

Tiphaine Chevallier, Tantely M. Razafimbelo, Lydie Chapuis-Lardy et Michel Brossard (dir.)

**Carbone des sols en Afrique**  
Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles

IRD Éditions

---

## Chapitre 7. Stocks de carbone dans les éco- et agrosystèmes à Madagascar

Capitalisation des études récentes

**Manony Andriampiolazana, Herintsitohaina Razakamanarivo, Alain Albrecht, Misalalasoa Andriamihaja, Ny Ando Rakotomampionona Andrianaly, Carole Andrianirina, Marie Lucia Fanjaniaina, Clovis Grinand, Ambinintsoa Heritokilalaina, Irina Manorotiana, Niela D. Raharimalala, Jacques Berthieu Rajoelina, Onjamirindra S. Rakotonarivo, Sariaka R. Rakotondrazafy, Nantenaina Ramboatiana, Anthony S. Ramiandrisoa, Nandrianina Ramifehiarivo, Narindra H. Rakotovoao, Finaritra Randevoson, Jeannicq Randrianarisoa, Hery Razafimahatratra, Norosoa C. Razafindramanana, Ando Razakavololona, Onjaherilanto Rakotovoao Razanakoto, Heritiana J. G. Saneho, Arthur A. Zafindrabenja, Lydie Chapuis-Lardy et Tantely M. Razafimbelo**

---

DOI : 10.4000/books.irdeditions.34932

Éditeur : IRD Éditions, FAO

Lieu d'édition : Rome, Marseille

Année d'édition : 2020

Date de mise en ligne : 16 décembre 2020

Collection : Synthèses

ISBN électronique : 9782709928373



<http://books.openedition.org>

**Édition imprimée**

Date de publication : 1 septembre 2020

**Référence électronique**

ANDRIAMPIOLAZANA, Manony ; et al. *Chapitre 7. Stocks de carbone dans les éco- et agrosystèmes à Madagascar : Capitalisation des études récentes* In : *Carbone des sols en Afrique : Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles* [en ligne]. Rome, Marseille : IRD Éditions, 2020 (généré le 18 décembre 2020). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/irdeditions/34932>>. ISBN : 9782709928373. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.34932>.

---

# Stocks de carbone dans les éco- et agrosystèmes à Madagascar

## Capitalisation des études récentes

*Manony ANDRIAMPIOLAZANA, Herintsitohaina RAZAKAMANARIVO,  
Alain ALBRECHT, Misalalasoa ANDRIAMIHAJA,  
Ny Ando RAKOTOMAMPIONONA ANDRIANALY, Carole ANDRIANIRINA,  
Marie L. FANJANIAINA, Clovis GRINAND, Ambinintsoa HERITOKILALAINA,  
Irina MANOROTIANA, Niela D. RAHARIMALALA, Jacques B. RAJOELINA,  
Onjamirindra S. RAKOTONARIVO, Sariaka R. RAKOTONDRAZAFY,  
Nantenaina RAMBOATIANA, Anthony S. RAMIANDRISOA,  
Nandrianina RAMIFEHIARIVO, Narindra H. RAKOTOVAO, Finaritra RANDEVOSON,  
Jeannicq RANDRIANARISOA, Hery RAZAFIMAHATRATRA,  
Norosoa C. RAZAFINDRAMANANA, Ando RAZAKAVOLOLONA,  
Onjaherilanto RAKOTOVAO RAZANAKOTO, Heritiana J. G. SANEHO,  
Arthur A. ZAFINDRABENJA, Lydie CHAPUIS-LARDY, Tantely M. RAZAFIMBELO*

## Introduction

La quantification du carbone organique des sols (COS) des différents agrosystèmes et écosystèmes naturels est essentielle afin de mieux orienter les stratégies d'adaptation et d'atténuation du changement climatique à différentes échelles : locale, nationale et internationale.

Pour un écosystème donné, le COS peut être contenu dans différents compartiments : la biomasse aérienne, la litière, les bois morts, les racines et les sols. Les sols jusqu'à 1 m de profondeur sont reconnus comme les principaux

réservoirs de carbone organique, avec près de 1 580 Gt C, tandis que le carbone contenu dans l'atmosphère s'élève à 750 Gt C et dans la biomasse terrestre à 610 Gt C dont 80 % sont attribués à la biomasse forestière (GIEC, 2007).

Le stockage de carbone organique dans les sols contribue à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Le COS est également un élément constitutif de la matière organique des sols et contribue de ce fait à la fertilité des sols. De part ces deux fonctions, environnementale et agronomique, le sol est ainsi une ressource naturelle essentielle pour permettre à l'humanité de faire face à l'insécurité alimentaire et au changement climatique.

Un certain nombre d'études sur la quantification du carbone dans le sol et la biomasse ont ainsi été menées à Madagascar entre 2004 et 2015. Ces études ont été effectuées à des fins scientifiques et/ou de gestion durable des territoires. Elles répondent à un besoin de données sur le COS pour (1) la connaissance des potentialités des agrosystèmes en termes de séquestration de carbone, (2) la mise en place de divers mécanismes (Mécanismes de développement propre ou MDP et la Réduction des émissions de gaz à effet de serre issues de la déforestation et de la dégradation des forêts ou REDD+) et, plus récemment, (3) la détermination des contributions déterminées au niveau national (CDN). Ces connaissances et leur diffusion auprès des instances nationales et internationales permettent ainsi de pouvoir négocier et débattre des intérêts de Madagascar et de l'Afrique dans les discussions internationales sur le changement climatique et les marchés carbone.

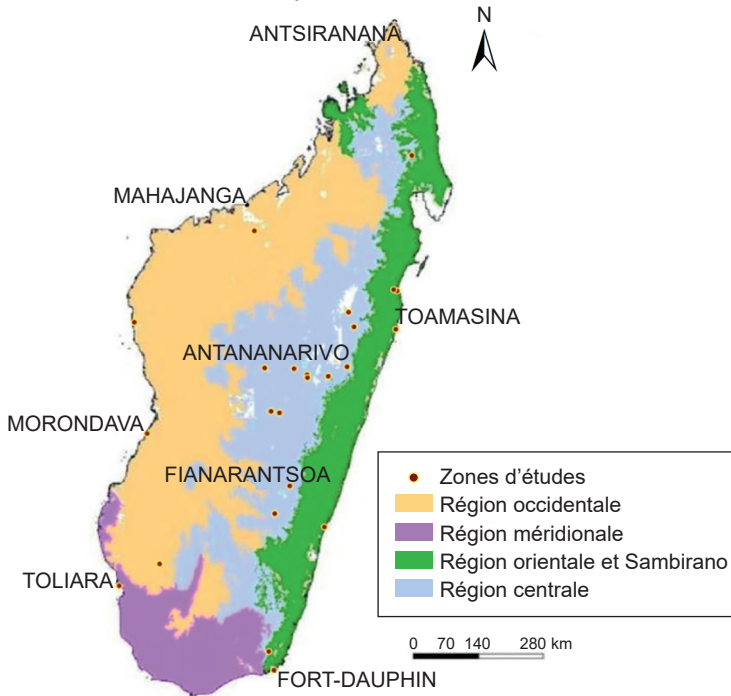
Le laboratoire des Radio-isotopes (LRI) de l'université d'Antananarivo, en collaboration avec différents partenaires de recherche nationaux et internationaux, a mené diverses études de quantification du COS à Madagascar. En dépit des différences d'objectifs spécifiques assignés à chacune d'elles, la plupart de ces études ont abouti à la détermination des stocks de COS au niveau de systèmes naturels ou cultivés présents dans les zones d'intervention.

Ce chapitre a ainsi pour objectif de valoriser ces acquis en effectuant un état des lieux du carbone organique des sols à Madagascar afin de mettre en exergue l'importance du compartiment « sol » en termes de stockage de carbone et d'évaluer l'impact des modes d'usage et de gestion des terres sur les stocks de COS à Madagascar.

## Matériels et méthodes

### Sites d'étude

Les sites d'étude sont répartis sur divers types de sols et dans toutes les régions de Madagascar, mais avec toutefois une majorité de situations dans la région centrale (fig. 1).



**Figure 1**

Localisation des zones d'étude du carbone organique du sol à Madagascar.

### Types et caractéristiques des sols

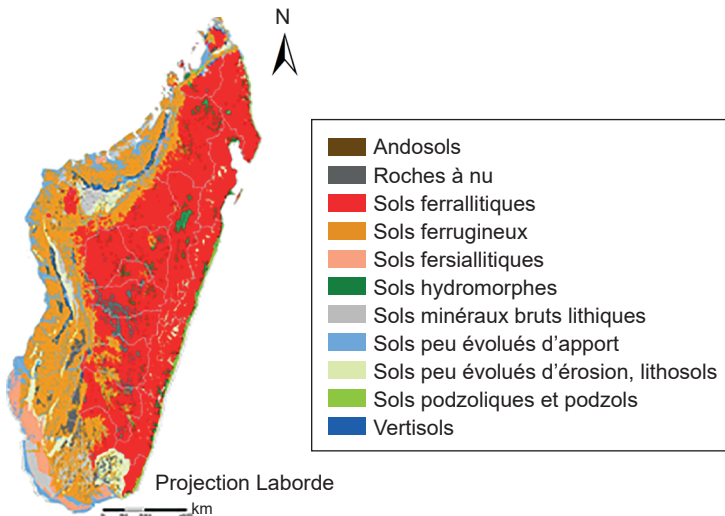
Les principaux types de sols présents à Madagascar (fig. 2 et tabl. 1, p. 58) sont :

- *les sols ferrallitiques* : sols caractérisés par une structure microgrenue dans les horizons de surface et une forte teneur en argile 1:1 de type kaolinite ; ils représentent près de la moitié des sols malgaches (BIED-CHARRETON *et al.*, 1981) ;
- *les sols ferrugineux* : sols caractérisés par une texture sableuse et une teneur en oxydes de fer élevée ; ce sont les sols les plus présents après les sols ferrallitiques, environ 28 % de la superficie de l'île ;
- *les sols fersiallitiques* : sols rouges à fortes teneurs en argiles et contenant des oxydes de fer ; ils sont essentiellement présents dans la partie Sud-Ouest de l'île ;
- *les Vertisols* : sols riches en humus fortement stabilisés, de couleur sombre et très argileux notamment en profondeur, caractérisés par la présence de larges fentes de retrait ;
- *les Andosols* : sols plus ou moins épais présentant des minéraux amorphes, une teneur en COS élevée ; ils sont généralement associés aux roches volcaniques sous climat froid, régulièrement humide ;

– *les sols hydromorphes* : sols caractérisés par une saturation de l'espace poral par l'eau de manière temporaire ou permanente entraînant des processus de réduction et d'oxydation du fer (suivant les cas) et un ralentissement de la décomposition de la matière organique ;

– *les sols peu évolués* : sols à faible degré d'évolution et d'altération possédant un profil A-C où l'horizon A a une teneur plus ou moins élevée en matière organique et l'horizon C altéré est de type ferrallitique.

L'étude de GRINAND *et al.* (2009) a considéré tous les types de sols présents à Madagascar. Cependant, la plupart des études sur le COS ont été effectuées sur quelques types de sols, le plus souvent – et parfois uniquement – sur les sols ferrallitiques prépondérants dans les régions centrale et orientale.



**Figure 2**  
Carte pédologique de Madagascar.  
Classification de la Commission de pédologie et de cartographie des sols (CPCS).

Source : BIED-CHARRETON, 1981.

### Modes d'usages des sols

Les modes d'usages abordés par les différentes études comprennent des écosystèmes naturels et des agrosystèmes (tabl. 1).

Les écosystèmes naturels comprennent :

– *les forêts humides* : ce sont des forêts qui se situent dans des régions Nord-Est, Est et Sud-Est de l'île où le climat est humide à subhumide. Elles ont une structure complexe, une grande richesse floristique et animale et une prédominance d'essences à bois dur pouvant atteindre 40-50 mètres de hauteur (DUPUY *et al.*, 1999) ;

– *les forêts sèches* : ce sont des forêts qui se situent dans des régions Sud, Ouest et Nord-Ouest à climat sec à aride. Elles sont caractérisées par une structure bi-strate, avec une strate arborée décidue (hauteur 15-20 mètres) sous laquelle se développe une strate arbustive et graminéenne (DUPUY *et al.*, 1999) ;

– *les forêts dégradées* : ce sont des forêts naturelles qui ont subi des pressions anthropiques allant de la cueillette à la coupe (HERITOKILALAINA, 2010 ; ZAFINDRABENJA, 2014) ;

– *les savoka* : ce sont des formations ligneuses secondaires. Elles s'établissent naturellement après des interventions anthropiques importantes de la forêt (RAZAFIMAHATRATRA, 2006 ; ZAFINDRABENJA, 2014) ;

– *les forêts artificielles* : ce sont des cultures forestières, reproduites par semis ou par plantation (FAO, 1981) ;

– *les savanes*, arborées ou herbeuses : les savanes arborées sont des prairies composées d'un mélange d'espèces herbacées, de broussailles et d'espèces ligneuses alors que les savanes herbeuses sont des prairies composées à plus de 90 % d'espèces herbacées (graminées) (GRINAND, 2010 ; ANDRIAMIHAJA, 2011) ;

– *les jachères* : elles correspondent à l'état des parcelles entre la récolte d'une culture et la mise en place de la culture suivante (SEBILLOTTE, 1976) ;

– *les mangroves* : ce sont des formations sempervirentes côtières poussant en dessous du niveau de la mer. Les espèces végétales, peu nombreuses, doivent supporter l'immersion temporaire en milieu halophile (DUPUY *et al.*, 1999).

Les agrosystèmes reposent sur :

– *la culture itinérante* : ce système est basé sur l'abattis-brûlis de la forêt. La culture sur brûlis (ou *tavy* en malgache) est considérée comme une culture itinérante. Les périodes de culture continue sont relativement brèves et les périodes de jachère sont relativement longues (FAO, 1981) ;

– *la culture conventionnelle* : elle est caractérisée à Madagascar par un labour entre deux cultures, créant un lit de semences avec des opérations de labour secondaires (HOOGMOED et KLAIJ, 1997), une exportation d'une partie des résidus de récolte et l'utilisation de fumier s'il est disponible. Dans les études considérées, les cultures traditionnelles concernent le riz (irrigué ou pluvial) ainsi que les cultures vivrières (maïs, manioc, etc.) ;

– *l'agroforesterie* : l'agroforesterie est une association culturelle entre une culture annuelle et une culture pérenne sur une même parcelle. La culture pérenne est souvent dominée par les arbres fruitiers ou des arbres de cultures de rente dans les études réalisées ;

– *les pratiques agro-écologiques* : selon la FAO (2018), l'agro-écologie vise « à appliquer des concepts et principes écologiques de manière à optimiser les interactions entre les végétaux, les animaux, les humains et l'environnement ». Dans notre étude, ces pratiques concernent essentiellement les systèmes de culture sous couverture végétale, vivante ou morte, associés à du non-labour.

**Tableau 1**  
 Caractéristiques des études sur les stocks de COS réalisées à Madagascar entre 2004 et 2015.

Source	Usages des terres	Types de sols	Profondeurs (cm)
ANDRIAMIHAJA, 2011	Forêts dégradées, savanes, cultures conventionnelles	Ferrallitique	0-30
ANDRIAMPIOLAZANA, 2012	Forêts sèches, forêts artificielles, savanes	Ferrugineux, hydromorphe	0-30
ANDRIAMPIOLAZANA, 2014	Forêts artificielles, savanes, cultures conventionnelles, jachères	Ferrallitique, peu-évolué	0-30 0-100
ANDRIANALY, 2013	Cultures conventionnelles, pratiques agro-écologiques	Ferrallitique	0-30
FANJANIAINA, 2012	Cultures conventionnelles	Andosol, ferrallitique	0-30
GRINAND et al., 2009	Forêts sèches, forêts humides, forêts dégradées, savanes, cultures conventionnelles	Andosols, ferrallitique, ferrugineux, fersiallitique, hydromorphe, minéral brut, peu-évolué, podzolisé, Vertisol	0-30
GRINAND et al., 2010	Forêts sèches, forêts humides, savanes, cultures conventionnelles	Ferrallitique, ferrugineux	0-30
HERITOKILALAINA, 2010	Forêts humides, forêts dégradées, cultures conventionnelles, savoka	Ferrallitique	0-20 0-100
MANOROTIANA, 2011	Forêts artificielles	Ferrallitique	0-30
RAHARIMALALA, 2013	Pas d'informations disponibles sur les modes d'usage des sols	Ferrugineux, ferrallitique, Vertisol	0-30
RAJOELINA, 2012	mangrove	Peu-évolué	0-100
RAKOTONARIVO, 2009	Forêts artificielles	Ferrallitique	0-30
RAKOTONARIVO, 2010	Forêts sèches, forêts humides	Ferrallitique	0-100
RAMBOATIANA, 2014	Forêts humides, savanes, jachères, cultures itinérantes	Ferrallitique	0-30 0-100
RAMIANDRISOA, 2011	Agroforêts	Ferrallitique	0-30
RAMIFEHIARIVO, 2014	Forêts humides	Ferrallitique	0-30
RANDEVOSON, 2012	Forêts sèches	Ferrugineux	0-30
RANDRIANARISOA, 2014	Forêts humides	Ferrallitique	0-30
RAZAFIMAHATRATRA, 2006	Forêts humides, forêts artificielles, forêts dégradées, cultures conventionnelles, savoka, jachères	Ferrallitique	0-20 0-40
RAZAFIMBELO, 2005	Cultures conventionnelles, pratiques agro-écologiques	Ferrallitique	0-20 0-40

Source	Usages des terres	Types de sols	Profondeurs (cm)
RAZAFIMBELO <i>et al.</i> , 2010	Cultures conventionnelles, pratiques agro-écologiques, jachères	Ferrallitique, peu-évolué, hydromorphe fersiallitique, ferrugineux	0-20
RAZAFINDRAMANANA, 2006	Forêts artificielles, savanes, cultures conventionnelles	Ferrallitique	0-20 0-40
RAZAKAMANARIVO, 2009	Forêts artificielles, savanes, cultures conventionnelles	Ferrallitique	0-30
RAZAKAVOLOLONA, 2007	Forêts artificielles	Ferrallitique	0-30
RAZANAKOTO, 2008	Agroforêts	Ferrallitique	0-30
SANEHO, 2014	Forêts humides, pratiques agro-écologiques, cultures itinérantes, agroforêts	Ferrallitique	0-30
ZAFINDRABENJA, 2014	Forêts humides, forêts artificielles, forêts dégradées, cultures conventionnelles, savoka	Ferrallitique	0-30

## Synthèse des approches méthodologiques des études inventoriées

### Méthodes d'échantillonnage et de prélèvement

Les méthodes utilisées sont différentes en fonction des objectifs des études réalisées.

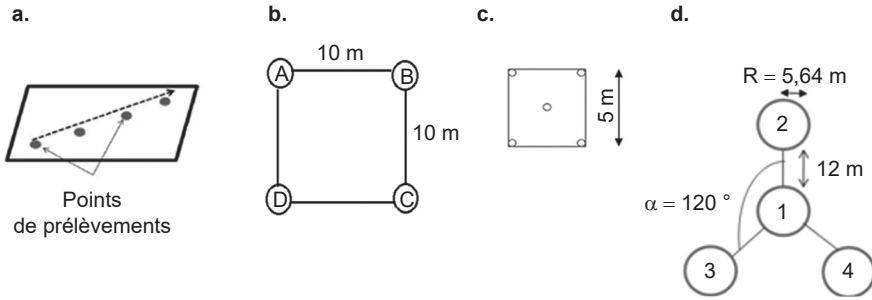
Les points d'échantillonnage ont été définis, soit à partir d'études cartographiques, de travaux SIG et de télédétection, soit directement sélectionnés en concertation avec les partenaires impliqués dans l'étude (par exemple, parcelles expérimentales ou paysannes).

Les prélèvements ont été ensuite réalisés suivant un plan d'échantillonnage défini selon un certain nombre de critères dont l'échelle de l'étude (locale, régionale), les moyens à disposition (ressources humaines, temps, budget) ainsi que le degré de précision souhaité (RAZAKAMANARIVO *et al.*, 2014).

Les méthodes d'échantillonnage les plus communes consistent à faire les prélèvements suivant la diagonale de la parcelle élémentaire, pour les écosystèmes naturels (fig. 3a ; HERITOKILALAINA, 2010) ou sur les lignes de culture, ou interlignes, s'il s'agit d'une parcelle cultivée (RAZAFIMBELO, 2005 ; FANJANIAINA, 2012). La méthode qui consiste à effectuer des prélèvements sur les sommets d'un carré (de 10 m de côté) dans la parcelle élémentaire, est aussi fréquemment utilisée (ANDRIANALY, 2013 ; RAZAFIMAHATRATRA, 2014, *In* ANDRIAMPIOLAZANA, 2014) (fig. 3b). Certaines études ont effectué des prélèvements au centre ou suivant les diagonales de la parcelle élémentaire (RAKOTONARIVO, 2009), sur les sommets et au centre de carrés de 5 m de côté (RAJOELINA, 2012) (fig. 3c).



ZAFINDRABENJA (2014) et RAMBOATIANA (2014) ont utilisé les méthodes d'échantillonnage (fig. 3d) utilisées par l'Africa Soil Information Service (VÄGEN *et al.*, 2012).



**Figure 3**

Schémas simplifiés de quelques dispositifs d'échantillonnage utilisés dans les études sur les stocks de COS à Madagascar.

Les échantillons de sol sont prélevés à l'aide de cylindres métalliques, de carottiers ou de tarières. Les profondeurs concernées varient suivant le contexte de chaque étude mais les prélèvements ont été effectués majoritairement dans la couche 0-30 cm tel que recommandé par le GIEC (2006). Certains prélèvements ont toutefois été réalisés sur 0-20 cm, 0-40 cm et 0-100 cm de profondeur. Les sols prélevés à une même profondeur et issus d'une même parcelle (répétitions intra-parcellaires) peuvent parfois avoir été mélangés pour constituer des échantillons composites par parcelle et par profondeur. La constitution d'échantillons composites permet de réduire le nombre d'échantillons à analyser tout en conservant une bonne représentativité de la parcelle, mais la variabilité des teneurs en carbone au sein de la parcelle ne sera alors pas connue.

### Estimation de la densité apparente

La densité apparente ( $Da$ ) en  $g.cm^{-3}$  est la masse spécifique d'un volume apparent de sol. Elle est calculée selon la formule :

$$Da = P/V \quad (1)$$

où  $V$  désigne le volume du sol prélevé par le cylindre de prélèvement ( $cm^3$ ) et  $P$  désigne la masse du sol (g) collecté dans ce volume, après séchage à  $105^\circ C$ .

Dans certains cas, la densité apparente n'est pas directement déterminée par l'étude. Elle est alors calculée via une fonction de pédotransfert (GRINAND *et al.*, 2009) comme suit :

$$Da = 1,5544 - 0,0004 \text{ Argile} - 0,01 C + 0,0067 SB \quad (2)$$

où *Argile* désigne la teneur en argiles granulométriques du sol ( $g.kg^{-1}$ ) et *SB* la somme des bases ( $cmol.kg^{-1}$  de sol),  $C$  étant la teneur en carbone ( $g.kg^{-1}$ ).

### Dosage de la teneur en carbone organique du sol

Les échantillons prélevés sont séchés à l'air, tamisés à 2 mm et ensuite broyés à 0,2 mm pour le dosage de leurs teneurs en COS. La teneur en COS est mesurée soit par combustion en voie humide suivant la méthode de WALKLEY et BLACK (1934) qui consiste en une oxydation de la matière organique par le bichromate de potassium, soit par une combustion en voie sèche par un microanalyseur élémentaire CHN (Carlo Erba NA 2000). Dans certaines études, les teneurs en COS ont été estimées au moins en partie par spectroscopie en moyen infrarouge (RABENARIVO *et al.*, 2013).

### Calcul des stocks de carbone organique du sol

Les stocks de COS sont obtenus comme suit :

$$\text{Stocks de COS (Mg C.ha}^{-1}\text{)} = [C \cdot (100 - \% \text{ Refus}) \cdot Da \cdot e] / 10 \quad (3)$$

où  $C$  est la teneur en carbone organique ( $\text{g.kg}^{-1}$ ) ; *Refus* désigne les éléments grossiers de diamètre supérieur à 2 mm ;  $Da$  est la densité apparente ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) et  $e$  est l'épaisseur de la couche de sol considérée (cm).

### Estimation des stocks de carbone de la biomasse

L'estimation des stocks de carbone de la biomasse permet de comparer la taille respective des compartiments « sol », « biomasse aérienne », « biomasse souterraine » dans le calcul global des stocks de carbone d'un écosystème donné, notamment pour les systèmes avec des ligneux.

Le stock de carbone de la biomasse totale (SCBT), exprimé en  $\text{Mg C.ha}^{-1}$ , est obtenu comme suit :

$$SCBT = SCBA + SCBR + SCBM \quad (4)$$

où  $SCBA$  est le stock de carbone dans la biomasse aérienne,  $SCBR$  le stock de carbone de la biomasse racinaire et  $SCBM$  le stock de carbone de la biomasse morte à la surface du sol (litière).

### Analyse des données

Les données de stocks de carbone organique dans les sols et accessoirement dans les biomasses, les incertitudes éventuelles qui les accompagnent ainsi que les variables (densité apparente, ou éléments permettant de calculer la densité apparente, et teneurs en COS) permettant d'estimer ces stocks, ont été organisés par profondeur, par type de sol, par mode d'usage et par système (c'est-à-dire par mode d'usage et par pratique culturale pour les agrosystèmes).

L'analyse et le traitement des données ont consisté en des calculs de stocks moyens de COS et de leur variabilité (écarts types) suivant les différents facteurs, ou co-variables, considérés : profondeur, type de sol, systèmes. La comparaison des stocks de carbone des sols et des biomasses selon les facteurs étudiés

– profondeur, type de sols, système – a été réalisée par analyse de variance, lorsque les variables disposaient d'un minimum de trois répétitions.

## Résultats et discussion

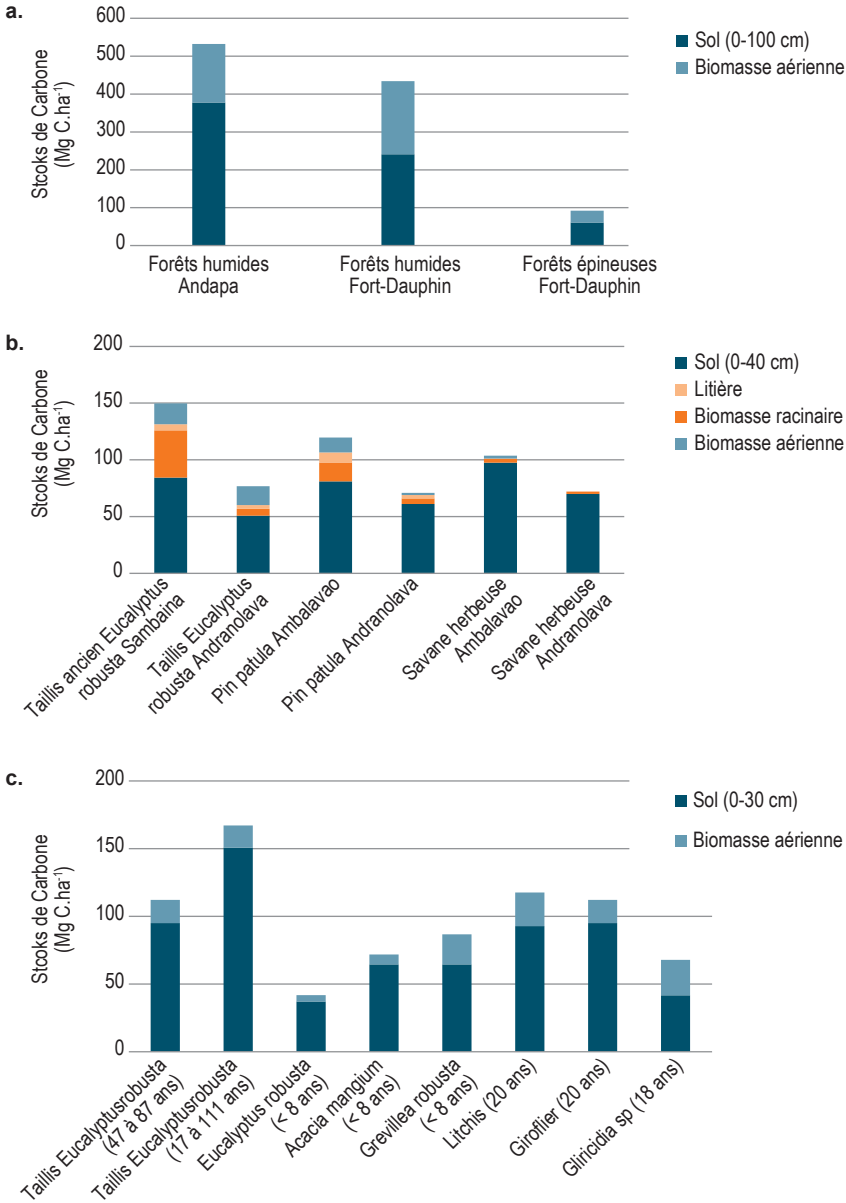
### Comparaison des stocks de carbone dans les sols et la biomasse végétale

Dans les forêts humides (Andapa, Fort-Dauphin), et dans les forêts épineuses de Fort-Dauphin, les stocks de carbone organique des sols ferrallitiques sur 0-100 cm sont supérieurs à ceux de la biomasse aérienne (fig. 4a). Les stocks de carbone de ces deux compartiments (sols et biomasse aérienne), dans les forêts humides d'Andapa et dans les forêts épineuses de Fort-Dauphin, sont très contrastés. Ceci s'explique en partie par la plus faible quantité de biomasse des forêts sèches épineuses et par l'état de dégradation plus poussée des forêts du corridor forestier de Betaolana-Andapa (HERITOKILALAINA, 2010).

Pour la profondeur de sol 0-40 cm, les stocks de carbone organique du sol sous des forêts artificielles et sous des savanes herbeuses sont plus importants que ceux de la biomasse totale (fig. 4b). L'écart est évidemment plus important dans les savanes herbacées, où la biomasse totale est en faible quantité, du fait de la nature des espèces végétales, des feux et du pâturage (RAZAFINDRAMANANA, 2006). Les forêts artificielles de *Pinus patula* ont également des stocks de carbone plus importants dans les sols que dans la biomasse végétale totale. Seuls les peuplements d'*Eucalyptus robusta* en régime de taillis ont des biomasses importantes approchant les stocks de carbone organique dans les sols sur 0-40 cm.

Comparés aux stocks de carbone organique dans la biomasse aérienne, ceux des sols (0-30 cm) restent importants (fig. 4c). Dans les cas des peuplements d'*Eucalyptus robusta*, de *Grevillea robusta* et d'*Acacia mangium* du district d'Ambalavao (région Haute-Matsiatra), du fait de leurs jeunes âges (moins de 8 ans pour notre étude) (MANOROTIANA, 2011), les stocks de carbone dans la biomasse aérienne sont relativement peu élevés. Les systèmes agroforestiers de 18 ans à base de *Gliricidia* sp., une légumineuse arbustive dont la croissance est rapide, se distinguent de ceux à base de litchi et de giroflier, âgés de 20 ans, en termes de stock de carbone dans les biomasses aériennes (RAMIANDRISOA, 2011).

Les stocks de carbone organique dans les sols des agrosystèmes des différentes régions de Madagascar sont donc nettement supérieurs à ceux de la biomasse végétale (fig. 4) et ce, quelle que soit la profondeur considérée. Ces résultats sont valables quel que soit le système étudié (forêt naturelle, forêt artificielle, savane, système agroforestier, etc.).



**Figure 4**

Stocks de carbone (Mg C.ha<sup>-1</sup>) dans différents systèmes à Madagascar.

a. Couche de sol 0-100 cm et biomasse aérienne des forêts naturelles des régions du Sud.

Source : HERITOKILALAINA, 2010.

b. Couche de sol 0-40 cm et biomasse totale des forêts plantées dans les régions centrales.

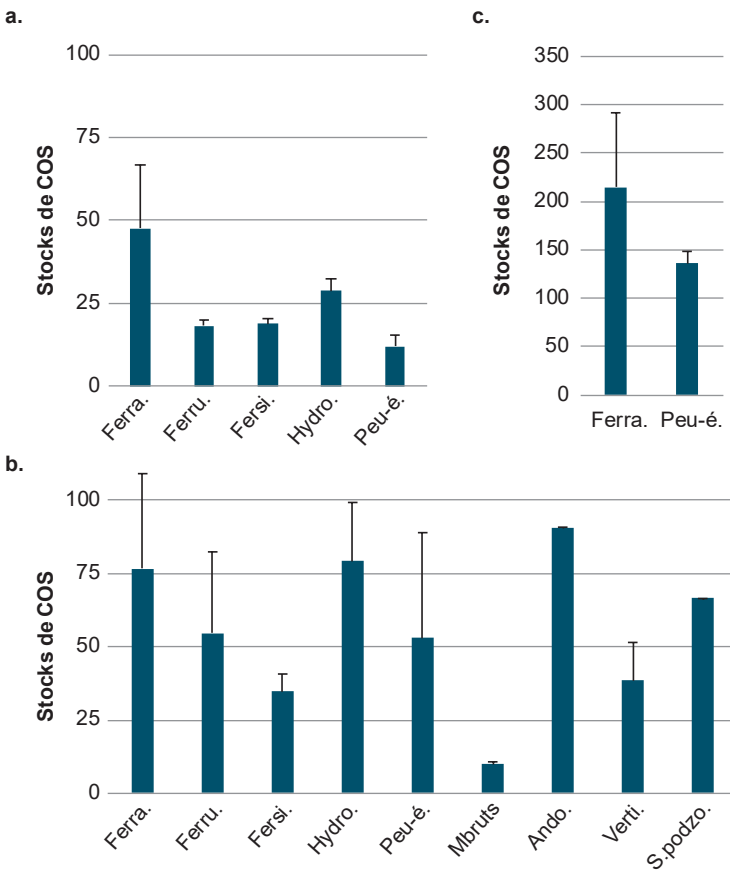
Sources : RAZAFINDRAMANANA, 2006 ; RAZAFINDRAMANANA et al., 2007 ; RAZAKAMANARIVO et al., 2010.

c. Couche de sol 0-30 cm et biomasse aérienne à l'Est de l'île.

Sources : MANOROTIANA, 2011 ; RAMIANDRISOA, 2011.

## Stocks de carbone par type de sol

Sur une profondeur de 0-20 cm, tous modes d'usages confondus, les stocks de carbone des sols ferrallitiques, fersiallitiques et hydromorphes sont significativement différents entre eux ( $p$ -value = 0,005 ;  $n$  = 39) (fig. 5a). Par contre, sur 0-30 cm, les stocks de carbone des sols ferrallitiques et des sols hydromorphes ne sont plus significativement différents entre eux ( $p$ -value  $\geq$  0,05 ;  $n$  = 83). Les valeurs de stocks de COS les plus élevées sont observées pour les sols volcaniques, les sols hydromorphes et les sols ferrallitiques (76-110 Mg C.ha<sup>-1</sup>). Les sols minéraux bruts, les sols fersiallitiques et les Vertisols, pourtant très argileux, sont parmi ceux ayant les valeurs de stocks de COS les plus faibles (< 40 Mg C ha<sup>-1</sup>) (fig. 5ab).



**Figure 5**

Stocks de COS (Mg C.ha<sup>-1</sup>) selon le type de sol et la profondeur considérée.  
(a) 0-20 cm ; (b) 0-30 cm ; (c) 0-100 cm.

Ferra. : ferrallitiques ; Ferru. : ferrugineux ; Fersi. : fersiallitiques ; Hydro. : hydromorphes ;  
Peu-é. : peu-évolués ; Mbruits : minéraux bruts ; Ando. : Andosols ; Volca. : volcaniques ;  
Verti. : Vertisols ; S.podz. : sols podzolisés.

Sources : GRINAND, 2010 ; GRINAND et al., 2009 ; RAZAKAMANARIVO et al., 2014.

De fortes variations sont, en outre, constatées pour les stocks de COS de certains types de sols, comme les sols ferrallitiques ( $47,6 \pm 19,2$  Mg C.ha<sup>-1</sup> sur 0-20 cm,  $76,6 \pm 32,6$  Mg C.ha<sup>-1</sup> sur 0-30 cm et  $214,9 \pm 74$  Mg C.ha<sup>-1</sup> sur 0-100 cm) (fig. 5). Ces résultats suggèrent que le facteur « type de sol » ne peut expliquer à lui seul les variations des stocks de COS. L'usage du sol est parmi les facteurs ayant une influence majeure sur les stocks de carbone. En effet, au-delà du type du sol, l'usage du sol entraîne une différence d'apports en carbone qui influe beaucoup sur les stocks de COS, comme mentionné précédemment.

Par ailleurs, ces études montrent la variabilité verticale des stocks de carbone des sols ferrallitiques et des sols peu-évolués (fig. 5abc). Selon ces données, les stocks de COS à 30 cm de profondeur ne représentent que 35 à 40 % du stock de carbone sur 1 m de profondeur. On observe également une variabilité importante des stocks de carbone sur les premiers centimètres (0-20 cm) du sol par rapport au stock contenu sur 1 m de profondeur, selon les types de sols. Il est ainsi nécessaire, si les conditions le permettent, d'effectuer des études à des profondeurs de sol plus importantes (1 m) que ce qui peut être recommandé dans les lignes directrices du GIEC (2006).

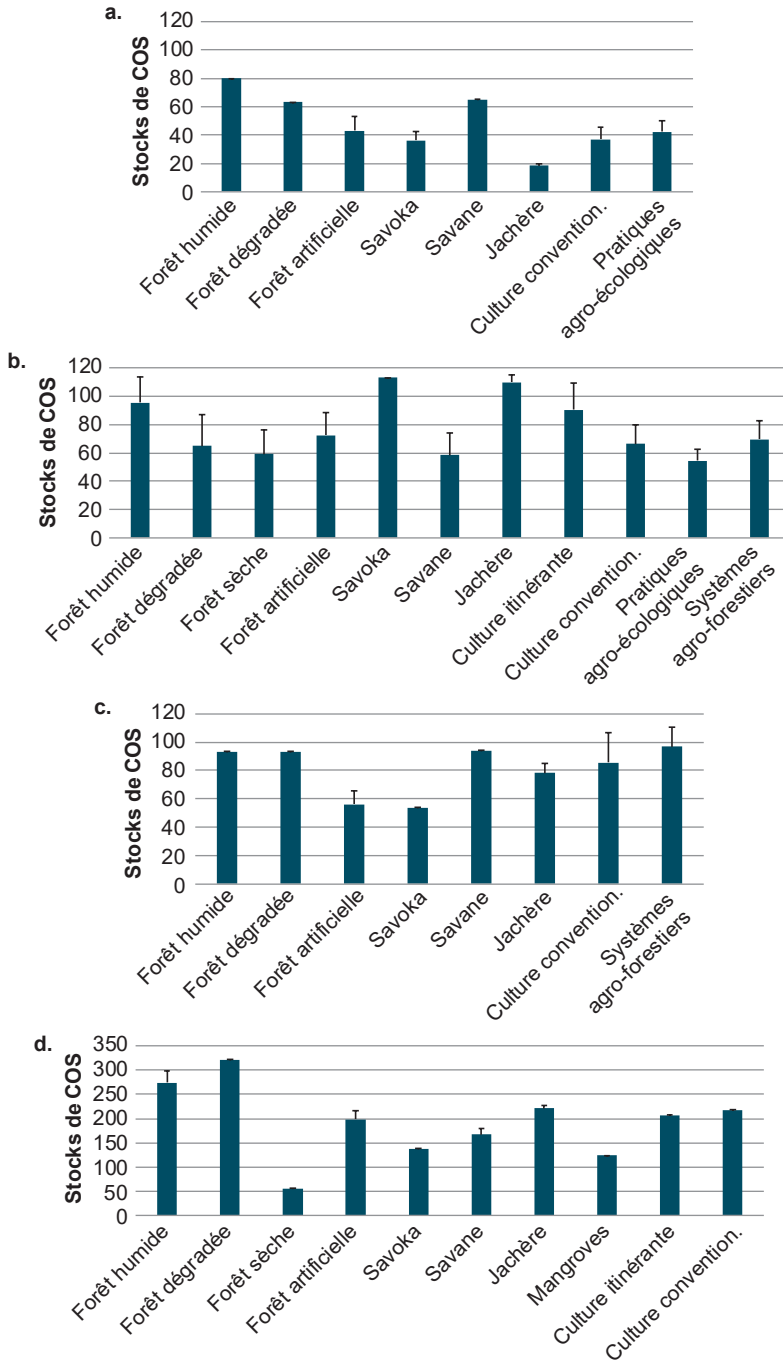
### Stocks de carbone du sol par mode d'usage et de gestion des terres

Tous types de sols confondus, et en considérant les premières couches de sol (0-20 ; 0-30 ou 0-40 cm de profondeur), les stocks de COS sont différents. Les éco- ou agrosystèmes ne sont pas significativement différents entre eux (respectivement, à 0-20 cm de profondeur : p-value = 0,15 ; n = 35) ; à 0-30 cm : p-value = 0,34 ; n = 80 ; et à 0-40 cm : p-value = 0,34 ; n = 23) (fig. 6 abc). Toutefois, des tendances sont observées. À 0-20 cm, les forêts humides, les forêts dégradées et les savanes présentent les stocks de COS les plus élevées ( $60-80$  Mg C.ha<sup>-1</sup>), tandis que les jachères ont les stocks les plus faibles ( $18$  Mg C.ha<sup>-1</sup>), les systèmes cultivés ayant des valeurs intermédiaires (fig. 6a).

Dans d'autres contextes pédologiques, ce sont les *savoka*, les jachères et les forêts humides qui, sur 0-30 cm, présentent les stocks de COS les plus élevés (de l'ordre de  $110$  Mg C.ha<sup>-1</sup> ; fig. 6b). Les *savoka* âgés peuvent être assimilés à des formations forestières secondaires. À ces profondeurs, les écosystèmes naturels présentent des stocks plus importants du fait des apports conséquents de carbone issus d'une importante biomasse végétale et de faibles perturbations des sols sur de longues périodes de temps.

Dans la couche de sol 0-100 cm, les forêts dégradées, les forêts humides, les jachères, les cultures conventionnelles, les cultures itinérantes et les forêts artificielles présentent des stocks de COS plus importants que les savanes, les *savoka*, les mangroves et les forêts sèches.

Toutes les données disponibles au niveau national constituent un jeu de données regroupant des points géographiquement éparpillés dans des zones pédoclimatiques contrastées et correspondant à des modes d'usage et de gestion variables, avec



**Figure 6**

Stocks de COS (Mg C.ha<sup>-1</sup>) selon l'usage des sols et la profondeur considérée.  
 a. 0-20 cm ; b. 0-30 cm ; c. 0-40 cm ; d. 0-100 cm.

Sources citées dans RAZAKAMANARIVO et al., 2014.

diverses entrées de carbone et vitesses de décomposition des matières organiques. Il faut alors tenir compte de ces erreurs d'approximation dans le raisonnement des facteurs de contrôle des stocks de COS aux différentes échelles.

Des différences d'ordre méthodologique existent également (modes et pressions d'échantillonnage, modes d'obtention de la densité apparente des sols, profondeur de sol considérée dans le calcul des stocks). Pour être comparables, les valeurs des stocks de COS issues des diverses études auraient dû être calculées pour une masse équivalente de sol et non pour une profondeur de sol fixe (ELLERT et BETTANY, 1995). Ceci n'a cependant pas été possible, certaines études ayant déjà calculé les stocks à masse équivalente de sol contrairement à d'autres. La méthodologie peut largement affecter la significativité des effets recherchés, impliquant ainsi pour les études futures la prise en compte d'une approche standardisée à des fins de comparaisons.

### **Stocks de carbone du sol selon le mode d'usage et le sol**

Les stocks de COS sous agrosystèmes sont plus élevés dans les sols ferrallitiques que dans les autres types de sols (tabl. 2). Les sols hydromorphes ont aussi des stocks élevés, particulièrement en surface (0-30 cm) et même sous des cultures conventionnelles. Les forêts artificielles et les forêts sèches des sols ferrugineux présentent un stock de carbone du sol assez important sur 0-30 cm. Toutefois, les stocks de carbone dans ces sols peuvent aussi être influencés par la présence de calcaire (carbone inorganique s'ajoutant au carbone organique).

## **Conclusion**

Cette étude a permis d'inventorier les études sur le carbone du sol et des biomasses effectuées sur une dizaine d'années (2004-2015) à Madagascar. Ces études sont réparties sur le territoire national mais de façon déséquilibrée si l'on considère la typologie des sols ou leur simple localisation géographique.

Les résultats ont révélé (1) que les sols contiennent souvent plus de carbone que les biomasses végétales et (2) que les stocks de carbone organique des sols sont déterminés par différents facteurs aux effets conjugués. Il s'agit, entre autres, des facteurs climatiques, du type et de la profondeur des sols, du mode occupation des sols et de leur gestion. Ces études ont également montré qu'il est nécessaire de compléter ces résultats et d'adopter une approche standardisée afin de pouvoir tirer des conclusions plus fiables et génériques.



Tableau 2  
Stocks de carbone du sol ( $Mg\ C\ ha^{-1}$ ) selon le système et le type de sol suivant différentes profondeurs.

Systèmes	Profondeurs (cm)	Types de sols					
		Ferrallitiques	Ferrugineux	Hydromorphes	Peu évolués	Fersiallitiques	Minéraux bruts
Forêts sèches	0-30	38,0	68,2 ± 36,6 (n = 5)	-	35,6	-	-
Forêts dégradées	0-30	106,1 ± 47,6 (n = 3)	33,7	87,7	48,1 ± 25,4 (n = 2)	38,2	9,1
Forêts artificielles	0-30	72,8 ± 35,1 (n = 14)	65,2 ± 17,0 (n = 2)	50,9	106,3	-	-
	0-100	250,0	-	-	147,2	-	-
Savane	0-30	77,2 ± 33,2 (n = 8)	49,4 ± 32,9 (n = 4)	80,0	40,0 ± 7,7 (n = 2)	31,4	10,6
Jachère	0-30	101,1 ± 10,1 (n = 2)	16,2	-	-	21	-
Pratiques agro-écologiques	0-20	51,2 ± 17,2 (n = 11)	20,0	31,1 ± 5,2 (n = 2)	14,6	18,0	-
Culture conventionnelle	0-20	42,6 ± 20,3 (n = 12)	-	26,2 ± 2,4 (n = 2)	9,3	17,7	-
	0-30	63,7 ± 20,6 (n = 9)	31,8	98,4	52,1	-	-

## Bibliographie

**ANDRIAMIHAJA M., 2011**

*Évaluation des stocks de C 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'étude d'ingénieur agronome, département des Eaux et Forêts, École supérieure des sciences agronomiques, université d'Antananarivo.

**ANDRIAMPIOLAZANA M., 2014**

*Étude de la variabilité spatio-temporelle du carbone du sol à l'échelle régionale. Cas d'Antsirabe.* Mémoire de DEA, université d'Antananarivo.

**ANDRIANALY N.-A. R., 2013**

*Évaluation des stocks de carbone et d'azote du sol sous des pratiques agro-écologiques et conventionnelles dans le Moyen-Ouest de Vakinankaratra.* Mémoire d'ingénieur, université d'Antananarivo.

**BIED-CHARRETON M., BONVALLOT J., DANDOY G., DELENNE M., HUGOT B., PELTRE P., POMART E., PORTAIS M., RAISON J. P., RANDRIANARISOA J., [avec la collaboration de] PELLETIER F., 1981**

Carte des conditions géographiques de la mise en valeur agricole de Madagascar. Thème 1 : potentiel des unités physiques à 1/1.000.000. 3 cartes. *Notice explicative, n° 87, 189 p.* Numéro de carte SPHAERA : 947. Bondy, France, ORSTOM.

**DUPUY B., MAÎTRE H.-F., AMSALLEM I., 1999**

*Techniques de gestion des écosystèmes forestiers tropicaux : état de l'art.* Rome, FAO, 133 p.

**ELLERT B. H., BETTANY J. R., 1995.**

Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75 : 529-538.

**FANJANIAINA M. L., 2012**

*Évaluation des stocks du carbone sous rizières : comparaison des divers modes de gestion en différents contextes pédologiques – Cas de la région d'Itasy-Madagascar.* Mémoire de DEA, université d'Antananarivo.

**FAO, 1981**

Manuel d'inventaire forestier. *Étude FAO Forêts.* 27. Rome, FAO, 200 p.

**FAO, 2003**

*Économie de l'agriculture de conservation.* Rome, FAO, 63 p. [www.fao.org/3/Y2781F/Y2781F00.htm](http://www.fao.org/3/Y2781F/Y2781F00.htm)

**FAO, 2018**

*Les 10 éléments de l'agro-écologie. Guider la transition vers des systèmes alimentaires et agricoles durables.* Rome, FAO. Téléchargeable : [www.fao.org/3/i9037fr/i9037fr.pdf](http://www.fao.org/3/i9037fr/i9037fr.pdf)

**GIEC, 2006**

*Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre.* Préparé par le Programme pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. et Tanabe K. (éd.). IGES, Japon.

**GIEC, 2007**

*Bilan 2007 des changements climatiques.* Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R. K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. Genève, Suisse, GIEC, 103 p.

**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 de magistère, AgroParisTech, Montpellier SupAgro, France.

**GRINAND C., RAJAONARIVO A., BERNOUX M., PAJOT V., BROSSARD M., RAZAFIMBELO T. M., ALBRECHT A., LE MARTRET H., 2009**

Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Étude et Gestion des Sols*, 16 (1) : 23-33.

**HERITOKILALAINA A., 2010**

*Évaluation des stocks de carbone de la biomasse végétale et du sol de la forêt du Nord-Est de Madagascar, suivant le niveau de dégradation – Cas du corridor forestier de Betaolana Andapa.* Mémoire d'ingénieur, université d'Antananarivo.

**HOOGMOED W. B., KLAIJ M. C., 1997**

*Le travail du sol pour une agriculture durable.* Rome, FAO, [www.fao.org/3/w7304f/w7304f00.htm](http://www.fao.org/3/w7304f/w7304f00.htm)

**MANOROTIANA M. I., 2011**

*Évaluation du potentiel de stockage de carbone d'un projet de reboisement à Ambalavao – Fianarantsoa.* Mémoire de master, UPMC, Paris.

**RABENARIVO M., CHAPUIS-LARDY L., BRUNET D., CHOTTE J.-L., RABEHARISOA L., BARTHÈS B. G., 2013**

Comparing near and mid-infrared reflectance spectroscopy for determining properties of Malagasy soils, using global or local calibration. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 21 (6) : 495-509.

**RAHARIMALALA N. D., 2013**

*Évaluation des stocks de carbone et de phosphore total dans différents types de sols à Madagascar.* Mémoire de DEA, université d'Antananarivo.

**RAJOELINA J. B., 2012**

*Étude du stock de carbone organique du sol sous mangrove de Maintirano.* Mémoire de DEA, université d'Antananarivo, 58 p.

**RAKOTONARIVO O. S., 2009**

*Étude de l'effet du modelé et de la position topographique sur les stocks de carbone de la biomasse végétale et du sol des taillis d'Eucalyptus robusta des Hautes Terres centrales malgaches. Cas de Sambaina Manjakandriana.* Mémoire d'ingénieur, université d'Antananarivo.

**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 Tolagnaro Madagascar.* Mémoire de DEA, université d'Antananarivo.

**RAMBOATIANA N., 2014**

*Modélisation des émissions de CO<sub>2</sub> des sols après déforestation : estimations à l'échelle d'un paysage. Cas du paysage forestier de Beampingaratsy, Région Anosy.* Mémoire de DEA, université d'Antananarivo.

**RAMIANDRISOA A. S., 2011**

*Quantification du stock de carbone dans les systèmes agroforestiers en vue d'une simulation de projet de financement de crédits carbone : cas de la région Analanjirofo et Atsinanana.* Mémoire d'ingénieur, université d'Antananarivo.

**RAMIFEHIARIVO N., 2014**

*Évaluation des stocks de carbone du sol après déforestation – Cas de Moramanga.* Mémoire d'ingénieur, université d'Antananarivo.

**RANDEVOSON F., 2012**

*Exploration de la voie oxalate-carbonate de calcium pour la séquestration de carbone dans le sol à Madagascar.* Mémoire de DEA, université d'Antananarivo.

**RANDRIANARISOA J., 2014**

*Étude de la dynamique du carbone du sol post-déforestation dans la région du Centre-Est de Madagascar.* Mémoire de DEA, université d'Antananarivo.

**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, École nationale supérieure agronomique de Montpellier, France.

**RAZAFIMBELO T. M., ALBRECHT A., FELLER C., RAVELOJAONA H., MOUSSA N., RAZANAMPARANY C., RAKOTOARINIVO C., RAZAFINTSALAMA H., MICHELLON R., NAUDIN K., RABEHARISOA L., 2010**

Stockage de carbone dans les sols sous systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal (SCV) dans différents contextes pédoclimatiques à Madagascar. *Étude et Gestion des Sols*, 17 (2) : 143-158.

**RAZAFIMHATRATRA M., 2006**

*Évaluation des stocks de carbone du sol sous différents modes d'usages des terres dans le corridor forestier de Vohimana-District de Moramanga (Madagascar).* Mémoire de DEA, université d'Antananarivo.

**RAZAFIMAHATRATRA M., 2011**

*Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen infra-rouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat.* Thèse de doctorat, université d'Antananarivo.

**RAZAFINDRAMANANA N., SERPANTIÉ G., CARRIÈRE S., RAZAFINDRAKOTO M. A., BLANCHART E., ALBRECHT A., 2007**

« Afforestation en lisière du corridor de Fianarantsoa (Madagascar) : un puits de carbone potentiel. » In Serpantié G., Rasolofoharino, Carrière S. (éd.) : *Transitions agraires, dynamiques écologiques et conservation*, Marseille, IRD, CITES : 205-212.

**RAZAFINDRAMANANA N. C., 2006**

*Afforestation et stockage de carbone en lisière ouest du corridor forestier de Fianarantsoa (Madagascar).* Mémoire de DEA, université d'Antananarivo.

**RAZAKAMANARIVO R. H., 2009**

*Potentialités de stockage de carbone dans le système plante-sol des plantations d'eucalyptus des Hautes Terres malgaches.* Thèse de Doctorat, université d'Antananarivo & Montpellier SupAgro.

**RAZAKAMANARIVO H.,**

**RAZAFINDRAKOTO M. A., ALBRECHT, 2010**

Fonction puits de carbone des taillis d'eucalyptus à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques*, 305 : 5-19.  
DOI : 10.19182/bft2010.305.a20438.

**RAZAKAMANARIVO R. H., ANDRIANIRINA C.,**

**RANDRIAMBOAVONJY J. C., 2014**

Aperçu sur l'importance des stocks de carbone des sols forestiers à Madagascar. *Madamines*, 6.  
[http://madarevues.recherches.gov.mg/IMG/pdf/Madamines6\\_1\\_.pdf](http://madarevues.recherches.gov.mg/IMG/pdf/Madamines6_1_.pdf).

**RAZAKAVOLOLONA A., 2007**

*Évaluation du stock de carbone dans les différents compartiments de la biomasse végétale et dans le sol sur une chronoséquence de plantation d'eucalyptus sur les Hautes Terres de Madagascar. Cas de Sambaina-Manjakandriana.* Mémoire de DEA, université d'Antananarivo.

**RAZANAKOTO O. R., 2008**

*Potentialités de la pratique agroforestière du type verger potager d'Ambohijafy pour accéder au marché international du Carbone.* Mémoire de DEA, université d'Antananarivo.

**SANEHO H. G., 2014**

*Évaluation du stock de carbone organique du sol sous l'effet de changement d'usage des terres dans l'écorégion Est de Madagascar.* Mémoire de master 2, université de Toamasina.

**SEBILLOTTE M., 1991**

« La jachère. Éléments pour une théorie ». In ORSTOM (éd.) : *À travers champs, agronomes et géographes*, Paris, ORSTOM : 161-229.

**VÅGEN T.-G., DAVEY F. A.,**

**SHEPHERD K. D., 2012**

« Land health surveillance: mapping soil carbon in kenyan rangelands ». In Nair P. K. R., Garrity D. (éd.) : *Agroforestry-The future of global land use*. Dordrecht, Springer Netherlands : 455-462.

**WALKLEY A. J., BLACK I. A., 1934**

Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37 : 29-38.

**ZAFINDRABENJA A. A., 2014**

*Analyse comparative des méthodes de prélèvements pédologiques pour la comptabilisation du stock de carbone organique du sol dans le cadre de la R.E.D.D à Madagascar : cas de la région Didy.* Mémoire de DEA, université d'Antananarivo.

