

## Prédiction de la teneur en carbone organique et de la texture des principaux types de sol de la région Itasy par la spectrométrie en moyen infrarouge (SMIR)

Narindra H. Rakotovoao<sup>1\*</sup>, Tantely Razafimbelo<sup>1</sup>, Stephan Rakotosamimanana<sup>2</sup>, Alain Albrecht<sup>3</sup>

### Résumé

Les techniques d'analyse du sol s'orientent de plus en plus vers les techniques les moins coûteuses et plus rapides comme la spectrométrie dans le moyen infrarouge (SMIR). La présente étude a pour objectif d'élaborer des modèles statistiques de prédiction du carbone organique du sol (COS) et de la texture des sols agricoles de la région Itasy par la SMIR. L'échantillonnage a été réalisé sur 761 parcelles de culture réparties sur quatre communes de la région. Un spectromètre portatif « The Agilent 4100 Exoscan FTIR » scannant dans le moyen infrarouge a été utilisé. La modélisation a été réalisée en utilisant la régression linéaire du moindre carré partiel ou PLSR. Les résultats ont montré une bonne performance des modèles de prédiction que ce soit pour le COS ou pour la texture. Le modèle de prédiction du COS sur sol volcanique a été le plus performant avec un  $R^2=0,95$  et un « residual of prediction deviation » ou RPD=4,31 en calibration tandis qu'un  $R^2=0,93$  et un RPD=3,79 en validation. Pour les sols ferrallitiques, on a obtenu un  $R^2=0,9$  et un RPD=3,15 en calibration tandis qu'un  $R^2=0,85$  et RPD=2,56 en validation. Les modèles sur la texture ont également montré de bonnes performances en calibration avec un  $R^2=0,98$  et des RPD tous supérieurs à 2.

**Mots clés :** analyse spectrale, prédiction, sols ferrallitiques, sols volcaniques

### Abstract

Soil analysis techniques are moving towards less expensive and faster techniques such as mid-infrared spectrometry (MIRS). This study aimed to develop statistical models for soil organic carbon (SOC) and texture quantification in agricultural land in Itasy region. Sampling work was carried out on 761 plots. A portable spectrometer "The Agilent 4100 Exoscan FTIR" scanning in the mid-infrared was used. Modeling was performed using partial least squares regression (PLSR). The results showed good performance of predictive models both for SOC and texture. The SOC model performed for Andosols showed the best performance with  $R^2=0.95$  and RPD=4.31 in calibration while  $R^2=0.93$  and the residual of prediction deviation or RPD=3.79 in validation. In ferralsols, the model showed  $R^2=0.9$  and RPD=3.15 in calibration while  $R^2=0.85$  and RPD=2.56 in validation. The models performed for texture showed also good performance in calibration with all  $R^2=0.98$  and all RPD higher than 2.

**Keywords:** andosols, carbon prediction, ferralsols, spectral analysis

### 1. Introduction

Les préoccupations sur le changement climatique et l'augmentation croissante de la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ont renforcé la prise de conscience sur la nécessité de multiplier les actions visant à atténuer ce phénomène. Les mesures d'atténuation visent à stabiliser la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère soit par la réduction des émissions, soit par le stockage du carbone atmosphérique dans les puits de carbone comme le sol (GIEC, 2007). Au niveau planétaire, le sol contient environ 1500 Gt de carbone organique ; l'atmosphère contient environ la moitié de cette valeur sous forme de CO<sub>2</sub> (720 Gt) et il y a à peu près 600 Gt dans la végétation (Jenkinson et Adams, 1991). Ainsi, une légère variation du flux de carbone séquestré ou émis par le compartiment sol pourrait être significative à l'échelle globale d'où l'intérêt croissant porté sur les études axées sur la teneur, le stockage, la séquestration et la dynamique du carbone organique dans les sols.

Nombreuses sont les techniques de quantification et de caractérisation des propriétés physico-chimiques

du sol. Parmi ces techniques figure la spectrométrie infrarouge qui est actuellement une technique assez répandue et pouvant être considérée comme une alternative à l'analyse conventionnelle des sols (McBratney *et al.*, 2006; Viscarra Rossel *et al.*, 2006). Etant parmi les méthodes alternatives dites moins coûteuses et non destructive, la spectrométrie dans le moyen infrarouge (SMIR) a suscité beaucoup d'intérêts en particulier pour la mesure du carbone du sol (Bellon-Maurel et McBratney, 2011 ; Brunet *et al.*, 2007) et la caractérisation de la fraction minérale du sol qui est généralement dominante dans le spectre du moyen infrarouge (Reeves, 2012).

Cet article s'insère dans le cadre méthodologique d'une étude plus large sur l'évaluation de l'impact de l'adoption des pratiques agroécologiques sur l'empreinte carbone d'exploitations agricoles et la séquestration de carbone dans le sol de la région Itasy. Dans ce contexte, cette étude a pour objectif de mettre en place une méthodologie de quantification du carbone organique (COS) et de la texture du sol par la SMIR, ce qui consiste à élaborer des modèles statistiques robustes de prédiction du carbone organique et de la texture du sol applicables sur l'ensemble de la région Itasy.

<sup>1</sup>Laboratoire des Radio Isotopes, Université d'Antananarivo, BP 3383, Antananarivo, Madagascar

<sup>2</sup>Agrisud International, Lot VL32M Androntra, 101 Antananarivo, Madagascar

<sup>3</sup>Institut de Recherche pour le Développement, UMR Eco&Sols, 34060 Montpellier, France.

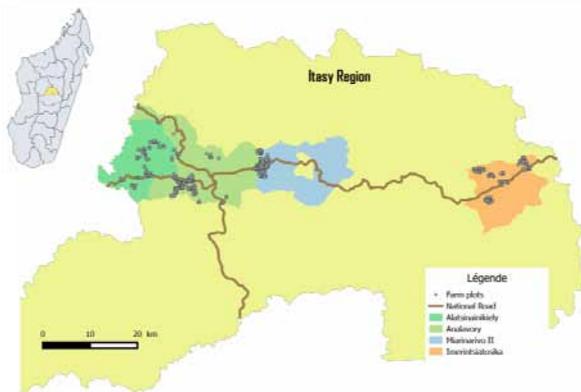
\*Auteur correspondant : [n.rakotovoao@yahoo.fr](mailto:n.rakotovoao@yahoo.fr)

Svp citer cet article comme suit : Rakotovoao N.H. *et al.*, 2016. Prédiction de la teneur en carbone organique et de la texture des principaux types de sol de la région Itasy par la spectrométrie en moyen infrarouge (SMIR). *Akon'ny Ala* 33 : 1-6.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Zone d'étude et localisation des parcelles

Cette étude a été menée dans la région Itasy (46°54'22.66"E, 18°57'25.85"S), partie centrale des hautes terres de Madagascar. Sept cent soixante et un parcelles de culture appartenant à 200 exploitations agricoles réparties sur quatre communes de la région Itasy ont fait l'objet de l'échantillonnage (figure 1). Les parcelles ainsi échantillonnées ont représenté les diversités de situations rencontrées dans la région Itasy que ce soit en termes de types de sols (Ferrallitique, volcanique), de systèmes agricoles (riziculture, culture annuelle de « tanety », agroforesterie, foresterie), de niveaux d'apport en matière organique et de localisation dans le paysage (sommet, versant, bas versant et bas fond).



**Fig. 1. Localisation des parcelles d'échantillonnage dans les quatre communes d'étude de la Région Itasy**

### 2.2. Protocole d'échantillonnage de sol

Le protocole d'échantillonnage suivi a consisté en des prélèvements d'échantillons de sols à la tarière sur 3 profondeurs : 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm. Trois répétitions par parcelles ont été effectuées pour former un échantillon composite par profondeur. Ainsi, sur l'ensemble de l'étude, 2283 échantillons de sol ont été collectés.

### 2.3. Préparation des échantillons et analyses spectrales

Tous les échantillons collectés ont été séchés, tamisés à 2 mm pour enlever les éléments grossiers et inertes, et broyés à 0,2 mm. Ils ont été ensuite scannés dans le moyen infrarouge (MIR) entre 400 à 4000  $\text{cm}^{-1}$  avec un spectromètre portatif « The Agilent 4100 Exoscan FTIR » de résolution 8  $\text{cm}^{-1}$  collectant 64 scans par minute. Les spectres obtenus ont été enregistrés dans la région spectrale de 654,753 à 3999,23  $\text{cm}^{-1}$ . Un spectre de référence a été enregistré au début de chaque série d'acquisition spectrale et une fois toutes les heures. La matrice de données spectrales a ainsi été constituée de 2283 échantillons et de 901 variables correspondant aux nombres d'ondes, les valeurs mesurées étant l'absorbance.

Avec le logiciel The Unscrambler 10.3-CAMO, 944 échantillons, représentatifs (en termes d'allure et de variabilité des spectres) de l'ensemble des 2283 échantillons ont été sélectionnés pour l'analyse du COS au laboratoire tandis que 62 échantillons pour l'analyse granulométrique. Ces échantillons analysés ont servi à l'élaboration des modèles de prédiction. Les modèles de prédiction ont ensuite été appliqués au reste des échantillons non analysés au laboratoire.

### 2.4. Analyse du carbone organique et de la texture en laboratoire

Afin d'élaborer des modèles de prédiction du COS et de la texture du sol, une partie des échantillons ont été analysés au laboratoire par les méthodes d'analyse conventionnelle.

Pour le COS, la méthode Walkley et Black (1934) a été réalisée sur les 944 échantillons sélectionnés. La méthode Walkley et Black (1934) consiste à oxyder la matière organique sans chauffage externe par une solution sulfurique de bichromate de potassium ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) en excès. L'excès de bichromate de potassium est ensuite dosé par une solution de fer ferreux, le sel de Mohr. Ce dosage a été effectué à l'aide du titrateur Crison qui est muni d'une électrode redox permettant de détecter la différence de potentiel au sein de la solution à doser permettant de déterminer la quantité de sel de Mohr ayant réagi avec le bichromate en excès. La quantité de sel de Mohr versée dans la solution à doser permet de calculer la quantité de carbone organique présente dans le sol.

L'analyse granulométrique a été réalisée sur 62 échantillons par la méthode de « sédimentation et décantation successives ». Il s'agit d'un traitement à froid et à chaud par l'eau oxygénée pour la destruction de la matière organique. Puis, après tamisage, 5 fractions différentes ont été obtenues : argile (0-2  $\mu\text{m}$ ), limon fin (2-20  $\mu\text{m}$ ), limon grossier (20-50  $\mu\text{m}$ ), sable fin (50-200  $\mu\text{m}$ ) et sable grossier (200-2000  $\mu\text{m}$ ).

### 2.5. Prétraitements des données spectrales

Des prétraitements pour éliminer les effets des facteurs externes au sol durant les traitements de données spectrales ainsi que les bruits causés par la vibration des molécules d'eau ont été appliqués aux spectres bruts. Pour la prédiction du COS, le prétraitement SNV (standard normal variate) a été utilisé tandis que pour la prédiction de la texture, la première dérivation a été appliquée aux spectres.

### 2.6. Elaboration des modèles de prédiction

Un modèle par type de sol a été élaboré pour la prédiction du COS. Le premier modèle sur sols volcaniques a été établi sur 353 échantillons dont 265 ont constitué le lot de calibration et 88 le lot de validation. Pour les sols ferrallitiques, le modèle a été

réalisé sur 591 échantillons dont 445 ont constitué le lot de calibration et 146 le lot de validation.

La prédiction de la texture a été réalisée uniquement sur les sols ferrallitiques du fait que les sols volcaniques sont constitués par des éléments amorphes comme les allophanes et non de minéraux cristallisés (argile, quartz,...). Pour la prédiction du COS, les échantillons (944) ont été subdivisés en lot de calibration (75%) et de validation (25%); pour les modèles de prédiction de la texture, une validation croisée a été appliquée au regard du faible nombre d'échantillons analysés au laboratoire (62 échantillons).

La régression linéaire du moindre carré partiel (PLSR) a ensuite été utilisée pour modéliser les relations entre les absorbances du rayon infrarouge par les constituants du sol et les teneurs en carbone et les textures du sol obtenues des analyses au laboratoire. En effet, la PLSR combinée à la spectrométrie a été initiée par Haaland et Thomas (1988) pour la construction des modèles de prédiction.

Le logiciel statistique de traitement de données spectrales The Unscrambler 10.3-CAMO a été utilisé tout au long de cette étude.

### 2.7. Paramètres de performance d'évaluation des modèles

Afin d'évaluer la performance et la robustesse des modèles, des critères d'évaluation ont été utilisés à savoir :

- Le coefficient de détermination  $R^2$  qui est la mesure de la qualité du modèle. En effet,  $R^2$  exprime le degré de relation entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites. Cette valeur étant toujours entre 0 et 1, plus elle est proche de 1, plus la relation est dite parfaite.
- L'erreur standard de calibration (SEC) et celle de prédiction (SEP) expriment les erreurs de prédiction. Par conséquent, pour réduire l'incertitude sur la prédiction, SEP doit être réduite.
- Le RPD qui est le rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée dans le lot de calibration ou de validation et SEC ou SEP. Une valeur élevée du RPD indique un meilleur modèle (Chang *et al.*, 2001; Cozzolino et Moron, 2006).

## 3. Résultats

### 3.1. Caractéristiques des spectres moyens par type de sol

Deux principaux types de sols dominants à savoir les sols ferrallitiques et les sols volcaniques ont été identifiés dans la région Itasy et notamment des quatre communes d'étude. Les spectres moyens par type de sol sont présentés dans la figure 2.

Les sols ferrallitiques sont caractérisés par l'argile kaolinitique de type 1:1 et de formule  $[Si_2] Al_2O_5(OH)_4$

qui est exprimée par les bandes proches de 3694, 3655 et 3622  $cm^{-1}$  (Nguyen *et al.*, 1991). En effet, la région entre 3800 à 3600  $cm^{-1}$  peut être attribuée à la vibration d'élongation des groupes O-H des éléments minéraux du sol (Viscarra Rossel et Lark, 2009). La gibbsite de formule chimique  $Al(OH)_3$  présente des pics caractéristiques dans les zones proches de 3530, 3525 et 3450  $cm^{-1}$  (Nguyen *et al.*, 1991). Le quartz affiche des bandes caractéristiques dans la région de 2000 à 1600  $cm^{-1}$  (Viscarra Rossel et Lark, 2009). Les pics correspondant au quartz se situent autour de 2000, 1870 et 1790  $cm^{-1}$  issus de la vibration d'élongation des groupes Si-O-H (Nguyen *et al.*, 1991) (figure2, A).

Les sols volcaniques se différencient par la présence de l'halloysite, argile de type 1:1 de formule chimique  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  qui est observée à 3626  $cm^{-1}$ . La bande située à 3700  $cm^{-1}$  correspond également à la présence de ce minéral (Hidalgo *et al.*, 2010). Les sols volcaniques se différencient des ferrallitiques par la présence d'une bande unique à 1640  $cm^{-1}$  correspondant à de la silice amorphe. Cette bande est également caractéristique de la vibration due soit à l'élongation les groupes O-H soit à la vibration des groupes H-O-H des molécules d'eau adsorbées (Barois, 1998; Hidalgo *et al.*, 2010). On assiste à la présence de silicate d'aluminium amorphe hydraté correspondant aux allophanes (figure2, B).

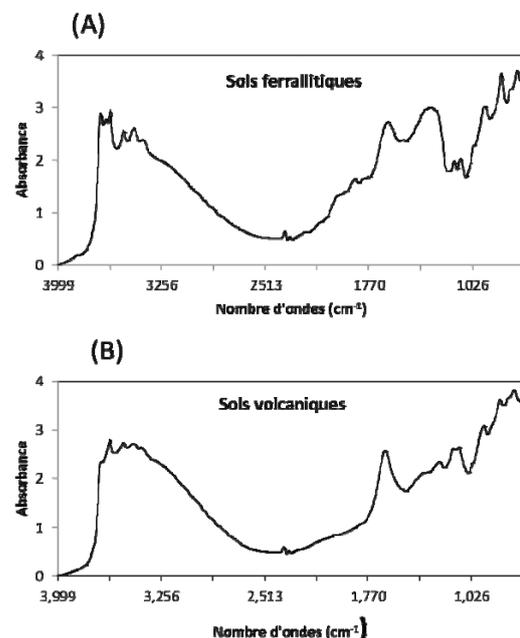


Fig. 2. Allure des spectres moyens des différents types de sol dominants de la zone d'étude

### 3.2. Statistique descriptive des résultats d'analyse au laboratoire

Les analyses au laboratoire des échantillons de référence ont montré une valeur moyenne du COS de l'ordre de 21  $gC.kg^{-1}$  de sol. L'écart-type moyen étant de 12  $gC.kg^{-1}$  de sol, exprime une variabilité

importante des teneurs en carbone des sols considérés dans la présente étude. Les résultats de l'analyse texturale ont montré un sol généralement riche en argile (tableau 1).

### 3.3. Calibration et validation des modèles de prédiction

Sur les sols volcaniques, les résultats de la prédiction du COS ont montré qu'avec le prétraitement SNV, le modèle obtenu présente de bonnes performances avec un  $R_c^2$  de 0,95 et un  $RPD_c$  de 4,31 en calibration et un  $R_v^2$  de 0,93 et  $RPD_v$  de 3,79 en validation. Pour

les sols ferrallitiques, les résultats de la prédiction du COS ont montré une performance acceptable avec un  $R_c^2$  de 0,9 et un  $RPD_c$  de 3,15 en calibration tandis qu'un  $R_v^2$  de 0,85 et  $RPD_v$  de 2,56 en validation ont été observés (tableau 2 et figure 3).

Une bonne performance des modèles de prédiction de la texture des sols a également été observée avec un  $R^2$  de calibration égale à 0,98 pour les argiles, argile+limons fins et sable. Les  $RPD$  étant tous supérieurs à 2 indiquent également la bonne performance de ces modèles (tableau 3).

Tab. 1. Résultats des analyses du COS et de la texture des sols

Analyses	Unités	n	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Ecart-type
COS	$g.kg^{-1}$	944	20,86	18,97	0,55	78,98	12,77
Argile	$g.100g^{-1}$	62	35,82	35,40	10,50	62,38	11,51
Argile + limon fin	$g.100g^{-1}$	62	55,06	57,73	20,12	79,05	13,24
Limon	$g.100g^{-1}$	62	24,83	23,64	10,07	44,24	7,56
Sable	$g.100g^{-1}$	62	26,41	25,50	5,83	55,10	10,29

Tab. 2. Performance des modèles de prédiction du COS en calibration et validation. SOC : soil organic carbon, SNV : standard normal variate,  $N_c$  : nombre d'échantillons en set de calibration,  $out_c$  : outliers de calibration, SEC : erreur standard de calibration,  $R_c^2$  : coefficient de détermination en set de calibration,  $RPD_c$  : rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée et du SEC,  $N_v$  : nombre d'échantillons en set de validation, SEP : erreur standard de prédiction,  $R_p^2$  : coefficient de détermination en set de validation,  $RPD_v$  : rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée et du SEP

Variables	Unités	Prétraitement	Type de sols	Calibration				Validation				
				$N_c$	$out_c$	SEC	$R_c^2$	$RPD_c$	$N_v$	SEP	$R_p^2$	$RPD_v$
SOC	$g.kg^{-1}$	SNV	Sols volcaniques	265	13	3,03	0,95	4,31	88	3,08	0,93	3,79
SOC	$g.kg^{-1}$	SNV	Sols ferrallitiques	445	44	2,67	0,90	3,15	146	3,65	0,85	2,56

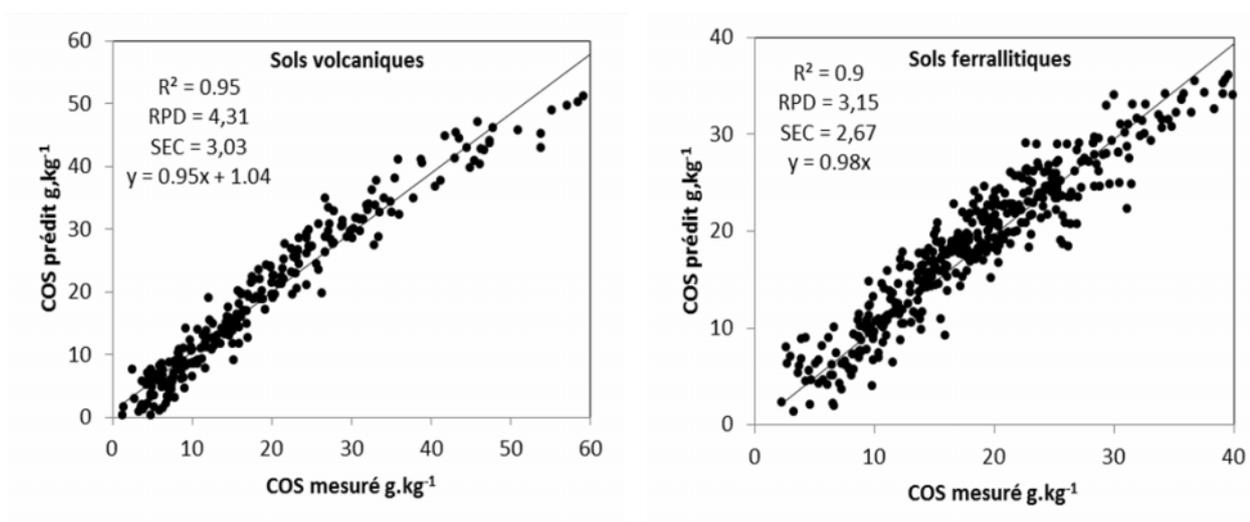


Fig. 3. COS mesuré vs prédit en calibration des modèles par type de sol

#### 4. Discussions

L'analyse qualitative des spectres moyens de chaque cluster s'est fortement appuyée sur des connaissances de base en pédologie et des résultats d'études antérieures, internationales et nationales, réalisées sur le domaine (Nguyen *et al.*, 1991 ; Madari *et al.*, 2006 ; Hidalgo *et al.*, 2010 ; Razafimahatratra, 2011). La connaissance de la dominance pédologique de la région Itasy par deux types de formation, ferrallitique et volcanique, a constitué une base essentielle à

l'analyse qualitative des spectres. De plus, une étude récemment publiée traitant des sols malgaches et la spectroscopie dans le moyen infrarouge (Razafimahatratra, 2011) a beaucoup aidée dans le traitement et l'analyse de données spectrales. Comme l'analyse qualitative des spectres s'est focalisée sur la minéralogie des sols, la spectrométrie dans le moyen infrarouge a été l'outil approprié pour l'identification des pics correspondant aux composants minéraux des sols.

**Tab.3. Performance des modèles de prédiction de la texture du sol en cross-validation.** *N* : nombre d'échantillons en cross-validation, *SEC* : erreur standard en cross-validation,  $R^2$  : coefficient de détermination, *RPD* : rapport entre l'écart-type de la valeur mesurée et du *SEC*

Variables	Unités	Prétraitement	Type de sol	Cross-validation			
				N	SEC	$R^2$	RPD
Argile	$g.100g^{-1}$	1 <sup>ère</sup> dérivée	Ferrallitique	62	1,67	0,98	6,89
Argile+LF	$g.100g^{-1}$	1 <sup>ère</sup> dérivée	Ferrallitique	62	1,43	0,99	9,26
Sable	$g.100g^{-1}$	1 <sup>ère</sup> dérivée	Ferrallitique	62	2,13	0,98	6,70

Les résultats ont montré en général une bonne prédiction de la teneur en carbone organique et de la texture du sol par la SMIR. Les valeurs élevées des RPD ont particulièrement indiqué une bonne performance des modèles élaborés. Chang *et al.* (2001) ont indiqué qu'un RPD>2 indique une bonne performance. Cozzolino et Moron (2006) ont même suggéré un RPD au moins égale à 3 pour une bonne performance des modèles.

Par ailleurs, nous avons pu constater que la prédiction du carbone organique du sol est nettement meilleure pour les sols volcaniques que pour les sols ferrallitiques ce qui peut s'expliquer en premier par la nature différente de la matière organique dans les deux types de sol. En effet, les sols volcaniques sont caractérisés par la présence de minéraux amorphes ou paracrystallins comme les allophanes ayant un effet protecteur vis-à-vis de la matière organique rendant la matière organique très stable (Chevallier *et al.*, 2007). Ce fait est supposé avoir un effet significatif sur la facilité de prédiction du carbone organique du sol dans les sols volcaniques par rapport aux sols ferrallitiques. Les sols ferrallitiques sont généralement des sols à texture argileuse. Il est reconnu que la teneur en argile d'un sol a une corrélation positive avec son stock de carbone (Feller *et al.*, 1991). Ainsi, puisque les sols ferrallitiques sont dominés par des argiles kaolinitiques à faible activité, il est supposé que la matière organique présente dans ces sols est moins stable par rapport à celle rencontrée dans les sols volcaniques.

Les résultats obtenus dans cette étude sont assez similaires aux résultats obtenus par Razafimahatratra (2011) pour la prédiction du carbone organique des

sols de Madagascar ( $R^2=0,83$  et  $PD=2,33$ ). En effet, les résultats d'étude publiés sur la prédiction du carbone organique du sol dans le moyen infrarouge et utilisant la régression PLS sont généralement bons. D'Acqui *et al.*, (2010) ont obtenu un  $R^2=0,95$  et  $RPD=4,4$  en régression PLS pour prédire le carbone organique des sols des îles de l'ouest de la Méditerranée. Cobo *et al.* (2010) ont obtenu d'excellents modèles avec un  $R^2$  variant de 0,96 à 0,98 et un RPD variant de 5 à 6,8 pour la prédiction du carbone organique du sol dans l'étude de la variabilité spatiale des sols au Zimbabwe.

#### 5. Conclusion

La spectrométrie en moyen infrarouge constitue une alternative aux techniques d'analyse de sol conventionnelle. Une seule acquisition spectrale suffit pour caractériser plusieurs éléments constituant du sol. Dans le cadre de cette étude, la SMIR nous a permis de prédire la teneur en carbone organique et la texture de différents types de sols sur un nombre considérable d'échantillons de sols prélevés dans la Région Itasy, ce qui a permis de réduire considérablement les coûts d'analyse. Les modèles élaborés dans le cadre de cette étude peuvent également être utilisés dans d'autres régions de Madagascar ayant les mêmes types de sols (ferrallitiques et volcaniques).

#### 6. Remerciements

La présente étude a été réalisée et financée dans le cadre du projet Mahavotra, « Agroécologie et foresterie paysanne en Itasy ». Nous adressons nos sincères remerciements à tous les partenaires du projet Mahavotra. Nous tenons également à remercier

l'International Foundation for Science (IFS) qui a octroyé un appui financier à ce travail.

## 7. Références citées

- Barois T., Dubroeuq D., Rojas P., Lavelle P., 1998. Andosol-forming process linked with soil fauna under the perennial grass *Mulhembergia macroura*. *Geoderma* 86, 241-260.
- Bellon-Maurel V., McBratney A., 2011. Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils - Critical review and research perspectives. *Soil Biology & Biochemistry* 43, 1398-1410.
- Brunet D., Barthès B.G., Chotte J.L., Feller C., 2007. Determination of carbon and nitrogen contents in Alfisols, Oxisols and Ultisols from Africa and Brazil using NIRS analysis: Effects of sample grinding and set heterogeneity. *Geoderma* 139, 106-117.
- Chang C.W., Laird D.A., Mausbach M.J., Hurburgh Jr C.R., 2001. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy—Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal* 65, 480-490.
- Chevallier T., Toucet-Louri J., Blanchart E., Woignier T., 2007. Minéralisation de la matière organique d'une gamme d'Andosol de la Martinique. Journées Nationales de l'Etude des Sols, 3-4-5 avril 2007, Angers.
- Cobo J.G., Dercon G., Yekeye T., Chapungu L., Kadzere C., Murwira A., Delve R., Cadisch G., 2010. Integration of mid-infrared spectroscopy and geostatistics in the assessment of soil spatial variability at landscape level. *Geoderma* 158(3-4), 398-411.
- Cozzolino D., Moron A., 2006. Potential of near-infrared reflectance spectroscopy and chemometrics to predict soil organic carbon fractions. *Soil & Tillage Research* 85, 78–85.
- D'Acqui L. P., Pucci A., Janik L.J., 2010. Soil properties prediction of western Mediterranean islands with similar climatic environments by means of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy. *European Journal of Soil Science* 61, 865–876.
- Feller C., Fritsch E., Poss R., Valentin C., 1991. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'ouest, en particulier). Cahier ORSTOM, Série Pédologique XXVI(1), 25-36.
- GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.
- Haaland D. M., Thomas V. T., 1988. Partial least-squares methods for spectral analyses. Relation to other quantitative calibration methods and the extraction of qualitative information. *Analytical Chemistry* 60, 1193-1202.
- Hidalgo C., Etchevers J.D., Martínez-Richa A., Yee-Madeira H., Calderon H. A., Vera-Graziano R., Matus F., 2010. Mineralogical characterization of the fine fraction (<2 µm) of degraded volcanic soils and tepetates in Mexico. *Applied Clay Science* 49, 348–358.
- Hidalgo C., Etchevers J.D., Martínez-Richa A., Yee-Madeira H., Calderon H. A., VeraGraziano R., Matus F., 2010. Mineralogical characterization of the fine fraction (<2 µm) of degraded volcanic soils and tepetates in Mexico. *Applied Clay Science* 49, 348-358.
- Jenkinson D. S., Adams D. E., Wild A., 1991. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming. *Nature* 351, 304 – 306.
- Madari B.E., Reeves J.B., Machado P.L.O.A., Guimarães C.M., Torres E., McCarty G.W., 2006. Mid- and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferralsols. *Geoderma* 136(1-2): 245-259.
- McBratney A.B., Minasny B., Viscarra Rossel R., 2006. Spectral soil analysis and inference systems: A powerful combination for solving the soil data crisis. *Geoderma* 136(1-2), 272-278.
- Nguyen T., Janik L.J., Raupach M., 1991. Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform (DRIFT) Spectroscopy in Soil Studies. *Australian Journal of Soil Research* 29, 49-67.
- Razafimahatratra H., 2011. Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen Infrarouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques.
- Reeves J.B., 2012. Mid-infrared spectral interpretation of soils: Is it practical or accurate? *Geoderma* 189-190, 508-513.
- Viscarra Rossel R.A. et Lark R.M., 2009. Improved analysis and modelling of soil diffuse reflectance spectra using wavelets. *European Journal of Soil Science* 60, 453-464.
- 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, 59-75.
- Walkley A. et Black I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37, 29-38.