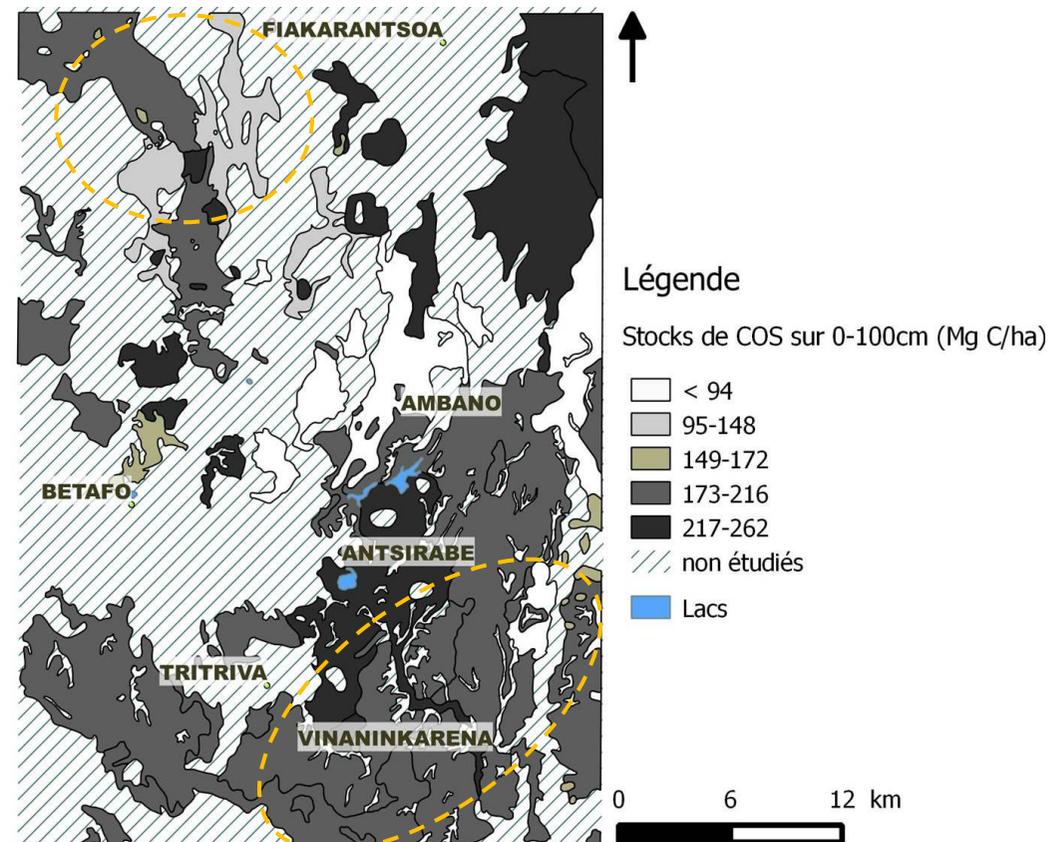
Source : Auteur, 2014



Stocks de COS sur 0-30 cm : $10,16 \pm 1,36$ Tg de C sur $957,8 \text{ km}^2$

Carte 7 : Distribution spatiale des stocks de carbone du sol de la région d'Antsirabe sur 0-30cm avec considération du décalage

Source : Auteur, 2014



Stocks de COS sur 0-100 cm : $13,77 \pm 0,07$ Tg de C sur 690 km^2

Carte 8 : Distribution spatiale des stocks de carbone du sol de la région d'Antsirabe sur 100cm avec considération du décalage

Source : Auteur, 2014

(1Tg = 10^3 Gg = 10^6 Mg = 10^{12} g)

- **Etude de la variabilité temporelle**

- **Variation des stocks de carbone organique du sol entre temps actuel et temps ancien**

Les raisons évoquées comme étant susceptibles d'avoir engendré les valeurs incohérentes de ΔS_{COS} , étaient : des valeurs incorrectes des stocks de COS au temps t_0 ; un décalage dans l'espace entre les sites de prélèvement de Zebrowski et ceux actuels ; ou des valeurs incorrectes des D_a interpolées et des stocks de COS actuels correspondants. Parmi elles, cette dernière est sans doute la moins influente. En tout cas, elle l'est beaucoup moins que les deux autres.

En effet, l'hypothèse selon laquelle « les D_a ne varient pas en profondeur » est très contestable compte tenu de l'absence d'informations sur l'historique des sites de prélèvement pendant les 40 années d'intervalle entre t_0 et t_1 . En plus, il a été constaté que ces sites qui étaient attribués à des savanes, des terrains de culture ou des jachères sont aujourd'hui majoritairement occupés par des arbres à enracinement profond comme l'eucalyptus et le pin. Dans ces conditions, la possibilité d'une modification des D_a en profondeur par « l'effet racines » n'est pas à exclure.

Par conséquent, les valeurs estimées de stocks de COS à t_0 peuvent être tout aussi contestables que cette hypothèse de D_a stable en profondeur.

Par ailleurs, le décalage entre « site de prélèvement ancien » et site de prélèvement actuel », pourtant censé être le même, est parfois important. Dans bien des cas, ce décalage induit en plus une différence en termes de type de sol entre ces 2 catégories de sites de prélèvement suscitées. Ceci est particulièrement vérifié pour : TVBA 1, TVBA 13, TVBA 16 et TVBA 21. Affecter des valeurs de D_a actuelles dans ces conditions pour ensuite estimer les stocks de COS devient ainsi très peu crédible. D'ailleurs, les écarts d'amplitude (ΔS_{COS}) particulièrement aberrants correspondent généralement à ceux calculés pour des sites dont le décalage a entraîné un changement de type de sol. C'est le cas notamment pour TVBA 1 qui en réalité ne correspond pas à un sol peu évolué-non-climatique-d'érosion régosolique - sur socle cristallin (SPE-NC-ER-SC) mais plutôt à un sol ferrallitique fortement désaturé - allitique avec érosion et remaniement sur migmatites (SFFD-AER-M) et où le ΔS_{COS} obtenu (sur 60 - 70 cm) est de 2046,96 %.

- **Différence entre les stocks de carbone organique du sol au temps actuel et au temps ancien**

La distribution des stocks de COS au temps t_1 et t_0 n'est pas significativement différente (p-value : 0,34 > α : 0,05). Il n'existe donc pas de différence significative entre les stocks de COS des 2 instants t . Toutefois, la validité de ces résultats peut également être remise en question en particulier à cause des incertitudes sur la véracité des valeurs de stocks de COS estimés au temps ancien (t_0) et surtout du fait que les résultats sont ceux d'un ou de deux horizons au niveau d'un site donné et non d'un profil complet.

En prenant en compte le décalage, les valeurs incohérentes de ΔS_{COS} obtenus, notamment celle égale à 2046,96 % (tableau 7 à la page 35), disparaissent (Annexe 5). 8 horizons, sur les 16 étudiés, présentent une augmentation des stocks de COS, les 8 restants présentent une diminution (figure 4).

La variation reste cependant non significative. Quoiqu'il en soit, la différence des stocks de COS au temps t_1 et t_0 , obtenue à l'issue d'un test t pour deux échantillons appariés, n'est pas non plus significativement différente ($p\text{-value} : 0,79 > \alpha : 0,05, n=16$).

Les résultats préliminaires de cette étude de la variabilité temporelle des stocks de COS se sont donc avérés être peu fiables, incohérents voire insensés dans certains cas. Ceci n'est toutefois pas étonnant, compte tenu de toutes les limites y afférentes énoncées précédemment. Néanmoins, l'idée principale dans le cadre de cette étude était entre autres d'essayer de comparer les données disponibles dans la BDD Valsol avec des données actuelles peu importe qu'elles soient « de même nature » ou pas. En effet, les données existant dans une BDD ne sont pas forcément « de même nature ». Ceci est prévisible au niveau temporel avec les avancés scientifiques et technologiques qui amènent à développer et à adopter de nouvelles méthodes jugées plus pratiques, plus efficaces que les précédentes. Même dans une même période, cette différence d'ordre méthodologique reste valable puisque la méthodologie et les méthodes adoptées varient souvent d'une étude à une autre en fonction de l'objectif considéré par l'étude en question, du budget à disposition, etc. Par conséquent, se conformer aux méthodes de collecte de données utilisées par Zebrowski et Ratsimbazafy ne nous est pas apparu indispensable.

Somme toute, cette étude exploratrice portant sur l'analyse de la variabilité temporelle des stocks de COS à l'échelle régionale confirme ainsi le fait que l'estimation de l'évolution des stocks de COS est peu pratique, voire pratiquement impossible, si l'emplacement des sites n'est pas resté strictement identique entre 2 dates (Arrouays et *al.*, 2003).

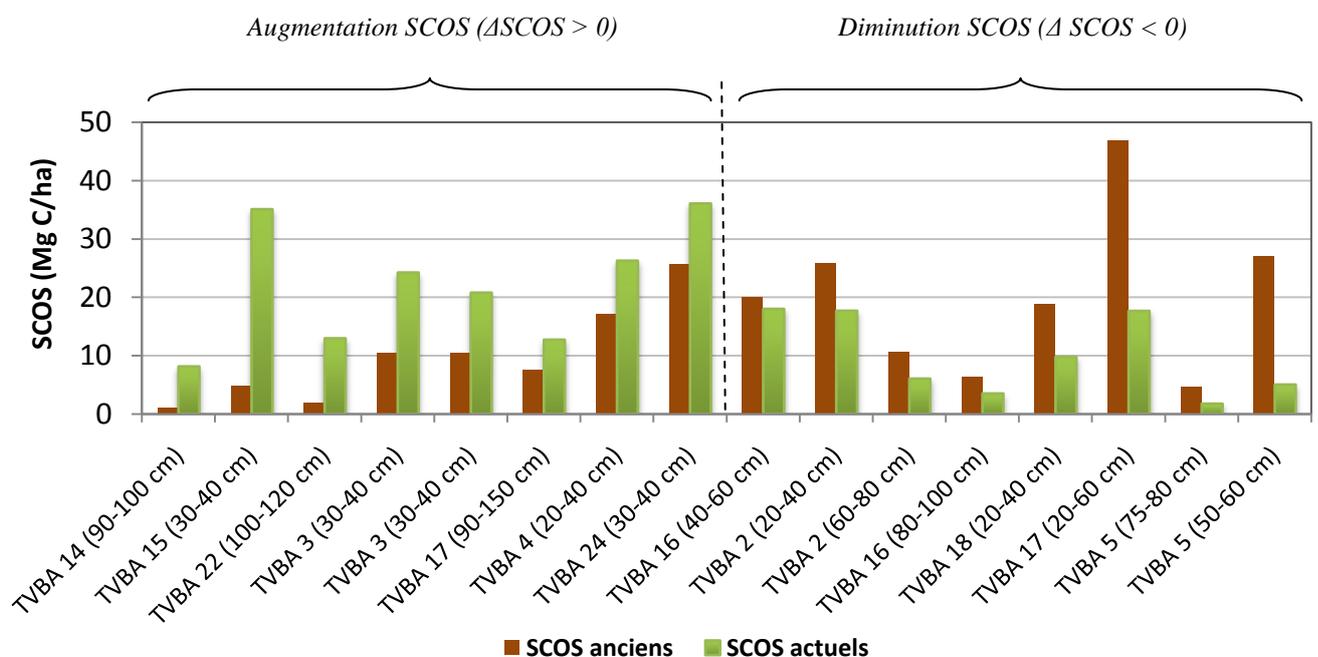


Figure 4: Effets du décalage des sites sur l'étude de la variabilité temporelle

Source : Auteur, 2014

2.2. Discussion sur les hypothèses

Les valeurs des stocks de COS de la région d'Antsirabe étant significativement différentes suivant la profondeur et les types de sol (sur 0-30cm : p-value < 0,0001 ; $\alpha=0,05$ n= 40 et sur 0-100cm : p-value = 0,005 ; $\alpha=0,05$ n= 35), il existe assez d'évidence pour affirmer qu'il y a variation des stocks de COS dans l'espace suivant ces facteurs.

Aussi, la première hypothèse selon laquelle « Les stocks de COS présentent une variation dans l'espace suivant le type de sol et la profondeur. » est vérifiée. Sa confirmation nécessite par ailleurs la considération à la fois de la profondeur et des types de sol.

Les variations des stocks de COS entre t_1 et t_0 (ΔS_{COS}) obtenues existent mais les résultats ne sont pas entièrement fiables. Par ailleurs, la différence entre les stocks de COS aux temps ancien et actuel (t_0 et t_1) n'est pas significative.

Par conséquent, compte tenu des données disponibles, il n'y a pas assez d'évidence pour déterminer si la deuxième hypothèse qui stipule que « Les stocks de COS varient avec le temps. » est vérifiée ou pas dans le cadre de cette étude (Tableau 10).

Tableau 10: Vérification des hypothèses

Hypothèses et sous-hypothèses		Etat	Résultats
H ₁ : Les stocks de COS présentent une variation dans l'espace	SH ₁₁ : Les stocks de COS présentent une variation dans l'espace suivant le type de sol.	Vérifiée	Il existe une différence significative entre les moyennes des stocks de COS sur 30 cm et 100 cm.
	SH ₁₂ : Les stocks de COS présentent une variation dans l'espace suivant la profondeur.		Il existe une différence significative entre les stocks de COS de chaque type de sol.
			Il existe une différence significative entre les stocks de COS de chaque type de sol sur 30cm et 100cm
H ₂ : Les stocks de COS varient avec le temps.		Indéterminée (Non vérifiable)	Il existe une variation des stocks de COS entre t_1 et t_0 (ΔS_{COS}) mais des valeurs incohérentes sont aussi constatées.
			La différence entre les stocks aux temps ancien et actuel n'est pas significative.

Source : Auteur, 2014

En définitive, la variabilité dans l'espace est confirmée suivant les types de sol et la profondeur. Mais, les résultats obtenus ne permettent pas d'en tirer davantage de conclusions. Ceci pourrait suggérer la nécessité de considérer d'autres facteurs susceptibles d'être déterminants pour le COS.

Concernant la variabilité temporelle des stocks de COS, les stocks de COS varient dans le temps à l'échelle régionale, mais la variation n'est pas significative. Dans ces conditions, il devient difficile de déterminer avec certitude si l'hypothèse suivant laquelle « Les stocks de COS varient avec le temps. » est confirmée ou pas. Ainsi, une reformulation de cette hypothèse est nécessaire. Au lieu de dire que les stocks de COS varient dans le temps, il aurait été, par exemple, préférable de supposer directement qu'ils aient diminué ou augmenté. Mais même dans ce cas de figure, cette étude serait toujours restée dans l'incapacité d'y répondre. Effectivement, outre le fait qu'il y a une variation des stocks de COS dans le temps et que cette variation n'est pas significative, cette variation ne va ni dans le sens d'une augmentation ni dans le sens d'une diminution.

Certes, nombreuses sont les contraintes et les limites d'ordre méthodologique (relatives aux méthodes choisies pour la conduite de cette étude) rencontrées. Mais sont-elles les seules causes à l'origine de la non-effectivité de cette étude sur la variabilité temporelle des stocks de COS à l'échelle régionale ? Pourrait-on soulever entre autres la durée entre les deux dates ? Autrement dit, 40 années sont-elles suffisantes, ou pas, pour étudier la variabilité temporelle, notamment à cette échelle régionale ?

3. Perspectives de recherche

De cette étude, quelques recommandations méthodologiques pour des perspectives de recherche dans le cadre du projet PEERS-CarSoM peuvent être avancées.

Les principaux axes d'orientation suivants ont été proposés afin de rassembler les connaissances sur les COS en vue d'une gestion durable de la ressource « sol » ou d'un aménagement du territoire.

Axe d'orientation 1 : Spatialiser les stocks de carbone organique des sols malgaches

Action 1.1 : Spatialisation des stocks de carbone organique du sol à l'échelle régionale

Disposer des valeurs des stocks de COS de tous les sites représentatifs (qui sont à identifier au préalable) est un impératif à l'élaboration d'une carte de distribution des COS à une échelle régionale.

Par conséquent, les sites de prélèvements devraient être choisis de manière à ce qu'ils soient représentatifs de la région à cartographier en termes de distribution spatiale et surtout de type de sol. Il est important de procéder de façon à avoir des répétitions pour chaque type de sol (au moins 3

parcelles de même type de sol) pour pouvoir établir une représentation cartographique valide des stocks de C. En outre, pour davantage de fiabilité et de précision, il est important d'inventorier au préalable tous les types de sol rencontrés dans la région à cartographier et de voir la présence ou non d'une variabilité dans l'espace pour un même type de sol.

Si les stocks ont été estimés à masses équivalentes, alors dans ce cas, il est possible d'envisager le recours à des valeurs de stocks de référence (pour tel type de sol avec tel mode d'usage) obtenues dans la littérature pour la spatialisation des stocks de COS de la région d'étude.

Action 1.2: Elaboration d'une méthodologie de spatialisation des stocks de carbone organique du sol apte à être utilisée dans d'autres régions de Madagascar

Trois approches peuvent être considérées pour cartographier les stocks de COS. La première a recours à la carte pédologique pour faire une carte des stocks de COS. La seconde consiste à partir des modes d'usage du sol (ou occupation du sol). La dernière consiste à partir des principaux facteurs qui influencent le stock de COS.

a) Considérer la méthode qui consiste à partir des types de sol

Un des impératifs à la réalisation d'une carte des stocks de COS dans ces conditions est l'existence d'une carte pédologique à l'échelle considérée.

Si l'objectif est de cartographier la distribution spatiale des stocks de COS à une échelle régionale, le principe reste le même du moment qu'il existe une carte pédologique de la région en question. Il suffit de faire des campagnes de prélèvement d'échantillons de sol au niveau de l'ensemble des sites représentatifs, d'évaluer les stocks de COS sur ces sites et de généraliser pour toute la région à cartographier.

Mais si l'objectif est de cartographier la distribution spatiale des stocks de COS à une échelle nationale. La première question qui se pose est donc de déterminer s'il existe des cartes pédologiques de toutes les régions de Madagascar à l'échelle considérée, par exemple à l'échelle 1/100000. Ensuite, si lesdites cartes existent, ont-elles été réalisées suivant la même méthode, les mêmes principes et par conséquent sont-elles basées sur les mêmes modalités de classifications des sols (CPCS etc.)?

Ces conditions, bien qu'elles semblent être rigoureuses, devraient pourtant être remplies pour pouvoir élaborer une carte nationale de la distribution des stocks de COS (en fonction des types de sols) qui puisse être parfaitement crédible.

Cet objectif semble toutefois difficile à atteindre. D'abord parce que les cartes pédologiques dans « ValSol-Madagascar » ne sont que 22 et elles ont été élaborées à des échelles diverses (13 au 1/200000, 8 au 1/100000 et 1 au 1/50000). Ces cartes ne couvrent que 18 % du territoire malgache (Feller et Sandron, 2010). Ensuite, la possibilité de les « assembler » serait probablement moindre

compte tenu des caractéristiques propres à chaque carte suivant l'auteur et les classifications des sols adoptées.

Comme solution, si l'objectif est de produire une carte nationale des stocks de COS, il faudrait partir d'une carte pédologique nationale. La carte pédologique de Madagascar à l'échelle 1/1000000 établie en trois coupures par Riquier et *al.*, 1968 et dont la notice aurait été rédigée par Leprun pourrait être plus facilement exploitable que d'autres (celle de Delenne et Pelletier, 1980). Il faudra remarquer cependant que si on part de ces cartes pédologiques nationales (au 1/1000000^{ème}) pour voir ensuite une échelle régionale, on aura du mal à avoir une précision à ce niveau.

b) Partir des modes d'usage du sol (occupation du sol)

L'influence des modes d'usage du sol sur le COS a été démontrée depuis longtemps (Feller et Beare, 1997). Il apparaît donc nécessaire de considérer ce facteur dans le cadre de la spatialisation des stocks de COS.

Pour cela, on devrait partir d'une carte de la répartition des modes d'utilisation des sols (MUS) de la région (dont les stocks de COS sont à cartographier) élaborée par télédétection. Cette démarche reste cependant complexe compte tenu de l'existence d'une mosaïque de MUS dans l'espace (variation dans l'espace) et surtout de leur variation dans le temps. Cette dernière est pourtant plus difficile à appréhender notamment pour les sols agricoles (sols cultivés, jachères...) et peut-être aussi pour les zones forestières sujettes à de fortes pressions démographiques (défrichement, régénération...). Certes, il est possible de ne considérer que les « principaux unités paysagers » (Ex : sols cultivés, forêt dense, forêt dégradée...) pour simplifier la tâche mais ceci revient à réduire la précision des résultats.

c) Partir des principaux facteurs qui influencent le stock de carbone organique du sol

Cette méthode est sans doute la plus fiable. En réalité, il n'est pas réaliste de ne considérer qu'un seul facteur pour spatialiser les stocks de COS. Les sols et leurs propriétés sont effectivement influencés par de nombreux facteurs tels que la température, la pluviosité, la végétation, le mode de gestion des terres, la topographie, la nature des roches et leur ancienneté, l'activité biologique (Terre Malgache, avril 2008).

Les stocks de COS sont donc conditionnés par tous ces facteurs et particulièrement par l'interaction entre ces derniers. Aussi, il convient de déterminer les facteurs les plus déterminants pour ensuite réaliser la cartographie des stocks de COS suivant ces facteurs pour des résultats valides.

La méthode adoptée par Grinand en 2010 dans le cadre de son mémoire de Mastère SILAT intitulé « Développement d'une méthode de spatialisation des stocks de carbone dans le sol à l'échelle régionale - Application à un projet REDD à Madagascar. » pourrait servir de référence pour des études de ce genre.

Axe d'orientation 2 : Etudier l'évolution des stocks de carbone organique du sol dans le temps**Action 2.1 : Etudier la variabilité temporelle des stocks de carbone organique du sol****a) Veiller au préalable à avoir à disposition les mêmes informations**

L'adoption de protocoles ou de méthodologies différentes pour collecter les informations nécessaires au cours des instants t_0 et t_1 peut être problématique pour la conduite d'une étude de la variabilité temporelle du stock de COS.

Ainsi, lors de la conception de la démarche méthodologique, il faudrait donc veiller à avoir au final les mêmes informations (stocks C, D_a , teneur en C à mêmes profondeurs) - et des données complètes - au niveau de ces instants t_0 et t_1 , et aussi entre-temps (dans le cas des occupations de sol).

Pour ce faire, il est préférable d'adopter les mêmes méthodes pour la collecte des informations en vue d'une comparaison valide. Sinon, il est nécessaire, de déterminer le biais introduit suite à ce changement de méthodes puis de corriger conséquemment les résultats obtenus (Cas du dosage de la teneur en C organique avec les trois méthodes : Anne, Walkley & Black, analyse élémentaire CHN).

b) S'assurer que l'étude de la variabilité temporelle est menée aux mêmes endroits

Un léger décalage de quelques mètres peut avoir des effets conséquents [autres types de sol, parcelles avec un mode d'usage ou un historique carrément différent de celui qui était à étudier] sur les résultats d'une étude de la variabilité temporelle.

Par conséquent, veiller à retomber sur les mêmes parcelles est un impératif pour pouvoir étudier la variation temporelle du stock de COS dans un endroit donné notamment compte tenu de l'existence d'une mosaïque d'occupations de sol au niveau de la zone d'intervention. Il convient de prendre les mesures nécessaires pour augmenter les chances de retomber sur les mêmes parcelles. Travaux sur SIG & télédétection, recouplement sur terrain sont autant de moyens possibles pour améliorer la précision lors de l'identification des anciens points de prélèvement. Mais il est tout aussi nécessaire de corriger les « coordonnées théoriques » (anciennes coordonnées) en tenant compte de la déclinaison magnétique et du biais éventuel introduit par la différence d'outils ou de méthodes utilisées pour la reconnaissance de ces points (précision graphique sur un fond de carte au 1/100.000, GPS...).

Néanmoins, l'idéal serait d'effectuer une étude de la variation temporelle au niveau d'un dispositif fixe de longue durée. Cette initiative, en plus de minimiser les risques de faire naître des décalages entre les points de prélèvement, permet de faciliter l'accès à l'historique de la parcelle (les modes d'usages successifs et d'éventuels incidents s'y étant produits). Sinon, il faudrait encore recourir à la télédétection et au SIG pour voir l'évolution des modes d'usage des sols compte tenu du fait qu'il est parfois impossible de tirer les informations nécessaires auprès des propriétaires ou de la population locale en raison de la vétusté des informations à collecter.

Action 2.2 : Analyse de la dynamique des stocks de carbone organique du sol

Voir l'évolution ou encore la dynamique serait bien plus intéressant que de voir la variabilité temporelle. Toutefois, contrairement à l'étude de la variabilité temporelle, 2 temps ne suffisent pas pour appréhender la dynamique des stocks de COS. Il en faut au moins 3 ou 4 voire plus selon les précisions recherchées. C'est donc dans ce cadre précis que le recours à un dispositif de longue durée devient un impératif pour la conduite de l'étude.

L'approche qui consiste à recourir à une base de données sur le sol, comme celle utilisée dans la présente étude, pourrait aussi être envisagée pour ce faire. Mais pour que cette BDD puisse être valorisée de la sorte, d'importants travaux de restructuration, d'actualisation (intégration des études récentes ou en cours) et de normalisation des données devraient être effectués au préalable (Beaudou et Le Martret, 2004).

PARTIE 5 : CONCLUSION

CONCLUSION

La présente étude s'est proposée de déterminer la variabilité spatio-temporelle des stocks de C des sols dans la région d'Antsirabe.

La variabilité spatiale a été appréhendée à travers l'étude de la variabilité verticale (suivant la profondeur du sol de 0-30 cm et de 0-100 cm) et l'étude de la variabilité suivant les types de sol. La significativité de la différence entre : les moyennes des stocks de COS sur 30 cm et 100 cm ; entre les stocks de COS de chaque type de sol et entre les stocks de COS des types de sol sur 30 cm et 100 cm a permis de confirmer cette variabilité spatiale. Celle-ci s'est avérée être particulièrement nette en considérant à la fois les deux facteurs : « types de sol » et « profondeur ». Parmi eux, le facteur « profondeur » tend à être le plus déterminant. Les résultats de cette étude de la variabilité spatiale des stocks de COS à l'échelle de la région d'Antsirabe ont montré que plus de la moitié des stocks de COS de cette région est accumulée dans la couche superficielle du sol de 0 à 30 cm de profondeur.

A l'issue de cette première partie de l'étude, des cartes de distribution des stocks de COS ont été établies pour ces profondeurs de 0-30 cm et de 0-100 cm. Elles ont été faites sur la base de la carte pédologique au 1/100000 de la région d'Antsirabe réalisée par Zebrowski et Ratsimbazafy en 1979. Cette étude a tiré profit de l'existence d'une étude en cours, relative à l'estimation des stocks de COS et menée dans le cadre du projet BIOVA qui est intervenu dans cette même région. Des valeurs de stocks de COS obtenus dans le cadre de ce projet ont été intégrées dans la présente étude pour l'élaboration des cartes de C sur 0-30 cm. Ce projet n'ayant analysé les stocks de COS que sur les 30 premiers centimètres du sol, les cartes de C sur 0-100 cm ont été réalisées uniquement à partir des données de la présente étude.

La variabilité temporelle a été, quant à elle, appréhendée à travers l'analyse en deux temps (t_0 et t_1) des stocks de COS de la région d'Antsirabe. Les données à t_0 sont celles au temps de l'étude de Zebrowski (1974) portant sur des sites de prélèvement dans la BDD ancienne (BDD ValSol) et qui sont disponibles dans la notice explicative de la carte pédologique sus-mentionnée. Les données à t_1 sont composées par des stocks de COS actuels, émanant uniquement de la présente étude et portant sur les mêmes sites de prélèvements que ceux de Zebrowski. Quarante années se sont donc écoulées entre ces 2 dates. Cette étude a démontré que les stocks de COS de la région d'Antsirabe varient dans le temps, mais que la variation de ces stocks de COS n'est pas significative. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude de la variabilité temporelle des stocks de COS sont toutefois être trop ambigus pour pouvoir en tirer des conclusions fiables. Ils ne peuvent être considérés comme une réactualisation des données de la carte de Zebrowski et Ratsimbazafy. La raison en est qu'en réalité, bon nombre des sites de prélèvements actuels ne coïncident pas avec ceux de Zebrowski. Dans certains cas, ce décalage entre les anciens sites de prélèvement et les nouveaux est accompagné d'un changement dans la classification pédologique

des sites échantillonnés. Par ailleurs, le fait que la variabilité temporelle ait été analysée seulement au niveau de quelques horizons, et non au niveau de tout un profil, peut affecter la fiabilité des résultats obtenus dans le cadre de cette analyse.

Dans sa globalité, cette étude a ainsi permis de vérifier dans quelle mesure les données anciennes de la BDD ValSol peuvent être valorisées, pour étudier la variabilité temporelle, et jusqu'à quelle limite. Elle a également montré l'importance de certains « détails » qui peuvent pourtant se répercuter sur toute la fiabilité de l'étude. En l'occurrence, ces détails importants relèvent de l'échantillonnage et de la reconnaissance des sites de prélèvements (avec leurs coordonnées géographiques) dans l'espace, mais aussi dans le temps.

La méthode utilisée pour la conduite de cette étude a l'avantage d'être simple. Mais, elle s'est montrée peu apte à répondre aux attentes de l'étude en raison des contraintes rencontrées. En particulier, la non-représentativité des sites d'étude, en termes de diversité pédologique, associée à leurs faibles effectifs (12 sites pour une superficie d'environ 1.316 km² avec 30 types de sols) est à l'origine des zones laissées comme étant non identifiées sur les cartes de distribution des stocks de COS. Dans le cadre de la variabilité des stocks de COS suivant les types de sol, cette étude n'a pas permis de discerner une tendance générale sur les types de sol les plus riches ou les plus pauvres en termes de stocks de COS. Ceci pourrait suggérer que d'autres facteurs susceptibles de contribuer à faire varier les stocks de COS à l'échelle régionale auraient du être considérés pour appréhender la variabilité spatiale des stocks de COS à cette échelle. Mais le fait que les types de sol échantillonnés ne concernent que des catégories proches de quelques classes générales de sol (majoritairement à celle des sols ferrallitiques) et que l'étude n'a considéré que des sites représentatifs (avec uniquement des répétitions intra-sites) pourraient aussi en être les causes. Concernant l'étude de la variabilité temporelle, l'utilisation de méthodes différentes pour chaque date (t_0 et t_1) a abouti à des contraintes majeures susceptibles d'altérer la fiabilité des conclusions tirées de cette étude. L'absence de valeurs de densités apparentes des sols au temps ancien (t_0) et le fait qu'à cette époque, les analyses des paramètres physiques et chimiques du sol aient été réalisées à des horizons de profondeurs variables (et non systématiquement tous les 10 cm) en sont des exemples. L'absence d'informations complètes sur l'historique des modes d'usage ou de gestion des sols au niveau des sites d'étude constitue également une contrainte non négligeable dans le cadre de cette étude de la variabilité temporelle des stocks de COS.

Par conséquent, au regard de cette étude, il apparaît important d'avoir des données complètes sur les stocks de COS au niveau de l'ensemble des sites représentatifs pour spatialiser les stocks de COS d'une région donnée. Le recours à un dispositif fixe de longue durée est aussi conseillé pour éviter toutes sortes de contraintes liées au décalage d'un même site de prélèvement au fil du temps. Enfin, dans le cadre d'une étude portant sur l'exploitation des BDD (surtout les BDD anciennes), les contraintes d'ordre méthodologique et les limites qui en découlent semblent inévitables. Il importe cependant de déterminer comment les surmonter pour valoriser au mieux ces BDD.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Albrecht A. et Feller Ch., (2007). Distribution granulo-densimétrique de la matière organique dans un sol argileux sous semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres malgaches. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 14, 2, 2007 – pages 117 à 133.
- Andriamihaja M. (2011). *Evaluation des stocks de carbone de la litière de la biomasse hypogée et du sol suivant les modes d'utilisation des terres et la position topographique dans la Région d'Ambohitantely*. Mémoire de fin d'études ESSA Eaux et Forêts.
- Arrouays D., Feller C., Jolivet C., Saby N., Andreux F., Bernoux M., C. Cerri, (2003). Estimation de stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps *Étude et Gestion des Sols*, Volume 10, 347 à 355
- Beaudou, A. G. et Le Martret H., (2004). Miruram/Valsol : Un système d'information et une base de données pour représenter les sols tropicaux et leurs environnements. *Étude et Gestion des Sols*, Volume **11**: 271-284.
- Bielders C., Hiel M.-P., Cambier J-F, Aniset J., (2013). Impact des techniques culturales sur le taux de carbone organique du sol et la stabilité des agrégats dans la province du Hainaut (projet Interreg IV Prosensols). Rapport. UCL - " SST/ELI/ELIE - Environmental Sciences ".
- Boissezon, P. (1973). Les matières organiques des sols ferrallitiques. Les sols ferrallitiques, Tome 1 : 9-66, Paris, ORSTOM, I.D.T. 21
- Brossard M. et Rajaonarivo A., (2008). Une base de données pour la collecte et la valorisation des données sols et paysages de Madagascar. 2006 – 2007. Rapport du projet VALSOL-MADAGASCAR.
- Buringh, P. (1984). *Organic carbon in soils in the world*. New York: John Wiley and Sons, SCOPE.
- Collinet J. (1969). Contribution à l'étude des stonelines dans la région du Moyen Ogooué (Gabon). *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., **VII**, 1,3-42 .
- Dabin, B., (1970). Analyses des matières organiques dans les sols. Laboratoire de chimie des sols et pédologie appliquée. ORSTOM, Collection n°5490 pédo.
- FAO (2010). *Global Forest Resources Assessment 2010, Main Report*. FAO Forestry paper N°163, Rome.
- FAO (2007). *Changements climatiques et sécurité alimentaire: un document cadre*, FAO, Rome.
- FAO (2002). *La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres. Rapport sur les ressources en sols du monde -FAO*. Rome, 2002. Rapport basé sur le travail de Michel Robert de l'Institut National de Recherche Agronomique, Paris, France.

- Feller C. (2008). Histoire MOS, ESSA Université d'Antananarivo. 5 mai 2008. *Non publié*.
- Feller C. et Beare M.H., (1997). Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79: 69-116.
- Feller C. et Sandron F., (2010). Parcours de recherche à Madagascar : l'IRD-ORSTOM et ses partenaires. IRD Editions, Marseille.
- Feller C., Fritsch, E., Poss R., Valentin C., (1991). Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferralitiques
- Gasser M.-O., Perron M.-H., Grenier M., (2011). Effets de l'application des fumiers sur la teneur et la saturation des sols en phosphore dans Chaudière-Appalaches. Rapport d'analyse des résultats. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. Québec. 29 p.
- GIEC (2011). Gérer les risques d'événements extrêmes et de catastrophes en vue d'une meilleure adaptation aux changements climatiques.
- GIEC (2007). Changements climatiques 2007. Quatrième rapport d'évaluation.
- GIEC (2006). Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre.
- GIEC (2001). Bilan 2001 des Changements Climatiques: Mesures d'atténuation. W.R.H.J.Y.D.WGI.
- Grinand C. (2010). Développement d'une méthode de spatialisation des stocks de carbone dans le sol à l'échelle régionale - Application à un projet REDD à Madagascar. Mémoire MASTER – SILAT. AgroParistech et Montpellier SupAgro. France.
- Grinand, C., Rajaonarivo, A., Bernoux, M., Pajot, V., Brossard, M., Razafimbelo, T.M., Albrecht, A. and Le Martret, H., (2009). Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols*, **16**(1): 23-33.
- 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.
- Le Clec'h S., Oszwald J., Jégou N., Dufour S., Cornillon P.-A., Miranda I., Gonzaga L., Grimaldi M., Gond V., Arnaud de Sartre X., (2013). Cartographier le carbone stocké dans la végétation : perspectives pour la spatialisation d'un service écosystémique. *Bois et Forêts des Tropiques (BFT)*, 316 (2013). CIRAD.
- Leprun, J.C, Razafinjara, L., Rajaonarivo, A., Christian, F., (2010). Pédologie

- Locatelli, B. (1999). Bilan de la dynamique carbone du type forestier Roble/Rauli/Coigue. Rapport de la première mission courte d'appui, CONAF-ONF, Réserve forestière de Malleco, parc national de Tolhuaca (Chili). 63 p.
- MEEFT et PNUE, (2007). Rapport sur l'Etat de l'Environnement à Madagascar (REEM).
- Parker C., Mitchell A., Trivedi M., Mardas N., (2009). Le petit livre du REDD. Guide de propositions gouvernementales et non gouvernementales visant à réduire les émissions liées à la déforestation et à la dégradation de la forêt.
- Parton W. J., Scurlock J. M. O., Ojima D. S., Gilmanov T. G., Scholes M. C., Schimel D. S., Kirchner T., Menaut J.-C., Seastedt T., Garcia Moya E., Kamnalrut A. AND Kinyamario J. I., (1993). 'Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide'. *Global Biogeochemical Cycles*, **7**: 785-809.
- PEERS-CarSoM (2012). Fiche récapitulative. **Non publié.**
- Poidevin D. (1999). La carte : moyen d'action. Guide pratique pour la conception et la réalisation de cartes. Tours, Ellipses.
- PRDR Vakinankaratra (2007). Programme Régional de Développement Rural, GTDR Vakinankaratra.
- Quenea K. (2004). *Etude structurale et dynamique des fractions lipidiques et organiques réfractaires de sols d'une chronoséquence forêt/maïs (Cestas, sud ouest de la France)*. Thèse de doctorat de l'Université Paris VI. Spécialité : Fonctionnement physique, chimique et biologique de la biosphère continentale.
- Rakotonarivo O.S. (2010). *Les stocks de carbone de la biomasse aérienne et du sol selon la distribution altitudinale et le mode d'usage des terres en climat tropical humide et semi-aride. Cas de la Région de Taolagnaro*. Mémoire de DEA ESSA-Forêt.
- Rasolofonirina F. et Ratohiarijaona S., (2009). « La formation agricole et rurale à Madagascar ». Communication à l'atelier international « Crises alimentaires : la formation des ruraux en question » ; Food and Agriculture Organisation (FAO), Rome ; 4 et 5 juin.
- Razafimahatratra H.M. (2014). Rapport de mission: Campagne de prélèvement d'échantillons de sol à Antsirabe (04 au 15 février 2014). Ré-échantillonnage pour les anciens sites utilisés durant l'élaboration de la carte pédologique d'Antsirabe par Zebrowski et Ratsimbazafy en 1979.
- Razafimahatratra H.M. (2011). *Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen Infrarouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat*. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo

- Razafimahatratra H., Andriampiolazana M., Razakamanarivo H., Le Martret H., Razafimbelo T., Brossard M., (2014). Variabilité verticale des stocks de carbone du sol d'Antsirabe (Madagascar). *Non publié.*
- Razafimbelo T. M. (2005). *Stockage et protection du carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des hautes terres malgaches.* Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie -Université de Montpellier II, Montpellier.
- Razafindramanana N.C. (2011). *Contrôle des pertes en terre, en carbone et en nutriments par érosion hydrique sous systèmes en semis direct sur couverture végétale permanente des hautes-terres centrales malgaches.* Thèse de doctorat en co-tutelle SupAgro-Montpellier et Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques.
- Razakamanarivo R. H. (2009). *Potentialités de stockage du carbone dans le système plante-sol des plantations d'eucalyptus des hautes terres malgaches.* Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo.
- Terre Malgache (2008), (26), 179 p. Séminaire International : Les Sols Tropicaux en Semis Direct sous Couvertures Végétales, 2007/12/03-08, Antananarivo.
- Vagen T.G., Winowiecki L.A., (2013). Mapping of soil organic carbon stocks for spatially explicit assessments of climate change mitigation potential. *Environmental Research Letters*
- Vernyere L. (2007). *Proposition de méthodologie d'évaluation des stocks de carbone des sols dans le projet Puits de carbone PSA-ONF International (Fazenda São Nicolau, Mato Grosso, Brésil).* Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
- Zebrowski Cl. et Ratsimbazafy Cl. (1979). Notice explicative N°83. Carte pédologique de Madagascar à 1/100.000. Feuille Antsirabe. ORSTOM, Paris 1979.
- Zinn L., Lal R., Dimas V.S.R., (2005). Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian cerrado soils. *Geoderma* 127 (2005) 168-173.

Site internet et encyclopédie numérique:

- <http://www.antsirabe-tourisme.com/geographie.php>. Consulté le 06 mai 2014.
- <http://mcarpenter.chez-alice.fr/SOL.htm>. Consulté le 06 mai 2014.
- <http://sig-pour-tous.forumactif.com> : QGis 1.7.0-Wroclaw pas à pas n°4 . Christine C. , Aug 07, 2011. Consulté le 24 mai 2014.
- Microsoft Encarta 2009. © 1993-2008 Microsoft Corporation

Communication personnelle :

- Brossard M. : chercheur à l'IRD (France) et responsable du projet PEERS-CarSoM (chercheur Nord)
- Randrianandrasana L. N. : stagiaire (Master 2) au LRI dans le cadre du projet BIOVA

ANNEXES

Annexe 1: Correspondance entre les anciens sites de prélèvement et les sites actuels et leurs caractéristiques

Id_Zebro	Id_actuel	Localité	Latitude (en DD)	Longitude (en DD)	Altitude	Roche mère	Types de sol	Description du site
ATZ-12	TVBA-1	Amboninatsahabe	19,98348	47,03927	1493 m	Migmatite	Sols peu évolués	près de la crête, pente 10%,
ATZ-18	TVBA-3	Andranonanahary	19,976	46,90181	1838 m	Migmatite	Sols ferrallitiques	pente 30%
ATZ-5	TVBA-4	Maitsotady	19,95893	47,07995	1547 m	Migmatite	Sols ferrallitiques	Exposé à l'ouest, pente 20%
ATZ-104	TVBA-9	Près d'Ambohitromby	19,84904	46,90269	1611 m	Scories basaltiques	Andosols	pente 5%, près du cratère, sol volcanique
ATZ-59	TVBA-10	Tsarazafy	19,7595	46,93445	1962 m	Matériaux pyroclastique basique	Sols peu évolués	Exposé à l'Ouest, pente environ 30% ; [Da jusqu'à 50-60 cm, rocher à 80 cm]
ATZ-21	TVBA-13	Aambohijatovo	19,88296	46,95429	1583 m	Matériaux volcaniques	Sols ferrallitiques	pente 10%
ATZ-41	TVBA-14	Ambohiambo	19,83806	47,09602	1671 m	Coulée volcanique basique	Sols ferrallitiques	pente 5%
ATZ-79	TVBA-15	Andrakotra	19,68884	46,9818	2128 m	Basalte	Sols ferrallitiques	pente de 30%, exposée au Nord, en bas de pente
ATZ-13	TVBA-16	Ambositrakely	19,97797	47,00527	1512 m	Coulée scoriacé basique	Sols ferrallitiques	replat
ABR-3	TVBA-17	Mahazoarivo	19,79944	46,86993	1555 m	Coulée basaltique	Sols ferrallitiques	Pas de pente
ATZ-73	TVBA-18	Mandraza	19,79987	46,98652	1706 m	Coulée volcanique	Sols ferrallitiques	pente 15%
ATZ-60	TVBA-19	Tsarazafy	19,76942	46,92132	1842 m	Coulée volcanique	Sols ferrallitiques	Terrain plat
ATZ-77	TVBA-21	Antsahabe	19,71486	46,96823	1987 m	Matériaux pyroclastique acide	Sols ferrallitiques	pente 10%
ATZ-80	TVBA-22		19,71687	47,07972	1903 m	Trachyte	Sols ferrallitiques	pente de 30%
ATZ-28	TVBA-24	Ambohimanamora	19,93167	47,02855	1478 m	Sédiment volcano- lacustre	Sols ferrallitiques	pas de pente

Source : Razafimahatratra, 2014 adapté par l'auteur, 2014

Annexe 2: Stocks de carbone organique des sols sur 30cm des sites du projet BIOVA avec leurs coordonnées géographiques et leurs correspondances aux sites de Zebrowski

Sites N°	Correspondance aux sites de Zebrowski	Codes	Types de sol	Latitude (en degré décimal)	Longitude (en degré décimal)	SCOS sur 30cm (Mg C/ha)
FM 14	TVBA 1	SPE-NC-ER-SC	Sol peu évolué-non-climatique-d'érosion régosolique-sur socle cristallin	19,9966944	47,0462778	90,04
FM 69	TVBA 2	SFFD-AER-M	Sol ferrallitique fortement désaturé - allitique avec érosion et remaniement sur migmatites	19,9759444	47,0546667	61,53
FM 70	TVBA 2			19,9780278	47,0551667	50,36
FM 6	TVBA 16	SFMD-A-H-CVB	Sol ferrallitique-moyennement désaturé-allitique-humifère sur coulée volcanique basique	19,8243889	47,0121944	92,91
FM 7	TVBA 16			19,8238889	47,0121111	76,22
FM 8	TVBA 16			19,8354167	47,0123333	58,08
FM 13	TVBA 16			19,8476111	47,0072778	126,38
FM 33	TVBA 16			19,8355278	47,0126944	53,04
FM 34	TVBA 16			19,9334444	47,0039167	76,12
FM 44	TVBA 16			19,9317222	47,0045556	237,77
FM 45	TVBA 16			19,86125	47,0164167	92,98
FM 53	TVBA 16			19,9077778	46,9653056	207,20
FM 54	TVBA 16			19,9081667	46,9648333	157,58
FM 55	TVBA 16			19,9087778	46,9648611	136,33
FM 56	TVBA 16			19,8951944	46,9648611	120,48
FM 57	TVBA 16			19,9074167	46,9691667	62,35
FM 60	TVBA 16			19,9065833	46,96725	200,32
FM 61	TVBA 16			19,9086111	46,9682778	103,73
FM 62	TVBA 16	19,8885833	46,9729722	86,30		

Sites N°	Correspondance aux sites de Zebrowski		Codes	Types de sol	Latitude	Longitude	SCOS sur 30cm (Mg C/ha)
FM 1	TVBA	24	SFFD-AER-M	Sol ferrallitique fortement désaturé-allitique avec érosion et remaniement sur migmatites	19,81925	47,0143611	64,06
FM 10	TVBA	24			19,8283056	47,0743056	82,59
FM 12	TVBA	24			19,8556944	47,0139444	82,43
FM 15	TVBA	24			19,9300556	47,04675	50,11
FM 16	TVBA	24			19,9109722	47,0363889	78,51
FM 18	TVBA	24			19,8931944	47,0452778	104,08
FM 19	TVBA	24			19,8930833	47,0453889	146,29
FM 21	TVBA	24			19,9088889	47,0351667	74,37
FM 22	TVBA	24			19,9014722	47,0388056	90,71
FM 24	TVBA	24			19,9008056	47,0348611	118,45
FM 28	TVBA	24			19,8268333	47,0733056	78,04
FM 29	TVBA	24			19,8388889	47,0144722	82,60
FM 30	TVBA	24			19,8391944	47,0145	96,12
FM 32	TVBA	24			19,839	47,0144167	84,14
FM 35	TVBA	24			19,8164722	47,0163611	71,51
FM 37	TVBA	24			19,8196389	47,0141111	65,57
FM 68	TVBA	24			19,9109722	47,0361389	100,01
FM 71	TVBA	24			19,8241944	47,0585	146,01
FM 72	TVBA	24			19,9095833	47,037889	77,03
FM 20	TVBA	24	19,9111944	47,039194	54,53		
FM 11	TVBA	26	SHPH-GE-AC	Sol hydromorphe peu humifère à gley d'ensemble sur alluvions cristallines	19,8558611	47,079972	85,41
FM 31	TVBA	29	SH-PG-SVL	Sols hydromorphes à pseudogley sur sédiment volcano-lacustre	19,8383889	47,015333	43,00
FM 47	TVBA	30	SH-OO-MV	Sols hydromorphes organiques oligotrophes sur matériaux volcaniques	19,9159444	46,951944	217,20
FM 48	TVBA	30			19,9108056	46,950250	133,08

Source : Com. Pers., Randrianandrasana, 2014

Annexe 3: Occupation des sols au temps de Zebrowski et celles au temps actuel

Occupation des sols au temps de Zebrowski	Id_Zebro	Id_actuel	Occupation des sols de nos jours (en Février 2014)
Strate herbacée : <i>Aristida rufescens</i> , quelques <i>Philippia</i>	ATZ-12	TVBA-1	Présence d'arbustes et de termitière
Strate herbacée : <i>Trachypogon spicatus</i> , <i>Ctenium concinum</i> , <i>Loudetia simplex</i> , <i>Aristida rufescens</i>	ATZ-18	TVBA-3	Parcelle en jachère d'environ 20 ans, végétation: Horona, Marombony, quelques pieds d'eucalyptus (5 ans), parcelle cultivée à côté
Strate herbacée : <i>Aristida rufescens</i> , <i>Ctenium concinum</i> , <i>Trachypogon spicatus</i>	ATZ-5	TVBA-4	végétation: Horimbato, quelques pieds de pin, très érodée
Jachère sur ancienne culture de maïs	ATZ-104	TVBA-9	Parcelle cultivée en patate douce (2 ans) après une mise en jachère de 5 mois, autres végétations: tsipipihina, tanandalitra, sol volcanique
Strate herbacée : <i>Pennisetum pseudotriticoïdes</i> , <i>Trachypogon spicatus</i>	ATZ-59	TVBA-10	Présence importante de gros cailloux en surface, sol couvert de: horompotsy, doredaka. Exposé à l'Ouest, parcelle jamais cultivée.
Ancienne culture de maïs et haricot. Jachère de <i>Cynodon dactylon</i> , <i>Digitaria longiflora</i>	ATZ-21	TVBA-13	Culture de maïs après une mise en jachère d'un an, autres végétations: tsipipina, bakakely, hanitrapatsaka, talapetraka
Strate herbacée : <i>Pennisetum pseudotriticoïdes</i> , <i>Trachypogon spicatus</i>	ATZ-41	TVBA-14	Parcelle jamais cultivée, quelques pieds de pin et de mimosa, parcelle cultivée à côté (en haut), exposée à dominante: bozaka (aristida) l'Ouest, végétation
Jachère graminéenne : <i>Cynodon dactylon</i> , <i>Digitaria longiflora</i> , <i>Pennisetum pseudotriticoïde</i> , quelques arbustes (<i>Acacia dealbata</i>)	ATZ-79	TVBA-15	Parcelle en jachère
Culture de maïs	ATZ-13	TVBA-16	Parcelle en jachère, présence d'eucalyptus (> 20an), culture précédentes: manioc, patate douce
Aménagement de rizière en terrasse	ABR-3	TVBA-17	cultivée et déjà récoltée (association pomme de terre et patate douce), végétation en surface: Tsipipihina, Bakakely, karepoka
Strate herbacée : <i>Pennisetum pseudotriticoïdes</i> , <i>Trachypogon spicatus</i> , quelques <i>Helichrysum</i>	ATZ-73	TVBA-18	Parcelle jamais cultivée, végétations: horombato, Rambiazina et Mimosa, quelques pieds de pin
Ancienne culture de maïs, jachère à base de <i>Stoebe sp</i> et <i>Cynodon dactylon</i>	ATZ-60	TVBA-19	Terrain en jachère depuis 3ans, présence des repousses de mimosa (3ans) sur la partie sud tandis que la partie nord devient un terrain de foot, autres végétations : horompotsy, vilonombalahy, doredaka
Jachère à <i>Stoebe sp</i> et <i>Pennisetum pseudotriticoïdes</i> , quelques <i>Acacia dealbata</i>	ATZ-77	TVBA-21	Parcelle sous une plantation de pin (âges 20-25 ans), présence de mimosa
Strate herbacée : <i>Pennisetum pseudotriticoïdes</i> , <i>Trachypogon spicatus</i> , <i>Ctenium concinum</i>	ATZ-80	TVBA-22	Plantation de pin de 5 ans mais la parcelle a déjà été plantée de pin avant cela, autres végétations: mimosa
Strate herbacée : <i>Pennisetum pseudotriticoïdes</i> , <i>Aristida rufescens</i> , <i>Hyparrhenia rufa</i>	ATZ-28	TVBA-24	Parcelle en jachère de 2 ans, culture précédente: maïs associée au riz pluvial, autres végétations: Beandrongy, Kideda

Annexe 4: Variation due à l'intégration des valeurs des stocks de carbone du sol du projet BIOVA

Fluctuation des écart-types et coefficient de variation des stocks de carbone des types de sol présents à la fois dans le cadre de cette étude et celle du projet BIOVA

	TVBA				BIOVA				TVBA et BIOVA			
	n	μ	Ecart-type	CV (%)	n	μ	Ecart-type	CV (%)	n	μ	Ecart-type	CV (%)
TVBA 1	3	95,7	3,94	4,11	1	-	-	-	4	94,28	4,28	4,54
TVBA 16	3	100,26	4,43	4,42	16	117,99	56,53	47,91	19	115,19	52,05	45,18
TVBA 24	3	144	2,23	1,55	20	87,36	25,81	29,55	23	94,75	30,93	32,64

- : inexistant car stock unitaire d'un échantillon composite

μ : moyenne

Annexe 5: Bilan du stock de carbone organique du sol avec considération du décalage des sites

N= 16

Site actuel	Correspondance réelle aux sites anciens	Profondeur (cm)	Teneur ancien en C (‰)	Da correspondante	Stock ancien sans refus (Mg C/ha)	Stock actuel correspondant (Mg C/ha)	ΔS COS	ΔS COS (%)
TVBA 1	TVBA 2	20-40	16,76	1,54	25,88	17,68	-8,20	-31,69
TVBA 1	TVBA 2	60-80	6,99	1,54	10,73	6,05	-4,68	-43,66
TVBA 3	TVBA 3	30-40	7,8	1,34	10,43	20,78	10,35	99,25
TVBA 4	TVBA 4	20-40	12,28	1,40	17,17	26,26	9,09	52,90
TVBA 13	TVBA 16	40-60	15,85	1,27	20,13	18,00	-2,13	-10,59
TVBA 13	TVBA 16	80-100	4,39	1,45	6,34	3,50	-2,85	-44,88
TVBA 14	TVBA 14	90-100	1,09	0,96	1,04	8,14	7,10	679,37
TVBA 15	TVBA 15	30-40	5,6	0,88	4,93	35,08	30,15	611,82
TVBA 16	TVBA 3	30-40	7,8	1,34	10,43	24,23	13,80	132,36
TVBA 17	TVBA 17	20-60	49,9	0,94	46,96	17,65	-29,31	-62,42
TVBA 17	TVBA 17	90-150	7,91	0,97	7,67	12,72	5,04	65,74
TVBA 18	TVBA 18	20-40	17,2	1,10	18,85	9,78	-9,07	-48,11
TVBA 21	TVBA 5	50-60	27,3	0,99	27,14	5,03	-22,11	-81,47
TVBA 21	TVBA 5	75-80	4,7	1,01	4,75	1,75	-3,00	-63,16
TVBA 22	TVBA 22	100-120	1,8	1,11	2,00	12,96	10,96	548,64
TVBA 24	TVBA 24	30-40	26,98	0,95	25,63	36,06	10,42	40,67

Source : Auteur, 2014