

## APERÇU SUR L'IMPORTANCE DES STOCKS DE CARBONE DES SOLS FORESTIERS A MADAGASCAR

Ramarson-Herintsitohaina RAZAKAMANARIVO <sup>(i)</sup>, Carole ANDRIANIRINA <sup>(i)</sup> Jean Chrysostome RANDRIAMBOAVONJY <sup>(ii)</sup>

<sup>(i)</sup> *Laboratoire des Radio-isotopes-Service RadioAgriculture, Université d'Antananarivo, BP 3383, Antananarivo101, Madagascar*

<sup>(ii)</sup> *Département Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, BP. 175 Antananarivo 101*

### Résumé

Les écosystèmes forestiers détiennent un rôle important pour faire face au changement climatique grâce à leur grande capacité à stocker du carbone. En général, cette capacité est largement étudiée pour le compartiment de la végétation mais l'est rarement pour le compartiment sol. Le présent papier se focalise sur ce compartiment sol et il donne ainsi un aperçu des connaissances sur le stock de carbone organique des sols (COS) forestiers à Madagascar. Cet aperçu montre la diversité des écosystèmes forestiers (naturels et artificiels) qui ont été considérés même si plusieurs écosystèmes n'ont pas encore fait l'objet d'une investigation sérieuse (notamment les forêts plantées réparties dans toute l'île). Les principaux types de sol malgache y sont aussi représentés (ferralitiques et ferrugineux). La méthodologie reste assez variée selon le contexte de chaque étude mais les principaux résultats sont tels que les stocks de COS inventoriés jusqu'ici vont de 22,7 à 175,5 Mg.ha<sup>-1</sup>, profondeurs-types de sol et écosystèmes confondus. Tout ceci montre la grande variabilité du COS mais aussi le fait que l'étude du COS s'avère incontournable pour une meilleure gestion des ressources forestières mis à part leur importance dans l'atténuation du changement climatique.

**Mots-clés :** sols, carbone organique, forêts de Madagascar, spectroscopie en moyen infrarouge, variabilité verticale

### Summary

The forest ecosystems hold an important role to face the climatic change thanks to their great capacity to be stored carbon. As general, this capacity is largely studied for the compartment of the vegetation but is seldom for the compartment ground. This paper is focused on this compartment ground and it thus gives an outline of knowledge on the organic carbon stock of grounds (COS) forest to Madagascar. This outline shows the diversity of the forest ecosystems (natural and artificial) which were considered even if several ecosystems were not the subject of a serious investigation yet (in particular planted forests distributed in all the island). The principal types of Malagasy ground are also represented there (ferralitic and ferruginous). Methodology remains varied enough according to the context of each study but the principal results are such as stocks of COS inventoried up to now go from 22,7 to 175,5 Mg.ha<sup>-1</sup>, depth-types of ground and ecosystems confused. All this shows the great variability of the COS but also the fact that the study of the COS proves to be impossible to circumvent for a better stock management forest put besides their importance in the attenuation of the climatic change.

**Key words:** grounds, organic carbon, forests of Madagascar, spectroscopy in average infra-red, vertical variability.

## **1. Introduction**

La quantité de carbone (C) de l'atmosphère est contrôlée par le cycle global de C du système forestier, dont les écosystèmes forestiers. Ces derniers jouent un grand rôle face au changement climatique puisqu'ils peuvent présenter, selon leur mode de gestion, un impact positif ou négatif du changement climatique induit par l'homme ( Canadell et al., 2007; Heimann and Treichstein, 2008). De ceci, il s'avère primordial de connaître la taille de réservoir du C de ces écosystèmes forestiers. Mais si le compartiment de la végétation est largement étudié en raison de l'existence de méthodologie standard (recours aux équations allométriques) pour la quantification de leur C, ce n'est pas le cas pour le compartiment sol. En effet, il n'existe pas de méthode standard pour la quantification du Carbone Organique des Sols (COS) car les sols présentent une grande variabilité intrinsèque (dans l'espace et aussi verticalement selon la profondeur).

Le présent papier essaye de restituer les rares études sur la quantification du COS dans les écosystèmes forestiers à Madagascar. Ces études sont placées dans différents contextes, entre autres : des projets de recherche scientifiques ( ex : Razafimahatratra, H.2006 ; Razafindrakoto 2006), du processus REDD à objectif méthodologique (ex : Heritokilalaina, 2010 ; Rakotonarivo O. S. , 2010), des travaux de capitalisation des données anciennes sur des études pédologiques de la grande île (Grinand et al., 2009). Sont donc présentées dans les paragraphes suivants : une description simplifiée des écosystèmes forestiers malgaches étudiés, une synthèse des démarches méthodologiques déployées lors de ces études, une présentation des principaux résultats de ces inventaires du COS et enfin quelques idées sur leurs perspectives.

## **2. Une diversité d'écosystèmes forestiers pour la quantification du carbone du sol**

Divers écosystèmes forestiers ont fait l'objet d'étude du COS (tableau 1) malgré le fait qu'ils ne représentent pas tous les types d'écosystèmes forestiers malgaches. En effet, ils ont été choisis au dépend des intérêts des projets dans lesquelles les études ont été définies, elles-mêmes n'ayant été conduites que depuis l'année 2006 (à part les travaux de Grinand et al.2009 qui sont des valorisations d'études pédologiques anciennes des années 1960 et 1970). Brièvement, les prélèvements de sol ont été effectués dans des forêts naturelles et artificielles, du Nord (Andapa) au Sud (Fort-Dauphin) de Madagascar dans des zones où les creusements ont été autorisés.

Ces travaux sont publiés principalement sous forme de mémoires de fin d'étude (niveaux ingénieur, master et doctorat) d'étudiants de deux principaux établissements universitaires, entre autres : ESSA-Forêts Madagascar, Agro-Paritech France.

**Tableau 1 : Caractéristiques des principales études sur le stock de carbone organique du sol (COS) des écosystèmes forestiers à Madagascar**

Type d'habitat	Type d'écosystème	Région considérée	Références
Forêt naturelle	Forêt humide	Madagascar	Grinand et al, 2009
		Corridor de Vohimana	Razafimahatratra, H.2006
		Zone Fort-Dauphin & Andohahela	Rakotonarivo, 2010 Grinand, 2010
		Zone Andapa	Heritokilalaina, 2010
	Forêt sèche	Zone Andohahela Fort Dauphin	Rakotonarivo, O. S. 2010 Grinand, 2010
	Forêt dégradée	Madagascar	Grinand et al, 2009
	Forêt peu dégradé	Ambohitantely	Andriamihaja, M.2011 Andriamihaja, M. 2011
Forêt plantée			
	<i>Pinus patula</i> plantées après 1962	Ambalavao & Andranolava, Fianarantsoa	Razafindrakoto, 2006
	Taillis d' <i>Eucalyptus robusta</i> (au temps des colons)*	Ambalavao, Fianarantsoa	Razafindrakoto, 2006
	Taillis d' <i>Eucalyptus robusta</i> (dont les souches sont âgées à plus d'un siècle à 17 ans)	Sambaina Manjakandriana	Razakamanarivo, R. H.2009
	Forêt de tapia	Madagascar, Ambatofinandrahana	Grinand et al., 2009
Mangrove	Peuplements de <i>Rhizophora</i> , d' <i>Avicennia</i> et Peuplement mixte	Maintirano	Rajoelina, J.B. 2012

\*Pas d'âge exact

## 2. Les démarches méthodologiques pour l'étude du C des sols

Toujours mise à part le travail de Grinand et al. (2009), chaque étude a opté la démarche suivante :

- i) prélèvement d'échantillons de sol sur le terrain ; pouvant être précédé par des travaux de SIG et télédétection, cette étape est réalisée selon un plan d'échantillonnage qui est défini selon un certain nombre de critères dont : l'envergure de l'étude (locale, régionale), les moyens à disposition (surtout financier et temporel) ainsi que les précisions que l'étude se veut d'atteindre (en relation avec une idée de la spatialisation de la distribution du COS). Au niveau de chaque unité d'échantillonnage, les échantillons de sol sont prélevés à l'aide de cylindre métallique, de carottier ou de tarière. Les profondeurs de prélèvement sont très variables toujours suivant le contexte de chaque étude : 0-20 cm, 0-30 cm, 0-100 cm. Les sols prélevés sont ensuite mis dans des sachets et ramenés au laboratoire pour les analyses chimiques ;
- ii) travaux en laboratoire : ils sont la plupart du temps effectués au Laboratoire des Radiosotopes – LRI/Université d'Antananarivo selon les protocoles d'analyses chimiques conventionnelles. La densité apparente  $D_a$  du sol est calculée suite au passage des échantillons de sol dans l'étuve à 105°C et la teneur en C du sol est d'abord déterminée par la méthode de Walkley & Black avant de recourir à la technique en spectroscopie en moyen infrarouge (SMIR). Effectivement, la première option fournit les valeurs de référence et coûteuse-longue-destructive comme elle est, on recourt au SMIR ; une méthode rapide-non destructive et non coûteuse permettant de prédire la teneur en C de milliers d'échantillons en peu de temps. Il s'agit principalement d'établir de bons modèles de prédiction à partir des spectres des échantillons de sol obtenus par le spectromètre et de savoir traiter ces spectres en recourant aux statistiques avancées ;

- iii) Traitement des données et calcul des stocks de COS en Mg.ha-1 : il s'agit principalement du calcul des stocks de COS en Mg.ha-1. Il existe deux méthodes de calcul du stock de COS : l'une via la Da (équation 1), l'autre via la fonction pédotransfert (équation 2) pour le calcul de Da quand celle-ci n'est pas disponible ou n'a pas été directement déterminée par l'étude.

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

C étant la teneur en organique carbone (g.kg-1) ; Da la densité apparente (g.cm-3) et e, l'épaisseur de l'horizon de sol (cm).

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

C toujours le carbone organique (g.kg-1), Argile la teneur en argile du sol (g.kg-1) et SB la Somme des bases (cmol.kg-1 de sol)

Par ailleurs, la démarche adoptée par Grinand et al. (2009) suit une approche cartographique (1/1 000 000) avec utilisation des données anciennes de la base de données pédologiques BDD ValSol « Sols et Environnement de Madagascar ». Il s'agit ensuite d'une extraction des valeurs de COS via la carte des associations sol-végétation, elle-même obtenue par combinaison géographique de la carte des sols et de végétation.

En outre, le mode de calcul du stock de COS pour une profondeur donnée (0-20 cm, 0-30 cm, 0-40 cm ou 0-100 cm) peut être fait soit directement en profondeur équivalente soit en apportant des modifications pour corriger la masse de sol à considérer ; ramenée à masse équivalente de sol (utilisée lorsqu'on veut comparer les stocks de COS de différents modes d'usage de sols : forêt vs culture vs savane vs etc.)

### 3. D'importantes quantités de carbone dans le sol à l'encontre du changement climatique

Sont synthétisés dans le tableau 2 les principaux résultats des études présentées dans le paragraphe auparavant. De ce tableau, on peut faire les commentaires ci-dessous :

- Sur 0 à 100 cm, les résultats sur COS vont de 138,4 ± 54,7 (Andohahela, sol ferrallitique) à 377,5 ± 68,1 MgC/ha (Andapa, sol ferrallitique et hydromorphe) pour la forêt humide et pour la forêt sèche, 56 ± 29 (Fort Dauphin, sol ferrugineux) à 63,9 ± 19,3 MgC/ha (Andohahela, sol ferrallitique et ferrugineux).
- les résultats disponibles sur 0 à 30 cm permettent de déterminer des stocks allant de 49,9 ± 19,2 (Ambohitantely, forêt peu dégradée, sol ferrallitique) à 93 ± 39,1 MgC/ha (Andohahela, sol ferrallitique peu profond) en forêt humide et 32 ± 9 (Andohahela, sol ferrugineux) à 50 ± 11,5 MgC/ha (Andohahela, sol ferrallitique peu profond) en forêt sèche. En forêts de mangroves, les stocks sont de 83,3 ± 17,7 à 175,5 ± 32,5 variables en fonction du type de peuplement : à Rhizophora, Avicennia ou mixte. Sur 0-20 cm, la quantité moyenne de COS est de 27,3 Mg/ha et 25,1 Mg/ha sur la couche inférieure de 20-40 cm.
- Pour les plantations forestières, les valeurs sont assez variables vu que les études sur ces types d'écosystème restent peu nombreuses. Mais les résultats issus de Razafindrakoto (2006) montrent qu'on aurait plus de COS sous pins que sous eucalyptus (pour une même profondeur). Cependant, les résultats de Sambaina montrent que les COS sous eucalyptus peuvent être élevés, de l'ordre de 84,8 Mg.ha-1.

**Tableau 2 : Valeurs de stock de carbone organique du sol forestier COS à Madagascar**

Région et végétation	Type de sol	COS (Mg.ha-1)	Profondeur (cm)	Références
Corridor de Vohimana	Sol ferralitique	56,3 ± 4,1	0 - 20	Razafimahatratra, H.,2006
		70 ± 3,7	0 - 30	
		80,1 ± 4,8	0 - 40	
Forêt malgache en général			0 - 30	Grinand et al., 2009
Forêt humide	Sol ferralitique	85,5		
Forêt sèche	Sols ferrugineux	34,8		
	Sols peu évolué d'apport	35,6		
Forêt dégradée	Sols ferralitiques	72,4		
	Sols ferrugineux	33,7		
	Sols fersiallitiques	38,2		
	Sols peu évolué d'apport	66,1		
	Sols peu évolué d'érosion	30,1		
	Sols hydromorphes	87,7		
	Sols minéraux bruts	9,1		
Ambalavao, taillis d'eucalyptus	Sols ferralitiques	27,7± 5,1	0 - 20	Razafindrakoto, 2006
		44,3± 8,9	0 - 40	
Ambalavao&Andranolava peuplement de <i>Pinus patula</i> *	Sols ferralitiques	46,5	0 - 20	
		66,3	0 - 40	
Ambatofinandrahana, Foret de Tapia	Sols ferralitiques	50	0-30	Grinand et al., 2009
Sambaina, taillis d' <i>Eucalyptus robusta</i> **	Sols ferralitiques	84,8 ± 23	0 - 30	Razakamanarivo, R.H.,2009
Corridor de Betaolana Andapa	Sol ferralitique et hydromorphe	80 ± 12,7	0 - 20	Heritokilalaina, 2010
		177,2 ± 24	0 - 40	
		377,5 ± 68,1	0 - 100	
Andohahela, forêt humide	Sol ferralitique	82 ± 33,6	0 - 30	Grinand, 2010
	Sol ferralitique peu profond	93 ± 39,1		
	Sol ferralitique + ferralitique peu profond	138,4 ± 54,7	0 - 100	
Andohahela, forêt sèche	Sol ferralitique	38 ± 15,6	0 - 30	
	Sol ferralitique peu profond	50 ± 11,5		
	Sol ferrugineux	32 ± 9		
	Sol ferralitique et ferrugineux	63,9 ± 19,3	0 - 100	
Fort Dauphin, forêt humide	Sol ferralitique	59 ± 23	0 - 20	Rakotonarivo, O. S.,2010
		110 ± 40	0 - 40	
		215 ± 80	0 - 100	
Fort Dauphin, forêt sèche	Sol ferrugineux	13 ± 7	0 - 20	
		27 ± 15	0 - 40	
		56 ± 29	0 - 100	
Ambohitantely, forêt peu dégradée	Sol ferralitique	49,9 ± 19,2	0 - 30	Andriamihaja,M., 2011
		118,1 ± 37,3	0 - 50	
Ambohitantely, forêt dégradée		58,6 ± 21,7	0 - 30	
		117,2 ± 41,7	0 - 50	
Maintirano, forêt de mangroves	Sol hydromorphe	27,3	0 - 20	Rajoelina J.B., 2012
		25,1	20 - 40	
		175,5 ± 32,5 (Rhizophora)	0-100	
		125,4 ± 70,7 (Avicennia)		
		83,3 ± 17,7 (Peuplement mixte)		

\* (moyenne des deux sites), \*\* (moyenne d'une vingtaine de parcelles dont les souches sont âgées d'un siècle à 17 ans)

#### **4. Le carbone du sol : objet d'investigations de plus en plus important**

En parallèle avec l'avancée des recherches au niveau international sur le COS en relation aux Conventions Internationales (sur le changement climatique, la désertification et tout ce qui est sur la sécurisation alimentaire), les recherches à Madagascar prennent aussi leur ampleur. Effectivement, d'un côté, on est passé de l'étude ponctuelle au niveau de la parcelle des stocks de COS à la spatialisation et conduite des études au niveau du terroir. Dans ce sens, dans le contexte de la REDD+, on considère à la fois le C de la biomasse et du sol (Andrianirina, C. 2012). D'un autre côté, on essaye de voir au-delà du COS ; on parle par exemple de la voie d'Oxalate de Calcium (Andriampiolazana, 2012 ; Randevoson, 2012). Il s'agit d'un processus en sus de la séquestration du C via la voie cycle de C classique, encore au stade d'exploration à Madagascar mais qui est assez prometteuse. Plus loin, l'étude du COS peut être aussi intégrée aux projets sur la mise en place du Paiement des Services Ecosystémiques-PSE ([www.p4GES.org](http://www.p4GES.org)).

#### **5. Conclusion**

Ont été rapportés dans ce papier les existants en termes d'étude sur le COS des forêts malgaches. En dépit d'un nombre encore assez faible de ces études, les résultats montrent l'importance de ce compartiment sol en termes de quantité de C ramenée à l'hectare, notamment si on le compare au C de la biomasse (en effet le COS peut être deux à trois fois plus élevée que le C du compartiment aérien d'une forêt ; Rakotonarivo O.S. , 2010). Les chercheurs malgaches poursuivent leurs investigations afin de remédier aux problèmes méthodologiques et de la grande variabilité de l'objet sol. Tout ceci pour dire qu'il reste beaucoup à faire dans le domaine du COS d'autant plus que c'est un compartiment incontournable compte tenu des problématiques internationales sur le climat-le développement et la sécurité alimentaire.

## BIBLIOGRAPHIE

- ANDRIAMIHAJA M. (2011)- Evaluation 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 (ESSA).
- ANDRIAMPIOLAZANA M.(2012)- Exploration de la voie oxalate-carbonate en vue du stockage de carbone dans les régions méridionale et occidentale de Madagascar. Mémoire d'ingénieur (ESSA-Forêts).
- ANDRIANIRINA C. (2012)- Evaluation de la contribution du compartiment sol dans le cadre de la REDD à Madagascar . Mémoire de DEA (ESSA-Forêts).
- ARROUAYS et al (2003)-Estimation des stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps. Etude et gestion des sols.
- Grinand, C., Rajaonarivo, A., Bernoux, M., Pajot, V., Brossard, M., Razafimbelo, T.M., Albrecht, A., Le Marthret, H.,(2009). Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. Etude et Gestion des Sols 16, 23-33
- HERITOKILALAINA (2010)- Evaluation 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. Département des Eaux et Forêts (ESSA).
- RAJOELINA J.B. (2012)- Etude de stock de carbone organique du sol sous mangrove de Maintirano . Mémoire de DEA en Foresterie Développement Environnement-Département des Eaux et Forêts.
- RAKOTONARIVO O.S. (2009)- Etude de l'effet du modelé et de la position topographique sur les stocks de carbone de la biomasse végétale et du sol des taillis d'*Eucalyptus robusta* des Hautes Terres Centrales Malgaches. Cas de Sambaina Manjakandriana.
- 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 /Département des Eaux et Forêts(ESSA).
- RANDEVOSON Finaritra F.(2012)- Exploration de la voie oxalate-carbonate de calcium pour la sequestration de carbone dans le sol à Madagascar –Mémoire de DEA (ESSA-Forêts).
- RARIVOARIVELOMANANA J.(2001)- Le stockage de carbone et ses avantages à travers le protocole de Kyoto. Cas des forêts de l'Est de Madagascar.
- RAZAFIMAHATRATRA H. (2006)- Evaluation des stocks de carbone du sol sous différents modes d'usage des terres dans le corridor forestier de Vohimana, District de Moramanga. Mémoire de DEA au Département des Eaux et Forêts (ESSA)
- RAZAFIMAHATRATRA H.(2011)- Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen-infra-rouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat. Thèse de doctorat en sciences agronomiques, ESSA -Université d'Antananarivo.
- RAZAFINDRAMANANA N.C.(2006)- Afforestation et stockage du carbone en lisière ouest du corridor forestier de Fianarantsoa . Diplôme d'études approfondies. Université d'Antananarivo.
- RAZAKAMANARIVO R.H.(2009)- Potentialités de stockage du C dans le système plante-sol des plantations d'Eucalyptus des hautes terres malgaches . Thèse de doctorat en sciences du sol en cotutelle , Département des Eaux et Forêts (ESSA) –Université de Montpellier 2 Sup-Agro Montpellier.
- RAZAKAMANARIVO R.H.(2010)- Etude des potentialités de stockage de carbone dans la biomasse et dans le sol des plantations d'Eucalyptus des Hautes Centrales malgaches (cas de Sambaina-Manjakandriana) : spatialisation et étude du devenir du carbone stockés.
- RAZAKAVOLOLONA Ando, (2007)- Evaluation du stock de carbone dans les différents compartiments de la biomasse végétale et dans le sol sur une chronoséquence de plantations d'Eucalyptus sur les Hautes Terres de Madagascar. Cas de Sambaina-Manjakandriana.