

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 2. Spatialiser les stocks de carbone

Le cas de Madagascar

Hery Razafimahatratra, Herintsitohaina Razakamanarivo, Michel Brossard, Alain Albrecht, Clovis Grinand, Andry Andriamananjara, Michel Rabenarivo, Manony Andriampiolazana, Ny Ando Rakotomampionona Andrianaly, Ambinintsoa Heritokilalaina, Onjamirindra S. Rakotonarivo, Nantenaina Ramboatiana, Nandrianina Ramifehiarivo, Narindra H. Rakotovao, Heritiana J. G. Saneho, Arthur A. Zafindrabenja et Tantely M. Razafimbelo

DOI : 10.4000/books.irdeditions.34897
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

RAZAFIMAHATRATRA, Hery ; et al. *Chapitre 2. Spatialiser les stocks de carbone : Le cas de Madagascar*
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/34897>>. ISBN : 9782709928373. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.34897>.

Spatialiser les stocks de carbone

Le cas de Madagascar

*Hery RAZAFIMAHATRATRA, Herintsitohaina RAZAKAMANARIVO,
Michel BROSSARD, Alain ALBRECHT, Clovis GRINAND,
Andry ANDRIAMANANJARA, Michel RABENARIVO,
Manony ANDRIAMPIOLAZANA, Ny Ando RAKOTOMAMPIONONA ANDRIANALY,
Ambinintsoa HERITOKILALAINA, Onjamirindra S. RAKOTONARIVO,
Nantenaina RAMBOATIANA, Nandrianina RAMIFEHIARIVO,
Narindra H. RAKOTOVAO, Heritiana J. G. SANEHO,
Arthur A. ZAFINDRABENJA, Tantely M. RAZAFIMBELO*

Introduction

Dans les laboratoires d'analyse des sols à Madagascar, la mesure du carbone organique du sol (COS) sert à calculer la teneur en matière organique (MO), une information utile pour la gestion de la fertilité des sols. Outre son évaluation quantitative, diverses études sur le COS ont été menées sur (1) sa dynamique, en interaction avec les autres constituants du sol selon les pratiques et modes d'usage des terres ou (2) sur sa variabilité spatio-temporelle. Ces études ont été effectuées généralement dans le cadre d'essais agronomiques, d'expérimentations sur les fertilisants organiques ou minéraux, d'essais variétaux ou de nouveaux systèmes de culture (chap. 7). Elles ont été réalisées en exploitations agricoles, sur des parcelles paysannes, ou en stations expérimentales en milieu contrôlé.

Depuis quelques décennies, les études sur le COS ont pris une autre dimension et touchent aux réflexions sur le changement climatique. Les recherches sur le

COS se sont multipliées à différentes échelles (communale, régionale ou nationale), au niveau d'une parcelle ou d'un terroir. Les axes d'orientation se portent sur l'évaluation des stocks et parfois sur les termes du bilan de carbone (C), c'est-à-dire sur les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et les apports de carbone dans le sol. L'évaluation des stocks cherche à estimer la quantité de COS par unité de surface (Mg C.ha⁻¹) et à proposer des bilans selon les modes d'usages des terres. Divers points de vue, parfois divergents, se confrontent quant au protocole d'échantillonnage ou encore la pertinence et la fiabilité de la méthode d'analyse conventionnelle, et des questions se posent toujours sur les incertitudes et la variabilité spatiale des stocks de COS. Cependant au fil du temps, des résultats d'analyses se sont accumulés et ont fait l'objet de valorisations spécifiques, dont la cartographie des stocks de carbone du sol à différentes échelles.

À Madagascar, les travaux d'évaluation des stocks de COS ont été réalisés sur des systèmes agricoles ou des écosystèmes naturels très variés. À l'échelle du pays, la diversité des climats, des sols, des modes d'usage et des types de végétation constituent des facteurs déterminants mais difficilement maîtrisables pour l'étude des stocks de COS. Située dans la zone intertropicale entre 12° et 25° de latitude Sud, avec un climat chaud et humide, Madagascar a une grande variété de sols dont la pédogénèse est fondamentalement liée aux lithologies, à la géomorphologie et au climat. Une grande partie des sols évolue sur des roches cristallines et métamorphiques. La partie ouest repose davantage sur des roches sédimentaires avec des sols carbonatés dans certains endroits. Les roches volcaniques restent très localisées dans des petites zones (Analavory et Antsirabe). Parmi la diversité des sols malgaches (tabl. 1), les sols ferrallitiques occupent la quasi-moitié de la superficie totale de l'île, répartis essentiellement sur les Hautes Terres centrales et la partie orientale. Les sols ferrugineux se distribuent sur le versant occidental. Ce chapitre présente les éléments de complexité liés à l'évaluation et la spatialisation des stocks de COS en se basant sur les travaux réalisés à Madagascar.

Tableau 1
Répartition des principales classes de sols de Madagascar.

Classification CPCs* (1967)	Superficie (km ²)	Aire relative (%)	Classification FAO/WRB** (1998)
Sols ferrallitiques	274 561	46,5	Ferralsols, Nitisols, Cambisols
Sols ferrugineux	164 510	27,8	Luvisols, Arenosols
Sols fersiallitiques	16 375	2,8	
Sols peu évolués	62 576	10,6	Fluvisols
Sols minéraux bruts	20 252	3,4	Arenosols, Regosols, Lithosols
Sols hydromorphes	15 172	2,6	Gleysols
Autres		6,3	-

* Commission de pédologie et de cartographie des sols.

** Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture ; Base mondiale de référence pour les ressources en sols.

Source : GRINAND *et al.*, 2009.

Évaluation des stocks de carbone du sol à Madagascar

La connaissance de la fertilité naturelle et potentielle des sols constitue un élément majeur pour le choix des cultures et la gestion des exploitations agricoles. Le COS reste un élément clé pour la mesure de la teneur en matière organique. De plus, des recherches approfondies sur le COS des écosystèmes agricoles et naturels sont menées dans le contexte du changement climatique et d'évaluation de bilan de carbone.

Les écosystèmes étudiés

L'occupation ou l'usage des terres joue un rôle primordial sur la dynamique du carbone du sol. Outre l'évaluation des stocks, les recherches s'intéressent également à la potentialité de stockage ou d'émission de gaz à effet de serre (GES), à savoir CO_2 , CH_4 , N_2O ¹. À Madagascar, les écosystèmes étudiés peuvent être classés en trois catégories : les écosystèmes forestiers (naturels ou plantations), les systèmes cultivés (y compris agroforestiers) et les milieux naturels sous savanes.

Les écosystèmes forestiers

Selon leur localisation et la nature des zones climatiques, les forêts naturelles malgaches se divisent globalement en « forêts humides » sur la partie est et « forêts sèches » sur la partie ouest. Le carbone des écosystèmes forestiers se répartit dans plusieurs compartiments : la biomasse aérienne, la litière, la biomasse racinaire et le sol. En fonction des types de forêt, les valeurs de stocks de COS sur 0-30 cm varient pour les forêts humides, de 49 à 93 $\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ et de 32 à 50 $\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour les forêts sèches (RAZAKAMANARIVO *et al.*, 2012). La variation de stock est surtout attribuée à la quantité de biomasse restituée au sol, plus élevée en zone humide. Au sein d'un même type forestier, les stocks peuvent aussi varier, avec pour les forêts humides de l'Est, des stocks moyens de l'ordre de 53 $\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ à Fénériver-Est (SANEHO *et al.*, 2014) et de 67 $\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ à Vohimana (RAZAFIMAHATRATRA, 2006).

Dans une plantation d'eucalyptus des Hautes Terres centrales de Madagascar, les stocks de COS s'élèvent à 85,5 $\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour la couche de sol 0-30 cm (RAZAKAMANARIVO *et al.*, 2011).

Les évaluations des stocks de COS se sont surtout focalisées sur les forêts humides de l'Est. En revanche, il existe peu de données sur les forêts sèches ou les plantations. Des études seraient également nécessaires afin d'analyser

1. N_2O : protoxyde d'azote.
 CH_4 : méthane.
 CO_2 : dioxyde de carbone.

l'influence de la quantité et la nature de la biomasse aérienne sur le stockage du carbone dans le sol ainsi que leur dynamique vis-à-vis du climat.

L'évaluation des stocks de COS dans les systèmes forestiers reste très complexe. Une typologie, ou un zonage, peut être réalisée facilement pour prendre en compte la variabilité de la biomasse aérienne ; par contre, il est très difficile d'appréhender la variabilité spatiale des sols. Les cartes pédologiques existantes sont peu précises et ne renseignent que les grandes classes de sols. Pour le cas des forêts naturelles denses, le problème d'accessibilité constitue de plus une contrainte pour d'éventuels travaux d'échantillonnage systématique.

Les systèmes cultivés

Dans les agrosystèmes, le milieu ouvert facilite l'échantillonnage par rapport aux écosystèmes forestiers. Outre le type de sol, il faut tenir compte du mode d'usage, du type de culture et des itinéraires techniques. L'objectif est de comparer les différents usages et pratiques tout en considérant la variabilité des sols entre les sites.

Lorsque les travaux sont réalisés en milieu paysan, d'autres éléments sont également à considérer :

- historique des parcelles. Expliquer et comparer les résultats nécessitent des connaissances sur l'historique des parcelles telles que les apports en fertilisants organiques qui impactent directement la teneur en COS. L'accès aux engrais minéraux reste limité à Madagascar. Ainsi, il est souvent difficile de vérifier la fiabilité et la précision des informations d'enquêtes sur l'historique des usages et pratiques, et notamment celles concernant les apports en fertilisants et en engrais ;
- homogénéité des pratiques culturales. Les itinéraires techniques peuvent varier d'un paysan à un autre. Par exemple, la gestion des résidus de récolte est un facteur déterminant des apports en matière organique au sol. L'agriculture et l'élevage vont de pair pour les paysans malgaches ; les biomasses végétales issues des cultures, comme les pailles de riz, peuvent servir, ou pas, de fourrage pour le bétail. L'apport de fumier dépend essentiellement de la quantité disponible ; les cultures maraîchères sont privilégiées, puis la culture de riz. Cette hétérogénéité de pratiques rend difficile l'évaluation des stocks de carbone du sol des systèmes cultivés.

Les stocks de COS dépendent fortement des pratiques culturales. Pour un sol ferrallitique de l'est de Madagascar, l'agroforesterie affiche un stock moyen de COS de 78 Mg C.ha⁻¹ sur 0-30 cm de profondeur contre 66 Mg C.ha⁻¹ pour les systèmes de culture sous couverture végétale et 64 Mg C.ha⁻¹ pour les systèmes conventionnels (SANEHO, 2013). Une étude comparative dans la couche 0-30 cm d'un sol ferrallitique du Moyen-Ouest a montré un stock de COS de l'ordre de 23 Mg C.ha⁻¹ pour un système sous couverture végétale contre 20 Mg C.ha⁻¹ pour un système labouré (RAKOTOMAMPIONONA, 2013). De même à Antsirabe, sur les Hautes Terres centrales de Madagascar, les 30 premiers centimètres constituent une zone d'accumulation de la matière organique issue de la dégradation des résidus de culture (RAZAFIMBELO *et al.*, 2008) et concentrent

plus de la moitié du stock de carbone de la couche de sol 0-1 m, pour 10 points de prélèvement sur 12 mesurés (RAZAFIMAHATRATRA *et al.*, 2014). Ces résultats montrent aussi l'hétérogénéité de la teneur en COS le long du profil du sol.

Les milieux naturels sous savanes

Les savanes herbeuses et arbustives subissent chaque année le passage des feux de brousse et servent de pâturage pour les bovidés. Les contraintes liées à l'historique des parcelles ne s'imposent pas pour ce type de système considéré comme « homogène » en termes de mode d'usage. Les principaux paramètres à considérer pour l'évaluation des stocks de COS sont le type de sol, la topographie, la nature de la couverture végétale et son taux de renouvellement (potentiellement impacté par les feux et le pâturage extensif).

La faible accessibilité de certaines zones limite les échantillonnages et leur représentativité spatiale.

Méthode d'analyse

La teneur en COS du sol est classiquement mesurée en utilisant la méthode de WALKLEY et BLACK (1934). Elle est basée sur l'oxydation du carbone organique par le bichromate de potassium. Il s'agit d'une méthode conventionnelle utilisée depuis longtemps pour l'évaluation du COS à Madagascar mais aussi dans d'autres pays du continent africain. Actuellement, on assiste de plus en plus à l'utilisation de nouveaux matériels et d'autres méthodes comme la combustion par voie sèche grâce aux analyseurs élémentaires (CHN).

La notion d'échelle d'étude

L'évaluation des stocks de COS se réalise à différentes échelles selon l'objectif fixé. Pour des études agronomiques, elle se concentre au niveau des parcelles de culture. Pour le cas des études en relation avec le changement climatique, l'évaluation concerne généralement des espaces géographiques plus grands (zone forestière, région, pays, etc.).

Les études intra- ou inter-parcellaires

Divers paramètres, comme les pratiques culturales, restent relativement homogènes et les historiques des parcelles sont facilement accessibles par enquête auprès des paysans. Les répétitions d'échantillonnage sont réalisées sur plusieurs sous-parcelles homogènes afin d'appréhender la variabilité spatiale des stocks de carbone du sol. À cette échelle, celle-ci est peu liée aux variations de la couverture pédologique. Une telle étude permet d'appréhender les effets des saisons et des pratiques culturales. Ces dernières influent directement sur les flux entrants ou sortants de matières organiques : les apports de fumier ou de compost, la restitution des résidus de culture, les pertes par exportation de biomasse végétale pour d'autres usages (par ex. le fourrage) ou par érosion.

Les études sur de grands espaces géographiques

Travailler sur de grands espaces géographiques (parfois appelés improprement « à grande échelle ») suppose de connaître aussi la variabilité des différents paramètres influençant les stocks de COS du sol. En quittant l'échelle parcellaire, des hétérogénéités sont à considérer pour chaque mesure. La délimitation des zones étudiées peut suivre différents critères (fig. 1, 2 et 3) : (i) liés à l'usage des terres et donc à la couverture végétale (forêts, zones de culture, plantations, etc.) et sa gestion, (ii) aux limites administratives (commune, région, pays, etc.), (iii) aux zones agro-écologiques.

À Madagascar, la première carte des stocks de COS à l'échelle nationale a été réalisée par GRINAND *et al.* (2009) (fig. 1). Ce travail de spatialisation s'est appuyé sur 279 profils de sols dont les teneurs de COS et les densités apparentes étaient connues. Les stocks de COS à Madagascar varient, dans la couche de sol 0-30 cm, de 10 à 100 Mg C ha⁻¹. Ce sont surtout les zones humides de l'est de l'île qui affichent des valeurs de stock de carbone du sol les plus élevées, de l'ordre de 80 à 100 Mg C.ha⁻¹ (fig. 1). La figure 3 montre un travail cartographique à l'échelle d'une commune dans une zone de plantation d'eucalyptus dans les Hautes Terres centrales. Pour l'ensemble de la commune (3 000 ha), les stocks totaux de COS dans les 30 premiers centimètres de sol ont été évalués à 139 ± 36 Gg C. La variation des stocks (de 60 à 110 Mg C.ha⁻¹) à l'échelle de la commune confirme l'importance des différents facteurs influençant la teneur en carbone du sol et la grande hétérogénéité des stocks de carbone même sur des espaces restreints. Cette étude a montré la complexité d'un écosystème, et particulièrement l'existence d'une grande variabilité des propriétés intrinsèques liée à la biomasse et au sol, à l'importance de la pente, à la présence et la qualité de litière (RAZAKAMANARIVO *et al.*, 2011).

Variabilités pédoclimatiques et diversité des modes d'usage et de gestion des terres

Variabilité des sols en relation avec les roches mères et le climat

Durant la pédogenèse, le type de sol ainsi que la nature et les propriétés de la phase minérale solide dépendent de la roche dont le sol est issu. Divers éléments minéraux dans le sol sont hérités de la roche mère durant les différents processus d'altération. La zone des Hautes Terres malgaches est largement dominée par des roches cristallines. Les sols y sont de type ferrallitique, caractérisés surtout par la présence de minéraux issus de la phase ultime de l'altération de la roche mère, comme la kaolinite et la gibbsite.

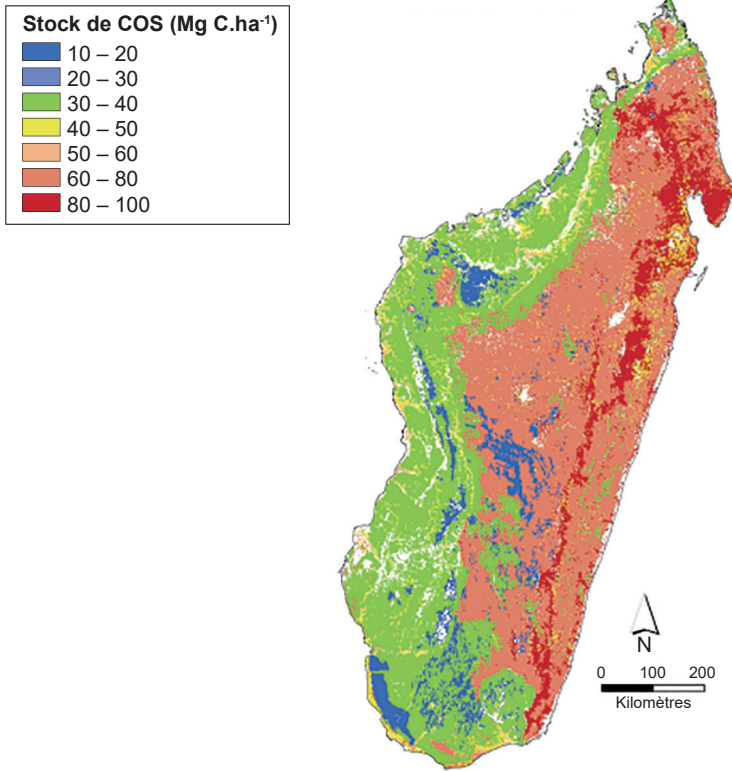


Figure 1

Carte des stocks de COS, sur 0-30 cm de profondeur, à l'échelle de l'île de Madagascar.

Source : GRINAND et al., 2009.

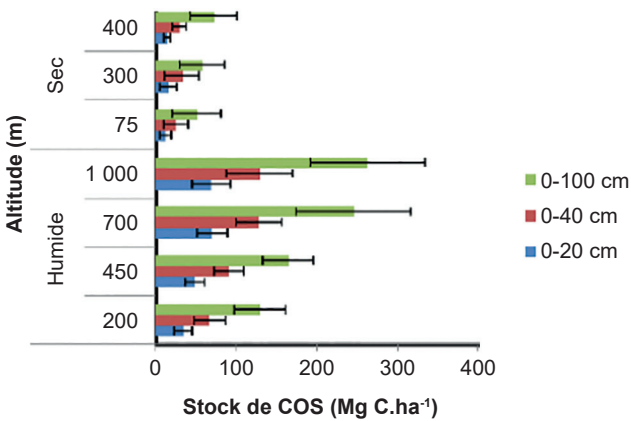


Figure 2

Variation des stocks de COS dans différentes couches de sols (0-20, 0-40 et 0-100 cm de profondeur) en fonction de l'altitude et du climat.

Source : RAKOTONARIVO, 2010.

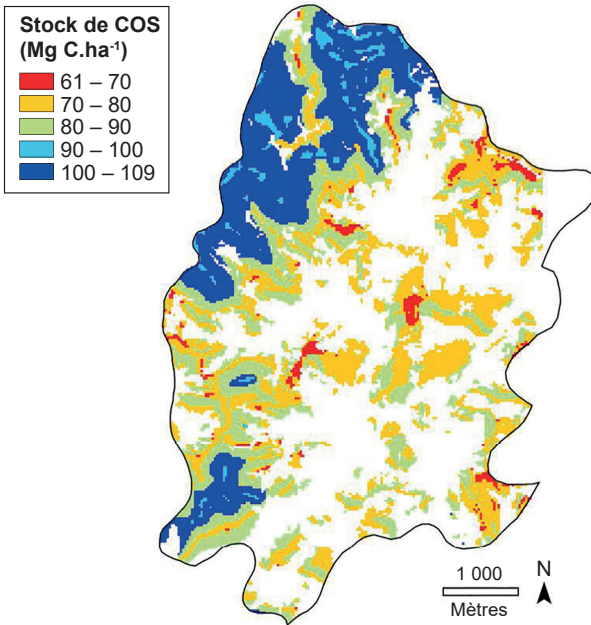


Figure 3

Carte des stocks de COS, sur 0-30 cm de profondeur, dans la commune de Sambaina-Manjakandriana dominée par des plantations d'eucalyptus.

Source : RAZAKAMANARIVO *et al.*, 2011.

Diverses études ont montré des relations entre les propriétés du sol et les stocks ou le stockage de COS. Il existe une relation entre la teneur en argiles granulométriques du sol et sa teneur en COS (FELLER et BEARE, 1997). L'influence du type d'argile sur la teneur en carbone du sol est cependant moins claire (FENG *et al.*, 2013 ; FUJISAKI *et al.*, 2018). De même, la lithologie influe sur les masses volumiques des sols. Les densités des horizons profonds sont plus élevées, surtout pour des sols qui se développent sur des granites.

Le climat est connu comme l'un des artisans de la formation du sol. La température et les précipitations agissent directement sur l'altération des roches mères. Le climat joue également un rôle primordial sur (i) la dynamique des éléments minéraux dans le sol, par exemple le processus de départ de la silice par drainage favorisant la formation de la gibbsite sous un climat humide ; (ii) la dynamique de la matière organique, notamment sa vitesse de minéralisation via la régulation des activités biologiques des sols. En climat chaud et humide, la MO du sol se minéralise rapidement. Par exemple, une étude réalisée à Fort Dauphin dans le sud-est de Madagascar montre que les stocks de COS sont impactés par l'altitude (fig. 2) mais aussi fortement par le climat (RAKOTONARIVO, 2010). Le climat, à différentes échelles de temps, influe sur les propriétés physico-chimiques et les activités biologiques des sols. Il est un facteur déterminant des variabilités spatio-temporelles de la distribution des stocks de carbone.

Diversité des modes d'usage et de gestion des terres

C'est l'un des facteurs les plus difficiles à maîtriser pour l'analyse de la variation et de l'évolution des stocks de COS à différentes échelles spatiales. Les stocks de COS sont étroitement liés aux modes d'usage des terres qui peuvent favoriser le stockage ou le déstockage du carbone. Pour les parcelles cultivées en milieu paysan, il n'est pas toujours aisé de retracer leur historique ni de prévoir leur évolution en termes de gestion. Cette situation est due à l'hétérogénéité des techniques et des pratiques culturelles adoptées. Ainsi, il est toujours délicat de réaliser des comparaisons spatio-temporelles.

Dans les écosystèmes non cultivés (forêt, prairie naturelle, savane, etc.), il est possible d'avancer l'hypothèse d'une absence de toute intervention humaine sur le milieu. Toutefois des simulations sur le changement d'usage des terres et la dynamique des stocks de COS s'imposent lorsque le corpus de données le permet. Les travaux de spatialisation se trouvent toujours confrontés à cette contrainte : comment appréhender la variabilité spatiale des stocks de COS d'une région sous une multitude de modes d'usage des terres ?

À l'échelle d'un terroir, selon la position topographique et la disponibilité en eau, le type de culture change. Les zones de bas-fonds sont dédiées exclusivement à la riziculture irriguée, les bas de pentes pour les cultures maraîchères et les zones en pente plus ou moins prononcée, exploitées pour les cultures vivrières. À l'intérieur de chacune de ces zones, se trouve une diversité de cultures et de pratiques culturelles. Cette situation rend ainsi difficile l'évaluation précise des stocks à l'échelle du terroir. Cette problématique d'emboîtement d'échelles demeure valable quelle que soit l'échelle d'étude.

De l'évaluation des stocks à la spatialisation

L'évaluation des stocks de COS peut avoir comme objectif final la spatialisation et la cartographie des stocks afin d'enrichir la connaissance, mais aussi la comparaison et la simulation de divers scénarios d'usages ou de transformation de la couverture du sol sur l'évolution des stocks. La spatialisation fait intervenir la notion de représentativité, d'échelle spatiale, sans oublier de prendre également en compte les erreurs éventuelles durant la modélisation.

Échantillonnage : notion de représentativité

L'échelle et la représentativité sont deux notions à considérer lors de l'échantillonnage. Le nombre d'échantillons prélevés devra tenir compte de l'étendue et

de la complexité de la zone d'étude. La démarche méthodologique devra aussi considérer la représentativité spatiale des échantillons prélevés. Une solution serait d'avoir des prélèvements régulièrement espacés à l'intérieur de la zone étudiée. Outre la représentativité géographique, les différentes situations échantillonnées devront aussi représenter les modes d'usage des terres, les différents types de sols et positions topographiques, etc. Autant que possible, les scientifiques chercheront à appréhender le maximum de variabilité des stocks de COS afin de minimiser les incertitudes induites par les travaux de terrain.

L'accessibilité de certaines zones reste encore compliquée à Madagascar. L'absence de routes qui desservent les zones reculées limite ainsi le respect d'un échantillonnage systématique ou spatialement raisonné. Ensuite, la notion de représentativité sous-entend également la mobilisation de moyens financiers et humains importants. La recherche explore alors des méthodes alternatives comme l'utilisation de la technique de la spectrométrie infrarouge à la place des analyses conventionnelles (VISCARRA ROSSEL *et al.*, 2006), ou l'utilisation de la télédétection pour des études sur de larges espaces (GRINAND *et al.*, 2017). Pour couvrir toute la représentativité spatiale des modes d'usage dans les travaux d'échantillonnage, les chercheurs sont toujours obligés d'extrapoler ou de modéliser les stocks de COS, en s'appuyant par exemple sur la cartographie numérique des sols. Le principe consiste à utiliser les données pédologiques disponibles sur la zone à étudier – en l'occurrence les teneurs en COS et la densité apparente des sols – et des données spatiales représentant des éléments du paysage qui ont un lien avec les sols, les « covariables » (LAGACHERIE *et al.*, 2013). Les données de stocks de COS disponibles sont divisées en deux lots : un lot de calibration pour la construction du modèle et un lot de validation pour l'évaluation de sa performance. Après avoir validé le modèle, il peut être utilisé ou appliqué pour prédire les stocks de COS de l'ensemble des zones d'étude (RAMIFEHIARIVO *et al.*, 2017).

Cartes pédologiques : problème d'échelle

À Madagascar, les études pédologiques ont été réalisées essentiellement avant 1980 par les pédologues de l'Office de la recherche scientifique et technique outre-mer (ORSTOM ; LEPRUN *et al.*, 2010). Il s'agissait de travaux d'exploration, d'identification, de description, de classification et de cartographie des différents types de sols. À l'échelle nationale, nous avons pu identifier quelques cartes pédologiques (échelles 1/4 000 000 à 1/1 000 000 ; RIQUIER, 1968 ; ROEDERER et BOURGEAT, 1969 ; FAO-UNESCO, 1974 ; BIED-CHARRETTON *et al.*, 1981).

Certaines études, pour les besoins spécifiques souvent liés à des activités agricoles, nécessitent des cartes à plus grandes échelles (1/20 000 à 1/50 000, voire 1/100 000). Actuellement, ces types de cartes ne couvrent qu'une petite zone de l'île. La carte nationale ne permet pas d'appréhender toute la variabilité spatiale des différents types de sols. Pour la cartographie des stocks de COS, l'utilisation des cartes pédologiques devient une contrainte majeure car la modélisation des stocks de carbone est fortement liée à cette variabilité spatiale

du sol. Par conséquent, l'utilisation des cartes à 1/1 000 000, qui n'offrent pas d'informations détaillées de la variabilité des types de sols, n'assure pas la pertinence et la fiabilité des résultats. Ce problème est également rencontré pour la valorisation agronomique des terres.

Les incertitudes en cartographie

Les travaux de spatialisation utilisent toujours la technique de modélisation et de prédiction des valeurs à partir de certains points de référence à l'intérieur de la zone étudiée (RAMIFEHIARIVO *et al.*, 2017). Plusieurs critères peuvent être utilisés pour évaluer la robustesse des modèles de prédiction et la pertinence des résultats. Par exemple, l'incertitude nous renseigne sur les erreurs des valeurs prédites par rapport aux valeurs réelles. Plus les erreurs sont élevées, moins la carte est fiable.

Pour la carte des stocks de carbone dans les 30 premiers centimètres des sols de l'écorégion humide de Madagascar (fig. 4), les erreurs (RMSE ou erreur quadratique moyenne entre valeurs observées et valeurs prédites) sont de l'ordre de 26 Mg C.ha⁻¹. Cette incertitude reste encore importante étant donné que des valeurs inférieures à 70 Mg C.ha⁻¹ ont été trouvées pour cette zone d'étude.

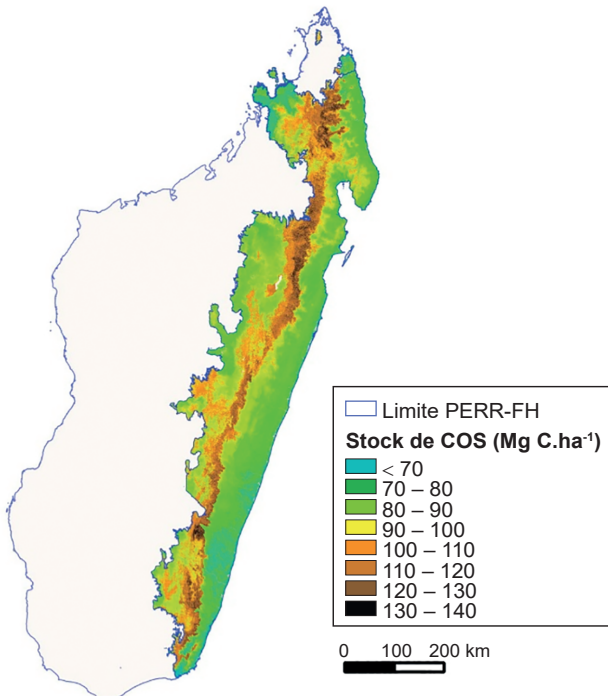


Figure 4

Carte des stocks de COS, sur une profondeur de 0-30 cm, de l'écorégion humide de Madagascar.

Source : projet écorégional REDD+ – Forêts humides de Madagascar (PERR-FH).

Ces incertitudes peuvent provenir des données initiales ou des méthodes utilisées. L'utilisation de cartes à 1/1 000 000 pour une application locale à l'aide d'une modélisation conduit généralement à de fortes imprécisions. Des améliorations devront être apportées vis-à-vis des méthodes utilisées. Une meilleure compréhension des facteurs de la variabilité et la prise en compte de l'ensemble des facteurs jouant sur cette incertitude, apporteront des résultats plus pertinents et fiables.

Conclusion

L'évaluation et la spatialisation des stocks de carbone du sol demeurent un travail complexe. Divers paramètres, tels que les hétérogénéités de la couverture pédologique et des modes d'usage des terres, influencent la variabilité spatiale des stocks de COS. Outre son importance pour connaître la teneur en matière organique du sol, la mesure du COS occupe une place grandissante dans les instances internationales préoccupées par le changement climatique. Aussi, les recherches sur le COS ont dorénavant acquis une envergure mondiale. À Madagascar, des études ont déjà été réalisées sur la cartographie des stocks de COS à différentes échelles. Ces travaux ont montré la nécessité (i) d'adopter une méthode d'analyse appropriée selon l'objectif de l'étude, (ii) de considérer la notion de représentativité lors de l'échantillonnage afin d'appréhender la variabilité spatiale, (iii) de se focaliser sur la diminution de l'incertitude pour les travaux de spatialisation et de cartographie des stocks de COS.

Bibliographie

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*, 87, 189 p., Numéro de carte Sphaera : 947, Bondy, Orstom.

CPCS, 1967
Classification des sols. Grignon, Ensa, 96 p.

FAO, 1998
World reference base for soil resources. *World Soil Resources Report No. 84*. Rome, ISSS-ISRIC-FAO, 90 p.

FAO-UNESCO, 1974
Carte mondiale des sols au 1/5 000 000. Rome, FAO-Unesco, Cartes et notice, 62 p.

- FELLER C., BEARE M. H., 1997**
Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79 (1) : 69-116.
- FENG W., PLANTE A. F., SIX J., 2013**
Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry*, 112 (1) : 81-93.
- FUJISAKI K., CHAPUIS-LARDY L., ALBRECHT A., RAZAFIMBELO T., CHOTTE J.-L., CHEVALLIER T., 2018**
Data synthesis of carbon distribution in particle size fractions of tropical soils: Implications for soil carbon storage potential in croplands. *Geoderma*, 313 : 41-51.
- 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.
- GRINAND C., MAIRE G. L., VIEILLEDENT G., RAZAKAMANARIVO H., RAZAFIMBELO T., BERNOUX M., 2017**
Estimating temporal changes in soil carbon stocks at ecoregional scale in Madagascar using remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 54 : 1-14.
- LAGACHERIE P., ARROUAYS D., WALTER C., 2013**
Cartographie numérique des sols : principe, mise en œuvre et potentialités. *Étude et gestion des sols*, 20 (1) : 83-98.
- LEPRUN J.-C., RAZAFINJARA L., ANDRIANTAHINA R., FELLER C., 2010**
« Chapitre 10. Pédologie ». In Feller C., Sandron F. (éd.) : *Parcours de recherche à Madagascar. L'IRD-Orstom et ses partenaires*. Marseille, IRD : 247-293.
- RAKOTOMAMPIONONA N. A. A., 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 de fin d'étude, université d'Antananarivo, Madagascar. 93 p.
- RAKOTONARIVO S., 2010**
Les stocks de carbone de la biomasse aérienne et du sol selon la distribution altitudinale et le mode d'usage des terres en climat tropical humide et semi-aride. Cas de la région de Taolagnaro, Madagascar. Mémoire de DEA, université d'Antananarivo, Madagascar. 103 p.
- RAMIFEHIARIVO N., BROSSARD M., GRINAND C., ANDRIAMANANJARA A., RAZAFIMBELO T., RASOLOHERY A., RAZAFIMAHATRATRA H., SEYLER F., RANAIVOSON N., RABENARIVO M., ALBRECHT A., RAZAFINDRABE F., RAZAKAMANARIVO H., 2017**
Mapping soil organic carbon on a national scale: towards an improved and updated map of Madagascar. *Geoderma Regional*, 9 : 29-38.
- RAZAFIMAHATRATRA H., 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, Madagascar. 93 p.
- RAZAFIMAHATRATRA H., ANDRIAMPIOLAZANA M., RAZAKAMANARIVO H., LE MARTRET H., RAZAFIMBELO T., BROSSARD M., 2014**
« Variabilité verticale des stocks de carbone des sols de la Région d'Antsirabe ». In *12^e journée d'étude des sols, 30 juin-4 juillet 2014*, Le Bourget du Lac, université de Savoie.
- RAZAFIMBELO T. M., ALBRECHT A., OLIVER R., CHEVALLIER T., CHAPUIS-LARDY L., FELLER C., 2008**
Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 98 (2) : 140-149.
- RAZAKAMANARIVO R. H., GRINAND C., RAZAFINDRAKOTO M. A., BERNOUX M., ALBRECHT A., 2011**
Mapping organic carbon stocks in eucalyptus plantations of the central highlands of Madagascar: a multiple regression approach. *Geoderma*, 162 (3) : 335-346.
- RAZAKAMANARIVO H., RAZAFIMBELO T., RAKOTOMALALA E., GRINAND C., RAZAFIMAHATRATRA H., 2012**
Importance of carbon storage in forest biomass and soils for climate change mitigation: case of Madagascar
Présentation à la Conférence internationale Tours 2012 « Faire face au changement climatique », Tours.

**RIQUIER J., [avec la collaboration de]
BESAIRIE H. C., BOURGEAT F.,
CLAISSE G., DIDIER DE SAINT-AMAND R.,
HERVIEU J., MOUREAUX C.,
RAKOTOMIRAHO J. D.,
RANDRIANARIDERA E., RATASILAHY J. R.,
RIQUIER J., ROCHE P., SÉGALEN P.,
TERCINIER G., VIEILLEFON J., 1968**
*Carte pédologique de Madagascar à l'échelle
de 1:1 000 000.* Tananarive, Bondy, Orstom.

ROEDERER P., BOURGEAT F., 1969
« Notice et carte (1/400 000) de pédologie.
Planche 16 ». In Le Bourdieu F., Batistini R.,
Le Bourdieu P. (éd.) : *Atlas de Madagascar.*
Tananarive, BDPA-IGN.

SANEHO H. G., 2013
*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 fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master 2. Institut supérieur des sciences,

environnement et développement durable,
université de Toamasina, Madagascar 80 p.

**SANEHO H. G., RAZAKAMANARIVO H.,
RAZAFIMBELO T., ANDRIAMANANJARA A.,
RAZAFIMAHATRATRA H.,
RAMIFEHIARIVO N., 2014**
« Dynamique de carbone du sol après
déforestation des forêts naturelles sempervirentes
du Centre Est de Madagascar ». In : *12^e journée
d'étude des sols, 30 juin-4 juillet 2014,*
Le Bourget du Lac, université de Savoie.

**VISCARRA ROSSEL R. A., WALVOORT D. J. J.,
MCBRATNEY A. B., JANIK L. J.,
SKJEMSTAD J. O., 2006**
Visible, near infrared, mid infrared or combined
diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous
assessment of various soil properties. *Geoderma*,
131 (1) : 59-75.

WALKLEY A. J., BLACK I. A., 1934
Estimation of soil organic carbon by the chromic
acid titration method. *Soil Science*, 37 : 29-38.