

Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar

C. Grinand⁽¹⁾, A. Rajaonarivo⁽²⁾, M. Bernoux⁽³⁾, V. Pajot⁽²⁾⁽³⁾, M. Brossard⁽³⁾, T. Razafimbelo⁽⁴⁾, A. Albrecht⁽¹⁾, et H. Le Martret⁽⁵⁾

- 1 IRD, UR210 Eco&Sols, Laboratoire des Radio-Isotopes, Service de la Radio Agronomie (LRI/SRA), Université d'Antananarivo, Route d'Andraisoro BP 3383, 101 Antananarivo, Madagascar
- 2 FOFIFA, Laboratoire de Pédologie, Parc Botanique et Zoologique de Tzimbazaza, 101 Antananarivo, Madagascar
- 3 IRD, UR210 Eco&Sols, Campus SupAgro, 2 place Viala, bâtiment 12, 34060 Montpellier Cedex 1, France
- 4 LRI, Laboratoire des Radio-Isotopes, Service de Radio-Agronomie (LRI/SRA), Université d'Antananarivo, Route d'Andraisoro BP 3383, 101 Antananarivo, Madagascar
- 5 IRD, UR144 Lisah, Campus SupAgro, 2 place Viala, bâtiment 12, 34060 Montpellier Cedex 1, France

RÉSUMÉ

Les estimations mondiales des stocks de carbone (C) dans les différents écosystèmes montrent l'importance du sol en tant que compartiment de stockage. Cependant, des estimations plus précises, notamment aux échelles régionales, sont rarement disponibles. De plus, face à des changements climatiques ou d'usage de sol, il est nécessaire de faire le bilan actuel de cette ressource afin de prévoir son évolution future. L'objectif de ce travail est de fournir des estimations fiables des stocks de C organique dans les sols de Madagascar pour la couche 0-30 cm et selon les principaux modes d'occupation du sol présents dans le pays. Une base de données géoréférencées a été constituée à partir des études existantes collectées de 1946 à 1979. Elle contient les descriptions pédologiques des profils, des horizons ainsi que les données analytiques réalisées en laboratoire. Pour obtenir les valeurs de stocks, la densité apparente a été estimée à partir d'une fonction de pédotransfert incluant la teneur en argile, la teneur en carbone et la somme des bases échangeables. Une carte des associations sol-végétation a été produite par croisement d'une carte des sols au 1:1 000 000 et d'une carte de végétation simplifiée. Les stocks de C ont été synthétisés par type de sol et association sol-végétation afin de pouvoir les spatialiser. Les valeurs calculées des stocks de C pour 279 profils montrent une médiane de 43,7 Mg C.ha⁻¹, et une gamme allant de 1,2 à 198,8 Mg C.ha⁻¹. Sur toutes les associations sol-végétation existantes, 22 ont pu être caractérisées avec des valeurs de stocks de C, couvrant ainsi 92 % du pays. Le stock total de C pour l'île a été estimé à 2 795 Tg, en tenant compte de l'importance géographique de chaque unité taxonomique. La carte de C obtenue permet de mieux comprendre la répartition et la variabilité des stocks de C sur l'île. Cette étude constitue la première évaluation de la ressource en C organique des sols de Madagascar.

Mots clés

Sol, carbone, stocks, spatialisation, Madagascar.

SUMMARY**MADAGASCAR'S SOIL CARBON STOCKS ESTIMATION**

World's soil organic carbon estimates in various ecosystems show the great importance of soil as a storage pool. However, estimates at region scale are scarce. Present climate and land use change make necessary to evaluate this resource in order to assess its future trend. The aim of this paper is to provide accurate estimate of soil organic carbon stocks in the Malagasy soils for the 0-30 cm layer and according to the main land use met in the country. A georeferenced soil database was set up by using the existing soil survey and reports collected from 1946 to 1979. Information on soil profile description, horizons and analytical results done in laboratories were captured into this database. Bulk density values were derived from multiple regression based on clay content, carbon content and sum of exchangeable cations. A soil vegetation map was obtained by overlay of the 1:1 000 000 soil map and a simplified vegetation map. Soil organic carbon stocks calculated from 279 soil profiles range from 1,2 to 198,8 mg C.ha⁻¹ with a median of 43,7 Mg C.ha⁻¹. Among all the existing soil-vegetation association, 22 were characterised with carbon stocks values, that enabled to cover 92 % of the whole country. By integrating soils relative importance, total C stock in Malagasy soil was found to be about 2 795 Tg. The carbon map obtained allows to better understand soil organic stocks variability and the great importance of climate. This study is a first attempt to evaluate organic carbon resource in Madagascar.

Key-words

Soil, carbon, stocks, spatialization, Madagascar.

RESUMEN**ESTIMACIÓN DE LOS ESTOQUES DE CARBONO DE LOS SUELOS DE MADAGASCAR**

Las estimaciones mundiales de reservas de carbono orgánico (C) de diferentes ecosistemas enfatizan el rol del suelo como compartimiento de estoque. Sin embargo, estimaciones más precisas, particularmente a escalas regionales, son raramente disponibles. Con los cambios climáticos o del uso del suelo, se necesitan medidas y balances actuales de este recurso para prever sus futuras evoluciones. Este estudio constituye la primera estimación del recurso de C de Madagascar. El objetivo de este trabajo fue fornecer valores fiables de estoques de C de la camada 0-30 cm de los suelos de Madagascar según los modos de uso. Una base de datos georeferenciada fue construida con las informaciones colectadas entre 1946 y 1979. Esta base, contiene descripciones edafológicas, perfiles y horizontes de suelos y sus correspondientes datos analíticos. La densidad aparente fue calculada con ayuda de una función de pedotransferencia que incluye el contenido de arcilla, de carbono y la suma de los cationes. Un mapa de asociaciones suelo-vegetación fue generado con los datos del mapa de suelos de 1:1 000 000 y un mapa simplificado de la vegetación. Los estoques de C fueron sintetizados por tipo de suelo y asociación suelo-vegetación, lo que permitió la espacialización de los estoques. Los valores calculados de estoques de C para 279 perfiles de suelo mostraron una mediana de 43,7 MgC.ha⁻¹, con una extensión de los datos entre 1,2 y 198,8 Mg C.ha⁻¹. De las asociaciones suelo-vegetación identificadas, 22 pudieron ser caracterizadas con los valores de estoques, representando 92 % de la superficie del territorio. El estoque total de C de Madagascar fue estimado en 2 795 Tg, tomando en cuenta la importancia geográfica de cada unidad taxonómica de suelo. El mapa obtenido permite mejorar la comprensión de la distribución y de la variabilidad de los estoques de C de la isla.

Palabras clave

Suelo, carbono, estoque, espacialización, Madagascar

La séquestration du carbone (C) atmosphérique dans les écosystèmes terrestres est devenue un enjeu majeur dans le contexte global de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le sol représente un très grand réservoir de carbone, avec des estimations de l'ordre de 1500 Pg dans le premier mètre de sol (Feller et Bernoux, 2008), dont 26 % sont stockés dans les sols tropicaux (Batjes et Sombroek, 1997). Le sol contient ainsi environ trois fois plus de C que la végétation (~610 Pg C) et environ deux fois plus que l'atmosphère (~740 Pg C). Le potentiel de séquestration du C dans le sol, notamment dans les régions tropicales, représente donc un grand intérêt (Robert, 2002).

Le sol joue un rôle prépondérant dans le cycle du C mais reste un compartiment difficile à estimer compte tenu de sa variabilité et du grand nombre de facteurs contrôlant la fraction organique du sol (Bernoux *et al.*, 2002). Des études régionales et à l'échelle nationale sont nécessaires pour améliorer les estimations globales de stocks de C, évaluer la réponse de écosystèmes terrestres aux changements climatiques et aider les décideurs dans leur politique de gestion des terres (Milne *et al.*, 2007). Des travaux réalisés dans plusieurs pays ont permis de calculer les stocks de C par type de sol (Bernoux *et al.*, 1998; Batjes, 1996, Volkoff *et al.*, 1999) et par association sol-végétation (Arrouays *et al.*, 2001, Bernoux *et al.*, 2002), à partir de bases de données pédologiques géoréférencées.

A Madagascar, aucune estimation à l'échelle nationale n'était disponible. De nombreux inventaires des sols et cartographies à grande et moyenne échelle ont cependant été réalisés au cours de la période coloniale (Feller *et al.*, 2007). Plus récemment, l'intérêt de l'étude des sols s'est porté sur la réduction de la dégradation des sols liée à l'érosion diffuse et aux pratiques de défriche-brulis (Raunet, 1997). L'évaluation des stocks de C dans les compartiments sol et végétation est stimulée par le contexte international, notamment l'application des conventions cadres des Nations Unies et la mise en place de mécanismes de développement propre prévue dans le Protocole de Kyoto.

L'objectif de ce travail est de fournir des estimations des stocks de C organique dans les sols de Madagascar pour la couche 0-30 cm, considérée comme une couche de référence par le GIEC (IPCC, 2003), et selon les principaux modes d'occupation du sol représentés dans le pays. A partir des résultats obtenus, une carte des stocks de C organique dans les sols sera proposée.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

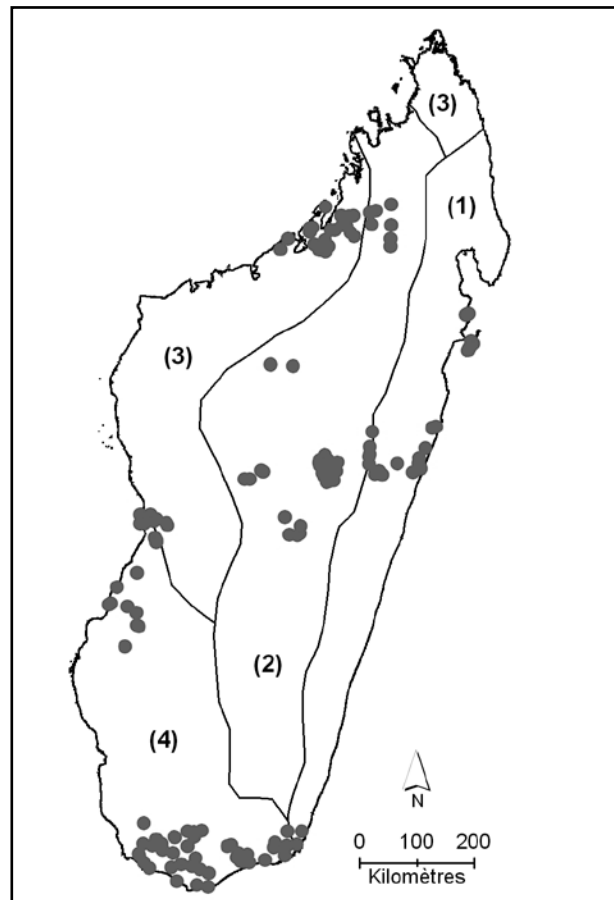
La méthode employée se résume en cinq étapes successives: (i) constitution d'une base de données pédologiques géoréférencées, (ii) extraction des informations sur les profils de sol, (iii) calcul des stocks de C par type de sol et par association sol-végétation, (iv) croisement géographique des cartes de sol et de végétation et enfin, (v) spatialisation des stocks de C calculés à l'aide de la carte des associations sol-végétation.

Constitution d'une base de données pédologiques géoréférencée

Madagascar a depuis longtemps été un terrain privilégié de la recherche scientifique et plus particulièrement de la pédologie en milieu tropical (Feller *et al.*, 2007), comme l'illustre le grand nombre de publications d'études de sol réalisées au cours du siècle dernier (ORSTOM, 1954; ORSTOM, 1973). Ce sont principalement des études pédologiques régionales, au 1/200 000^e et 1/100 000^e, réalisées par l'ORSTOM et couvrant différentes régions de Madagascar. Une partie de ces études a été informatisée dans le système de gestion de données relationnel VALSOL (Beaudou et Le Martret, 2004). D'un point de vue sémantique, la base comprend les informations relatives aux unités cartographiques de

Figure 1: Localisation des profils de sol avec un stock de carbone (n = 179). (1) Côte Est, climat perhumide, (2) Hautes Terres, climat sub-humide, (3) Côte Ouest et Nord, climat sec, (4) Sud, climat aride, modifié d'après Cornet (1972).

Figure 1: Localisation of profiles with carbon stocks (n = 179). (1) East Coast, perhumide climate, (2) Highland, sub-humide climate, (3) West and North Coast, dry climate, (4) South, arid climate, modified from Cornet (1972).



sol (UCS), la description des profils de sol, ainsi que les résultats des analyses physico-chimiques des différents horizons indiqués dans les notices explicatives. Les données figurant sur les cartes pédologiques telles que les Unités Cartographiques de Sols (UCS) et la localisation des profils ont été numérisées et géoréférencées dans un Système d'Information Géographique, ArcGIS 9.0 (ESRI, 2005). La base de données pédologiques ainsi constituée regroupe 27 études, réalisées au cours de la période 1946-1979. Au total., 1003 profils de sols, comprenant 2692 horizons allant de 0 à 10 mètres de profondeur, ont été saisis.

Extraction des informations de la base

Avant l'extraction des données, la qualité de la base a été évaluée à partir de l'observation des gammes de valeurs fréquemment rencontrées pour chaque type d'analyse. Des critères intégrateurs de plusieurs propriétés de sol ont été calculés (somme des fractions granulométriques, rapport C/N, taux de saturation). Cette analyse a permis d'identifier et de corriger certaines valeurs extrêmes ou aberrantes, dues notamment à des erreurs de saisie, que ce soit dans les notices explicatives ou dans la base. Seuls les horizons ayant des sommes de fractions granulométriques égales à $1000 \pm 100 \text{ g.kg}^{-1}$ ont été retenus pour les calculs de stocks de C. Les données extraites de la base sont: le type de sol selon la classification locale et la classification française de l'époque (C.P.C.S., 1967) d'une part, et les différents résultats d'analyses présentés dans le *tableau 2* d'autre part.

L'information sur l'occupation des sols a été renseignée à partir de la carte de végétation présentée plus loin.

Des gammes de valeurs très étendues ont été observées pour les fractions granulométriques, notamment, les teneurs en sables qui varient de 5 à plus de 990 g.kg^{-1} . De nombreuses propriétés de sol (cations échangeables, C, matière organique, azote) montrent des coefficients de variations supérieurs à 100 %. Ce résultat était attendu, vue la diversité des situations biopédoclimatiques concernées. Il est important de noter ici que l'ensemble des analyses a été réalisé dans l'unique laboratoire d'analyse de sol présent à Madagascar pendant la période d'inventaire. Les méthodes d'analyses utilisées sont les mêmes, notamment, le dosage du C organique par attaque sulfochromique et colorimétrie (Walkley et Black, 1934) et l'analyse granulométrique par densimétrie après dispersion à l'héxamétaphosphate de soude (méthode Pipette Robinson).

Calcul des stocks de carbone organique du sol

Le calcul des stocks de carbone organique du sol (SCO) a été réalisé pour une épaisseur de sol allant de 0 à 30 cm, selon la méthode classique qui consiste à additionner les stocks de carbone calculés par horizon, dans l'ordre du profil. Le SCO, en mégagrammes de C par hectare (Mg C.ha^{-1}), est obtenu en effectuant le produit de la teneur en carbone (TC en g.kg^{-1} de sol), de la densité apparente (D_a , g.cm^{-3}) et de l'épaisseur (e en cm) de l'horizon [eq. 1]. La fraction minérale supérieure à 2 mm (éléments

Tableau 1: Statistiques descriptives des propriétés de sols renseignées dans la base de données.

Table 1: Descriptive statistics of the soil properties datas from the database.

Propriété de sol *	Unité	n	Minimum	Maximum	Moyenne	Mediane	Ecart-type
Argile	g.kg^{-1}	618	0	786	300	293	181
Limons	g.kg^{-1}	618	0	565	161	141	112
Sables	g.kg^{-1}	618	5,0	996	517	509	244
□ Fg	g.kg^{-1}	618	900	1089	978	987	29
pH H ₂ O	-	607	3,4	8,9	6,0	5,7	1,1
Ca ²⁺	cmol.kg^{-1}	603	0	70,0	4,7	1,6	8,2
Mg ²⁺	cmol.kg^{-1}	605	0	36,8	1,7	0,5	3,5
K ⁺	cmol.kg^{-1}	606	0	4,3	0,3	0,1	0,4
Na ⁺	cmol.kg^{-1}	603	0	21,2	0,4	0	1,8
□ cations	cmol.kg^{-1}	601	0,0	70,4	7,1	2,8	10,5
C	g.kg^{-1}	572	0,2	124,4	11,8	7,2	13,4
MO	g.kg^{-1}	571	0,4	215,5	20,5	12,5	23,2
N	g.kg^{-1}	544	0	53,0	1,1	0,7	2,4
C/N	-	537	0,3	164,0	13,6	10,7	15,0

* □ Fg : Somme des fractions granulométriques (Argiles, Limons, Sables), □ cations : Somme des cations échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺), C : Carbone du sol, MO : Matière Organique, N : Azote total.

grossiers), supposée dépourvue de C, n'a pas été retranchée du stock de l'horizon car cette donnée était rarement présente dans les études considérées.

$$\text{SCO} = \text{TC} * \text{Da} * e * 0,1 \quad [\text{eq.1}]$$

Dans la plupart des cas, le premier horizon est d'épaisseur inférieure à 30 cm alors que le deuxième horizon va au-delà de la limite des 30 cm. Lorsqu'un horizon recouvre le seuil des 30 cm, le calcul des stocks ne prend en compte que l'épaisseur de l'horizon au-dessus de cette limite. Sur l'ensemble de la base, aucune mesure de densité apparente (Da) n'a été enregistrée. Dans cette étude, nous avons utilisé la fonction de pédotransfert (FPT) de Benites *et al.* (2007). La Da a été ainsi prédite à partir d'une régression linéaire multiple basée sur la teneur en argile, la teneur en C et la somme des bases échangeables. Cette fonction a été appliquée à partir d'une base de données constituée de 423 résultats d'analyses obtenues sur 0-30 cm de sol, et sur 13 types de sol du Brésil, selon la classification FAO-WRB (FAO, 1998), avec une majorité de ferralsols. Elle s'exprime de la façon suivante :

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

avec C = carbone organique en g.kg⁻¹, Argile en g.kg⁻¹ et SB = somme des bases en cmol.kg⁻¹ de sol

Les prédictions de Da issues de cette fonction ont été comparées à celles publiées dans une étude récente (Razafimbelo *et al.*, 2008), pour des sols

Tableau 2: Les différents types de sols à Madagascar, d'après la carte de Delenne et Pelletier, 1981 (n.c.: non cartographié).

Table 2: *The soil types of Madagascar, from the Delenne et Pelletier (1981) soil map. (n.c.: unmapped).*

Référence	Groupe	Superficie (km ²)	Aire relative (%)
FERRA	Sols ferrallitiques	274561	46,5
FERRU	Sols ferrugineux	164510	27,8
FERSI	Sols fersiallitiques	16375	2,8
EVAPP	Sols peu évolués d'apport	37752	6,4
EVLIT	Sols peu évolués d'érosion	24824	4,2
MINBR	Sols minéraux bruts	20252	3,4
HYDRO	Sols hydromorphes	15172	2,6
PODZL	Sols podzolisés	5598	0,9
VERTI	Vertisols	5341	0,9
ANDOS	Andosols	542	0,1
CALCA	Sols calcimagnésiques	n.c,	
SODIQ	Sols sodiques	n.c,	
ROCNU	Roche à nu	26097	4,4

ferrallitiques et ferrugineux de Madagascar sous culture annuelle.

Carte des sols

La couverture pédologique de Madagascar a été synthétisée à deux reprises, à travers une carte pédologique de Riquier (1968) et une carte morpho-pédologique de Delenne et Pelletier (1981). Ces deux cartes ont été levées au 1 millionième, la première utilisant la classification française de 1967 (C.P.C.S, 1967) et la deuxième utilisant une classification modifiée de la CPCS, adaptée au contexte local. La carte de Delenne et Pelletier (1981) a été retenue dans cette étude car elle intègre des connaissances plus récentes sur les liens pédogénétiques entre le relief et le sol (Bourgeat et Zebrowsky, 1973; Sourdat, 1977). Cette carte publiée en trois coupures a été téléchargée depuis le site internet des archives européennes des cartes de sol (EUDASM, URL 1, 2009). Elle a été géoréférencée dans le système de référence spatiale spécifique à Madagascar (projection Laborde) à l'aide d'un SIG. Les UCS de la carte ont été traduites en terme de type de sol dominant selon la CPCS (1967) puis numérisées à partir de la carte géoréférencée. Dix types de sol sont ainsi représentés (tableau 2), dont les deux plus fréquents sont les sols ferrallitiques et les Sols ferrugineux, couvrant plus de 70 % du territoire. Deux autres types, les Sols calcimagnésiques et sodiques, étaient présents dans la base mais non représentés sur la carte.

Carte de végétation

Une carte récente de l'occupation du sol (Moat et Smith, 2007), réalisée à l'aide d'images Landsat datant de 1999 à 2003 (résolution au sol de 30 mètres), a été téléchargée (CEFT, URL2), intégrée dans un SIG et simplifiée. La légende de la carte représente 18 classes d'occupation du sol correspondant à 6 classes principales: les zones en eau, la roche nue, la forêt, les zones cultivées, la mangrove et la savane. La stratégie de simplification de la carte consiste à regrouper les 18 classes initiales selon des critères de spécificité de la végétation et/ou climatiques. Les 10 classes de forêt, différenciées par leur type et leur localisation géographique (ex. « forêt humide de l'ouest ») ont ainsi été synthétisées en trois groupes: « forêt humide », « forêt sèche » et « forêt dégradée ». Les trois classes de savane (herbacée,

arbustive, arborée) ont été rassemblées sous un seul et unique groupe nommé « *mosaïque de savane herbacée et arbustive* ». Les autres classes ont été conservées. Au final, la légende de la carte de végétation simplifiée représente 8 types d'occupation du sol.

Carte des associations sol-végétation

Les deux cartes ont été ajustées à la même étendue et même maille de un kilomètre, par rasterisation de la carte des sols et rééchantillonnage de la carte de végétation selon la méthode des plus proches voisins. La carte des associations sol-végétation a été obtenue par combinaison géographique de la carte des sols et de végétation.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les stocks de C organique (SCO) sur 0 - 30 cm ont pu être calculés pour 294 profils (579 horizons).

Parmi ces profils, 270 étaient clairement identifiés par rapport à la classification des sols utilisée (*tableau 2*) et 179 ont pu être représentés spatialement (*figure 1*).

Estimation des densités apparentes

Les estimations de D_a obtenues par FPT (éq. 1) montrent une distribution normale, avec des valeurs allant de 0,63 et 1,89 g.cm^{-3} (*figure 2b*). Les deux types de sols principaux, les sols ferrallitiques et ferrugineux, ont respectivement des valeurs de $1,25 \text{ g.cm}^{-3} \pm 0,12 \text{ g.cm}^{-3}$ et $1,39 \text{ g.cm}^{-3} \pm 0,1 \text{ g.cm}^{-3}$. Des mesures réalisées dans 8 sites d'expérimentations agronomiques à Madagascar (Razafimbelo *et al.*, 2008) montrent des valeurs similaires, de $1,11 \pm 0,12 \text{ g.cm}^{-3}$ pour les sols ferrallitiques et $1,51 \pm 0,2 \text{ g.cm}^{-3}$ pour les Sols ferrugineux (*tableau 3*). Ce résultat valide l'utilisation des estimations de D_a pour le calcul des SCO pour les deux principaux types de sol. Une évaluation de la précision de cette FPT pour les autres types de sol n'a pas été réalisée par manque de mesures disponibles.

Stocks de carbone par type de sol

Sur l'ensemble des profils, la moyenne des SCO sur 30 cm est de $51,8 \text{ Mg C.ha}^{-1}$ avec des valeurs allant de 1,2 à $198,8 \text{ Mg C.ha}^{-1}$ (*figure 2a*). On observe seulement 10 % des profils (30 profils) avec des SCO supérieurs à 100 Mg C.ha^{-1} . Le déséquilibre de la distribution des SCO est confirmé par une médiane nettement inférieure à la moyenne ($43,7 \text{ Mg C.ha}^{-1}$).

L'analyse de ces valeurs par type de sol (*tableau 4*) montre que les andosols et les sols hydromorphes ont les SCO les plus élevés, respectivement de $90,8 \pm 31,6$ et $75,9 \pm 36,9 \text{ Mg C.ha}^{-1}$. Ces résultats semblent cohérents avec ce que l'on pouvait attendre: stabilisation de la matière organique humifiée associée aux

Tableau 3: Densité apparente (g.cm^{-3}) estimée et mesurée pour les deux principaux types de sol aux profondeurs inférieures à 40 cm. Entre parenthèses: écart-type.

Table 3: Bulk density (g.cm^{-3}) estimated and measured for the two mayor soil type for the 0-40 cm layer. Intro braquets: standard error.

	Da FPT	Da Razafimbelo <i>et al.</i>
Sols ferrallitiques	1,25 (0,12) $\mu = 135$	1,11 (0,14) $\mu = 20$
Sols ferrugineux	1,39 (0,10) $\mu = 73$	1,51 (0,2) $\mu = 28$

minéraux allophaniques (Albrecht *et al.*, 1992) et conservation de la matière organique dans les conditions d'anaérobiose. En opposition, les SCO les plus faibles sont observés pour les sols minéraux bruts avec des SCO de $18,8 \pm 12,9 \text{ Mg C.ha}^{-1}$. Les sols ferrugineux, fersiallitiques et peu évolués d'érosion ont des valeurs moyennes similaires, proche de 33 Mg C.ha^{-1} . Les sols ferrallitiques, les mieux représentés avec 89 profils, font partie des types de sols ayant les valeurs de SCO les plus élevées, de $61,8 \pm 31,8 \text{ Mg C.ha}^{-1}$. Cette valeur est supérieure à celle obtenue au Brésil, de $52 \pm 30 \text{ Mg C.ha}^{-1}$ (Batjes, 2005), pays dont les Ferralsols (FAO, 1998) couvrent 31 % du territoire.

Ces résultats montrent la grande variabilité des valeurs de SCO pour les différents types de sol rencontrés à Madagascar. Ils montrent également la variabilité observée au sein de chaque unité taxonomique; les coefficients de variation observés vont de 35 % à 76 %. Cette incertitude de mesure est liée à l'objet sol dont les propriétés intrinsèques sont très variables, même à l'échelle locale. D'autres estimations à l'échelle nationale montrent également de fortes variations des SCO, parfois supérieures à 100 % (Arrouays *et al.*, 2001; Batjes, 2005).

Stocks de carbone par association sol-végétation

La carte des associations sol-végétation issue du croisement entre la carte des sols au 1 millionième et la carte de végétation simplifiée est caractérisée par 86 associations. Il s'agit presque de l'ensemble des combinaisons possibles (11 unités de sol, 8 classes d'occupation du sol). Ce grand nombre d'associations est le résultat du cumul des erreurs géographiques et thématiques des deux couches sources, de la délimitation de très grandes unités cartographiques de sol pour la carte de sol, et de très petites unités de végétation, par une méthode de classification automatisée, pour la carte de végétation. On observe ainsi que les vingt plus petites associations représentent 0,1 % du territoire (676 km^2) alors que les vingt plus grandes couvrent plus de

Figure 2: Histogramme de distribution des estimations des stocks de carbone de carbone organique sur 0-30 cm de sol (a) et de densité apparente (b).

Figure 2: Distribution histogram of estimated stocks of soil organic carbon on the top 0-30 cm layer (a) and bulk density (b).

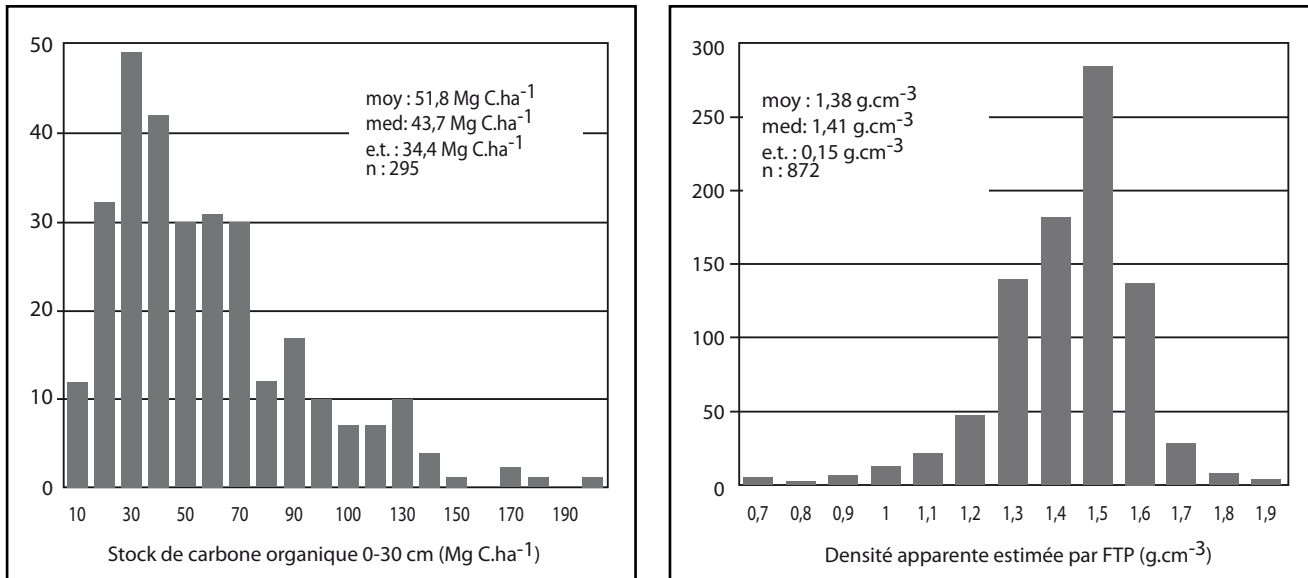


Tableau 4: Stocks de carbone organique sur 0-30 cm de sol par type de sol (Mg C.ha⁻¹).

Table 4: Soil organic carbon in the 0-30 top layer for soil types (Mg C.ha⁻¹).

	n	Moy	Min	Max	CV
Sols ferrallitiques	89	61,3	5,0	163,2	0,52
Sols ferrugineux tropicaux	50	33,6	3,6	86,2	0,63
Sols hydromorphes	40	75,9	9,9	161,1	0,49
Sols peu évolués d'apport	33	53,2	12,3	198,8	0,76
Sols minéraux bruts	12	18,8	1,1	46,1	0,69
Sols calcimagnésiques	9	46,3	21,9	112,9	0,66
Sols brunifiés	8	25,8	4,4	40,6	0,44
Sols fersiallitiques	8	32,5	13,1	74,6	0,63
Vertisols	7	47,7	18,1	80,4	0,52
Sols sodiques	5	42,2	22,4	91,2	0,66
Andosols	4	90,8	62,1	120,3	0,35
Sols peu évolués d'érosion	4	33,6	21,4	52,5	0,40
Sols podzolisés	1	66,6			

91,6 % (541 178 km²). Les 179 profils pour lesquels les SCO sur 0-30 cm ont été calculés et qui ont pu être localisés ont permis de caractériser un nombre limité d'associations sol-végétation (34 avec au moins 1 profil). La représentativité des profils par association a été analysée et le critère de 3 profils minimum a finalement été choisi pour sélectionner les associations sol-végétation et calculer les valeurs statistiques (moyenne et coefficient de variation). Ainsi, des unités taxonomiques de sol et des classes de végétation furent exclues des calculs: c'est le cas des Vertisols, Andosols, Sols podzolisés et la classe des mangroves et roche nue. Par ailleurs, des données supplémentaires issues du travail de Razafimbelo *et al.*, (2008) ont été synthétisées afin de compléter ces résultats pour les terres arables sur sols ferrallitiques, ferrugineux et fersiallitiques. Au final., 22 associations ont pu être caractérisées par au moins 3 valeurs de SCO, représentant 92,2 % du territoire (544 633 km²). Les résultats obtenus sont présentés dans le *tableau 5*.

Les SCO calculés sur 0-30 cm vont de 9,1 Mg C.ha⁻¹ (Sols minéraux bruts sous forêt dégradée) à 98,4 Mg C.ha⁻¹ (Sols hydromorphes sous culture). L'influence de l'occupation du sol

sur le potentiel de stockage du C dans les sols est variable selon l'unité taxonomique de sol considérée. Les sols ferrallitiques ont une grande gamme de SCO: 40,4 Mg C.ha⁻¹ sous culture, 60,8 Mg C.ha⁻¹ sous savane, 72,4 Mg C.ha⁻¹ sous forêt dégradée, 85,6 Mg C.ha⁻¹ sous forêt humide. Les Sols ferrugineux sont beaucoup moins sensibles aux changements d'occupation du sol car on observe de faibles écarts entre les moyennes (2,7 Mg C.ha⁻¹ maximum). Ces différences de comportement vis-à-vis de la matière organique sont à relier avec la texture du sol, qui est argileuse à sablo-argileuse pour les sols ferrallitiques, permettant une meilleure agrégation, et sableuse pour les Sols ferrugineux, limitant ainsi la protection de la matière organique. Les autres types de sol montrent des différences intermédiaires de SCO selon l'occupation du sol, par rapport aux deux types de sol principaux. La considération de l'occupation du sol pour le calcul de SCO a permis de réduire la variabilité des valeurs et d'obtenir des résultats plus fiables. Le coefficient de variation moyen est de 56 % par unité taxonomique de sol et de 48 % par association sol-végétation.

Tableau 5: Stocks de carbone organique sur 0-30 cm de sol par associations sol-végétation (Mg C.ha⁻¹).

Entre parenthèses: n et coefficient de variation.

Table 5: Soil organic carbon in the 0-30 cm top layer for soil-vegetation associations (Mg C.ha⁻¹). Into brackets: n and the coefficient of variation.

Sols	Occupation du sol				
	Terres arables	Forêt dégradée	Forêt humide	Forêt sèche	Savane herbacée et arbustive
Sols ferrallitiques	40,4 *	72,4	85,6		60,8
	(32 ; 0,33)	(11 ; 0,42)	(6 ; 0,57)		(47 ; 0,47)
Sols ferrugineux	31,8 *	33,7		34,8	34,6
	(24 ; 0,27)	n.a.		(3 ; 0,22)	(24 ; 0,66)
Sols fersiallitiques	41,4 *	38,2			31,4
	(28 ; 0,19)	(5 ; 0,54)			(4 ; 0,25)
Sols peu évolués d'apport	52,1	66,1		35,6	45,5
	(4 ; 0,93)	(4 ; 0,44)		(3 ; 0,54)	(13 ; 0,57)
Sols peu évolués d'érosion		30,1			34,6
		n.a.			(3 ; 0,46)
Sols hydromorphes	98,4	87,7			80
	(3 ; 0,33)	(6 ; 0,66)			(13 ; 0,49)
Sol minéraux bruts		9,1			10,6
		n.a.			(3 ; 0,91)

N.a: données non disponibles par manque d'échantillons pour fournir des statistiques. * stocks estimés à partir des données de Razafimbelo *et al.* (2008).

N.a: not available due to insufficient samples to provide statistics. * estimated stocks using data from Razafimbelo *et al.* (2008).

Distribution des stocks de carbone

Les valeurs de SCO par association sol-végétation ont été affectées à chaque unité correspondante de la carte sol-végétation. La *figure 3* représente la carte du C obtenue. Les valeurs les plus élevées se situent sur la côte Est de l'île, avec des grandes superficies dans le Nord-Est, là où se localisent les sols ferrallitiques sous forêt humide. L'ensemble des hautes terres centrales et du reste de la côte Est présente des valeurs de SCO élevées, entre 60 et 80 Mg C.ha⁻¹, déterminées par la présence de sols ferrallitiques sous savane et forêt dégradée. Les côtes Ouest et Sud de Madagascar, de climat sec à aride, présentent les stocks les plus faibles, entre 30-40 Mg C.ha⁻¹ pour les Sols ferrugineux, et proches de 10 Mg C.ha⁻¹ pour les grandes zones de Sols minéraux bruts ou roche à nue. Des valeurs intermédiaires (40-50 Mg C.ha⁻¹) se trouvent sur la côte Ouest, au niveau des grandes plaines alluviales et zones de dépôt (Sols peu évolués d'apport), et sur la côte Est, pour les terrains cultivés, principalement en café, girofle et vanille.

Stock total de C pour l'île

A partir de ces résultats, une estimation du stock total de C pour Madagascar a été réalisée, en suivant deux modes simples de calcul. Le premier utilise la valeur médiane de SCO et la superficie totale du pays. Le deuxième prend en considération chaque type de sol avec leurs valeurs de SCO et leurs superficies respectives. L'erreur sur ces estimations est calculée à partir du coefficient de variation.

$$\text{SCO médian} \times \text{Superficie totale} = \\ 2583 \pm 1565 \text{ Tg C (66 \% d'erreur)}$$

$$\text{SCO par type de sol} \times \text{Superficie de l'unité} = \\ 2795 \pm 1565 \text{ Tg C (56 \% d'erreur)}$$

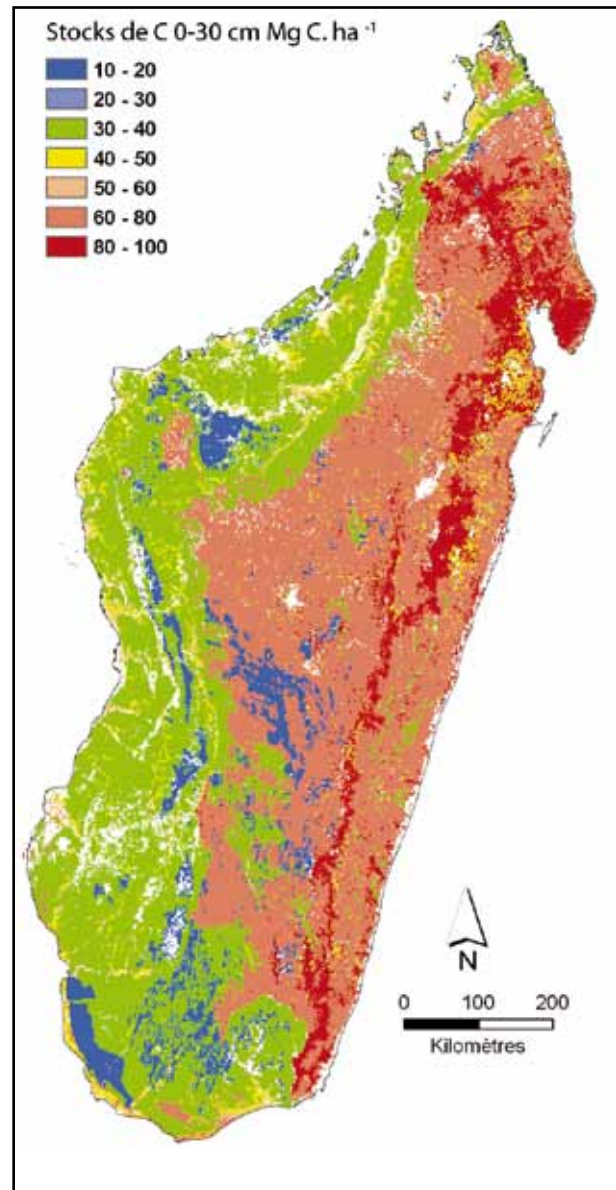
Ces résultats sont proches de celui estimé par la FAO (2002), environ 2780 Tg C pour Madagascar, et calculé à partir d'une base de données sol mondiale, dont seulement 34 profils sont issus de Madagascar. Comparativement, les estimations de stocks de C sur la France (d'une superficie un peu plus faible que Madagascar) sont de 3 100 Tg (Arrouays *et al.*, 2001) et 36 400 ou 37 600 Tg selon les auteurs (Bernoux *et al.*, 2002; Batjes 2005) pour le Brésil.

Considération de l'incertitude

Trois principales sources d'incertitude ont pu être identifiées. La première est liée à la méthode d'analyse du carbone en laboratoire: la méthode Walkley-Black (WB). Une étude récente montre que le taux de recouvrement du carbone en utilisant le WB est très variable et systématiquement en deçà des valeurs communément acceptées (De Vos *et al.*, 2007). L'étude réalisée sur des sols forestiers met en évidence l'effet laboratoire, à travers

Figure 3: Carte des stocks de carbone organique (0-30 cm) dans les sols de Madagascar.

Figure 3: Map of the soil organic carbon (0-30 cm) in malagasy soils.



les adaptations du protocole expérimental original, qui peut contribuer jusqu'à 29 % de la variabilité totale de la mesure du C. Dans notre étude, les teneurs en C (TC) ont été mesurées par un seul laboratoire et selon le protocole WB original. Comme il est difficile à l'heure actuelle de justifier tel ou tel facteur de correction selon le type de sol et la profondeur considérée, les résultats de TC n'ont pas été corrigés, ce qui amène à sous-estimer les stocks de carbone dérivés de ces valeurs. Cette source d'incertitude est vraisemblablement la plus importante et nécessite une étude

approfondie notamment sur les taux de recouvrement réellement observés sur sols ferrallitiques et ferrugineux de Madagascar.

La deuxième source d'incertitude concerne les mesures de densités apparentes estimées à partir d'une fonction de pédotransfert. Les valeurs prédites utilisées et celles mesurées à partir de la méthode classique au cylindre pour les deux principaux sols sous culture ne montrent pas de différences significatives. L'application de cette fonction aux autres types de sol et pour des modes de gestion différents peut être la source d'erreurs importantes. Une comparaison exhaustive et/ou un développement de fonctions de pédotransfert spécifiques aux sols de Madagascar permettraient de mieux quantifier cette erreur.

Enfin, la troisième source d'incertitude est liée à la validité temporelle de ces résultats. La majorité des prélèvements ont été réalisés sous végétation naturelle il y a plus de 30 ans. Comme beaucoup de pays d'Afrique, Madagascar subit une forte pression démographique qui est à l'origine de modifications importantes de l'occupation du sol souvent difficile à quantifier et localiser. A titre d'exemple, la déforestation à Madagascar, liée à la pratique de défriche-brulis, est très importante, mais les données publiées sont très variables (Kull, 2000). Bien qu'il existe un manque de précision sur l'évolution historique et récente de l'occupation du sol, la carte du carbone obtenue représente une ligne de base acceptable des stocks de carbone sous végétation naturelle.

CONCLUSION

Les estimations de stocks de C présentées dans cette étude sont la première évaluation du stock de carbone organique contenu dans les sols de Madagascar. Ceci constitue une première valorisation des nombreuses études pédologiques réalisées à Madagascar, dans le cadre de la problématique actuelle de la séquestration du C dans le sol en vue d'atténuer les effets des changements climatiques. La méthode utilisée à l'avantage d'être simple et de permettre une spatialisation des stocks de C sur de grandes zones géographiques, en tenant compte des différents modes d'occupation du sol. Le travail à cette échelle a permis d'améliorer les connaissances sur la distribution des stocks de C et de fournir des valeurs de références pour les sols malgaches.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Noly Razanajaonera pour le travail considérable sur la digitalisation et la saisie des études. Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'US018 Valpedo de l'IRD en partenariat avec le FOFIFA (2005-2006) puis soutenu par l'unité SeqBio de l'IRD (2007-2008).

BIBLIOGRAPHIE

- Albrecht A., Ranson L., and Barret P., 1992 - Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). Cah. ORSTOM série Pédologie, 27, pp. 121-130.
- Arrouays D., Deslais W., Badeau V., 2001 - The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. Soil and Use Management, 17, pp. 7-11.
- Batjes N.H., 1996 - Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European J. Soil Sci. 47, pp. 151-163.
- Batjes N.H., Sombroek W.G., 1997 - Possibilities of carbon sequestration in tropical and subtropical soils. Global Change Biology, 3, pp. 161-173.
- Batjes N.H., 2005 - Organic carbon stocks in the soils of Brazil. Sol Use and Management. 21, pp. 22-24.
- Beaudou A., Le Martret H., 2004 - MIRURAM/VALSOL: Un système d'information et une base de données pour représenter les sols tropicaux et leurs environnements. Etudes et Gestion des Sols, 11, 3, pp. 271-284.
- Benites V.M., Machado P.L.O.A., Fidalgo E.C.C., Cêlho M.R., Madari B.E., 2007 - Pedotransfert functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. Geoderma, 139, pp. 90-97.
- Bernoux M., Arrouays D., Cerri C., Alencastro Graça P.M., Volkoff B., Trichet J., 1998 - Estimation des stocks de carbone des sols du Rondônia (Amazonie brésilienne). Etudes et Gestion des Sols, 5, 1, pp. 31-42.
- Bernoux M., Carvalho M.C.S., Volkoff B., Cerri C.C., 2002 - Brazil's soil carbon stocks. Soil Sci. Soc. Am. J., 66, pp. 888-896.
- Bourgeat F., Zebrowsky P., 1973 - Relations entre le relief, les types de sol et les aptitudes culturales sur les hautes terres Malagasy. Cah. de l'ORSTOM. Série Biologique, 19, pp. 23-41.
- Cornet A., 1972 - Carte bioclimatique de Madagascar au 1/200 000°. ORSTOM, Antananarivo, Madagascar.
- C.P.C.S., 1967 - Classification des sols. Travaux C.P.C.S. 1967. Rapp. Mult., 96 p.
- De Vos B., Lettens S., Muys B., Deckers J.A., 2007 - Walkley-Black analysis of forest soil organic carbon: recovery, limitations and uncertainty. Soil Use and Management, 23, pp. 221-229
- Delenne M.F., Pelletier F., 1981 - Carte du Potentiel des Unités Physiques, au 1:1 000 000°. Orstom. Bondy, France.
- ESRI® (Environmental Systems Research Institute), 1994-2005. <http://www.esri.com>.
- EuDASM, http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/EuDASM/africa/lists/cmg.htm, European digital archive of soil Maps. last visited: 13/01/2009
- FAO, 1998 - World reference base for soil resources. FAO/ISS/ISRIC World Soil Resources Reports-84), Rome, 88 p.
- FAO, 2002 - TERRASTAT, Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties. Land and Water Development Division. Rome, Italie.
- Feller C., Blanchart E., Herbillon A., Leprun J.C., Poss R., 2007 - L'importance des recherches coloniales, en particulier à Madagascar dans le développement de la pédologie française. Etude et Gestion des Sols, 14, 4, pp. 305-315.
- Feller C., Bernoux M., 2008 - Historical advances in the study of global terrestrial soil organic carbon sequestration. Waste Management, 28, pp. 734-740.
- IPCC, 2003 - Land Use Change and Forestry Sector Good Practice Guidance. In: Jim Penman, M.G., Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger., Riitta Pipatti, L.B., Kyoko Miwa, Todd Ngara., Wagner, K.T.a.F. (Eds.), IGood Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Japan.
- Kull C.A., 2000 - Deforestation, Erosion, and Fire: Degradation Myths in the Environmental History of Madagascar. Environment and History, 6, pp. 0-21.

- Milne, E., Adamat, R.A., Batjes, N.H., Bernoux, M., Bhattacharyya, T., Cerri, C.C., Cerri C.E.P., Coleman, K., Easter, M., Falloon, P., Feller, C., Gicheru, P., Kamoni, P., Killian, K., Pal, D.K., Paustian, K., Powlson, P., Rawajifih, Z., Sessay, M., Williams, S., Wokabi. 2007 - National and sub-national assessments of soil organic carbon stocks and changes: The GEFSOC modelling system. *Agriculture, Ecosystems and Environnement*, 122, 1, pp. 3-12.
- Moat J. and Smith P. 2007 - Atlas of the Vegetation of Madagascar, Royal Botanic Gardens, Kew. UK.
- ORSTOM, 1954 - Carte des études pédologiques, Centre de Tananarive, Madagascar
- ORSTOM, 1973 - Listes bibliographiques des travaux pédologiques. Centre de Tananarive, Madagascar, 65 p.
- Raunet M., 1997 - Les Ensembles Morpho-pédologiques de Madagascar, Projet Conservation des sols, Cirad, Madagascar, 76 p.
- Razafimbelo T., Albrecht A., Ravelojaona H., Moussa N., Razanaparany C., Rakotoarinivo C., Razafintsalama H., Michellon R., Naudin K., Rabeharisoa L., Feller C., 2008 - Stockage de carbone dans le sol sous systèmes en semis direct sous couvert végétal suivant différents contextes pédoclimatiques. Cas du Sud-Est, du Centre-Nord et du Sud-Ouest de Madagascar, Terres Malgaches spécial actes du séminaire « sols tropicaux et semis direct sous couvertures végétales », Université d'Antananarivo, 179 p.
- Riquier J., 1968 - Carte pédologique de Madagascar, au 1 : 1000000. Orstom. Paris, France.
- Robert M., 2002 - La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres. *World Soil Resources Reports-FAO 96*, Rome, Italie, 75 p.
- Sourdat, M., 1977, Sud-Ouest de Madagascar, Morphogénèse et pédogénèse, ORSTOM, Thèse d'état, Paris.
- Volkoff B., Faure P., Dubrœucq D., Viennot M., 1999 - Estimation des stocks de carbone des sols du Bénin. *Etude et Gestion des Sols*, 6, 2, pp. 115-130.
- Walkley A., Black J.A., 1934 - An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic titration method. *Soil Sci.* 37, pp. 29-38.

