

LA SPECTROMETRIE INFRAROUGE : UNE AIDE POUR LA CLASSIFICATION DES SOLS FERRALLITIQUES DE MADAGASCAR

Par

RAMAROSON Henintsoa Volaniaina¹, BECQUER Thierry², RAKOTONDRAZAFY
Amos Fety Michel³, RABEHARISOA Lilia^{3,4}

(1) Laboratoire des Radiosotopes (LRI), Université d'Antananarivo – Faculté des Sciences

(2) IRD, UMR Eco&Sols

(3) Laboratoire des Radiosotopes (LRI), Université d'Antananarivo

(4) Université d'Antananarivo – Faculté des Sciences

Résumé

La caractérisation des sols et leur classification pédologique sont importantes pour mieux gérer l'utilisation et la fertilité des sols. La détermination des propriétés physico-chimiques ou des constituants minéralogiques est souvent très coûteuse et prend du temps. La spectroscopie de réflectance proche infrarouge (SPIR) est une technique rapide pour évaluer les divers constituants minéraux et organiques du sol. L'objectif de ce travail est de vérifier si les techniques spectrales peuvent apporter une aide pour la classification des sols ferrallitiques de Madagascar. Nos résultats ont montré que la classification du sol par SPIR est assez similaire à celle obtenue à partir des observations pédologiques de terrain et des analyses au laboratoire. La spectrométrie infrarouge est un outil utile pour caractériser et classer les sols et, plus généralement pour gérer la fertilité des sols.

Mots clés : caractérisation des sols, propriétés physico-chimiques, constituants minéralogiques, SPIR, sols ferrallitiques.

Abstract:

INFRARED SPECTROMETRY: A TOOL FOR THE CLASSIFICATION OF FERRALLITIC SOILS IN MADAGASCAR

Soil characterization and soil classification are important for better management of soil use and soil fertility. Soil analysis using traditional methodologies is expensive and often time consuming. Near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) has been accepted as a fast method to evaluate various soil mineral and organic constituents. The objective of this study was to verify if the spectral techniques can help to the classification of the ferrallitic soils of Madagascar. Our results showed that the classification of soil by NIRS was quite similar to that obtained from field soil observations and laboratory analyzes. Therefore, the infrared spectrometry is a

useful tool for characterizing and classifying soils and, more generally, for managing soil fertility.

Keywords: Soil characterization, physicochemical properties, mineralogical constituents, SPIR, ferrallitic soils.

Fintina

FITILIANA NY TANY AMIN'NY ALALAN'NY SONIA AVELANY REHEFA AVY TARAFINA : ANJARA BIRIKY HO FANASOKAJIANA IREO KARAZANA NY TANY MENA ETO MADAGASIKARA

Ilaina fantarina ny karazan-tany sy ny toetrany mba hahafahana mampiasa azy tsara sy mandrindra ny fahalonahany. Matetika anefa dia mitaky fotoana sady lafo ny saran'ny fitiliana any amin'ny labôratoara an'ireo toetra fizika, simikan'ny tany ary ny famantarana ireo akorambato ao aminy. Ny fitarafana ny tany amin'ny alalan'ny jiro akaiky ny faritra mena tsy taza-maso (NIRS) dia teknika iray hahafahana manafaingana ny hijerena ny singa mineraly sy organika ao aminy. Ny tanjon'ny fikarohana dia ny hanamarinana an'io teknika io raha mety ny fampiasana azy amin'ny fanasokajiana ireo karazana tany mena eto Madagasikara. Ny vokatra azo dia nampiseho fa ny fitiliana ny tany amin'ny alalan'ny NIRS dia mitovy raha hoarina amin'ireo vokatra azo avy amin'ny teknika mahazatra. Ny NIRS dia teknika manampy amin'ny fanadihadihana ny toe-tany sy ny fisokajiana ireo karazany noho ny sonia avelan'ny tany azo avy amin'io fomba fitarafana io. Heverina fa hanampy amin'ny fitantanana ankapobeny ny fahalonanan'ny tany izany.

Teny Fototra: fanadihadihana ny tany, toetra fizika simika, akorambato mineraly, NIRS, tany mena.

1. Introduction

Le sol se forme sous l'influence de plusieurs facteurs tels que la roche mère, le climat, le temps, les organismes et la topographie, qui sont les facteurs de la pédogénèse selon Leveque (1975). La grande variabilité pédologique des sols résulte des interactions de ces divers facteurs, qui influencent la formation de différents profils [2]. La connaissance des caractéristiques pédologiques des sols, de leur mode de formation, de leurs caractéristiques minéralogiques est d'une grande importance. Ces caractéristiques ont des conséquences sur les propriétés physico-chimiques des sols, leurs potentialités nutritives et leurs fonctions biologiques. Dans le cas de Madagascar, où les sols peuvent être issus du socle cristallin, de formations sédimentaires ou de roches volcaniques [3], les effets de la roche mère dans des conditions climatiques diverses sur les caractéristiques des sols sont mal connus.

Les sols ferrallitiques représentent une superficie de 274 561 km², soit environ 46,5% de la surface de Madagascar [4]. Les principales classes de sols ferrallitiques sont, selon la classification internationale [5], des ferralsols, des cambisols et des nitisols. Ils sont formés en climat chaud et humide et évoluent par suite d'une altération intense des roches mères, les principales classes de roches mères étant des gneiss, des granito-gneiss, des granites, des roches d'altération, des roches carbonatées, des roches mafiques et des roches détritiques [6][7]. Selon l'intensité de l'altération et en fonction des processus d'érosion ou de rajeunissement qui affectent les sols, les caractéristiques pédologiques des sols varient, ce qui explique les trois classes de sols observées.

La distinction entre les diverses classes de sols est réalisée à partir d'observations de terrains, nécessitant l'implication d'un expert en pédologie, et à partir d'analyses de laboratoire permettant de caractériser les constituants minéralogiques et les propriétés physico-chimiques des sols. L'ensemble de ces observations et analyses sont longues et coûteuses. L'utilisation de techniques moins coûteuses, comme la Spectrométrie Moyen Infrarouge (SMIR) et Proche Infrarouge (SPIR), permettrait de multiplier les analyses des sols à réaliser. Ceci est particulièrement vrai pour les éléments minéraux des sols : les analyses minéralogiques nécessitent généralement l'utilisation d'équipements sophistiqués non disponibles dans la plupart des laboratoires d'analyses des sols. Une importante littérature scientifique récente montre l'intérêt et l'utilisation de ces techniques pour prédire les constituants minéraux, la matière organique ou les propriétés des sols [8][9][10][11][12].

L'objectif de ce travail est de vérifier si les techniques spectrales peuvent apporter une aide pour la classification des sols ferrallitiques de Madagascar. L'étude porte sur une large collection de sols ferrallitiques de Madagascar.

2. Méthodologie

2.1 Sites d'étude

Les zones d'étude ont été localisées dans différents sites à Madagascar, correspondant principalement au sol cristallin (Figure 1). Ces roches mères sont formées d'unités méta-sédimentaires précambriennes fortement métamorphisées

avec des intrusions de diverses roches granitiques, mafiques et mafiques-ultramafiques [13]. Le climat de l'île est subtropical, caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne de plus de 3 000 mm le long de la côte Est, à moins de 1 000 mm dans la région du Sud-Est et variant de 1 000 à 1 800 mm dans les Hautes Terres. La température annuelle moyenne dépend en grande partie de l'altitude, supérieure à 25 °C sur les côtes et inférieure à 20 °C dans les Hautes Terres.

Des échantillons de sol ont été prélevés sur 120 sites situés le long des routes principales (Figure 1). Ces 120 sites ont été prélevés en haut ou sur le tiers supérieur des collines. Les coordonnées géographiques de chaque site ont été mesurées avec un récepteur GPS (Global Positioning System).

Les sols étudiés ont été classifiés comme Ferralsols, Cambisols et Nitisols [5] et ont été classés comme sols ferrallitiques dans l'ancien système de classification français [14]. La sélection des sols était basée sur des observations de terrain, c'est-à-dire sur la présence d'un horizon ferrallitique, résultant d'une altération longue et intense.

Les sols étaient couverts de plantes herbacées naturelles avec quelques plantes ligneuses. Selon Bond et al. [15], le plateau central de Madagascar est dominé par des prairies et des savanes, avec, par exemple, *Aristida rufescens*, *Loudetia simplex*, *Trachypogon spicatus*, *Hyperthelia dissoluta*, *Ctenium concinnum*, tandis que l'ouest est dominé par des savanes herbacées représentées par des espèces comme *Heteropogon contortus*, *Hyparrhenia spp.*, *Loudetia spp.*, *Themeda quadrivalvis*. Ces zones sont utilisées par les agriculteurs pour le pâturage extensif.

2.2 Prélèvements et analyses des sols

La figure 1 présente les sites de prélèvement à l'échelle régionale. Les échantillons de sol utilisés ont été prélevés sur les 120 sites qui s'étendent depuis Antananarivo vers Ambatondrazaka (RN44), vers Tamatave à l'Est (RN2), au-delà de Fianarantsoa au Sud (RN7) et vers le Nord sur la route de Diégo-Suarez (RN6) (Figure 1). La distance entre les points de prélèvement est d'environ 20 km, décalée de 100 m des zones de perturbations (culture,...) ou des routes nationales. Les sols prélevés sont situés sur les zones de tanety. Pour chaque profil, 5 profondeurs ont été prélevées : 0-10, 10-20, 20-30, 50-60, 80-90 cm. Des échantillons composites des répétitions ont été préparés pour chaque profondeur prélevée. Ces échantillons ont été ensuite séchés à l'air libre durant quelques jours. Enfin, ils ont été tamisés à 2 mm puis broyés à 0,2 mm. Pour la présente étude, les 120 échantillons composites de l'horizon de surface (0-10 cm de profondeur) ont été utilisés.

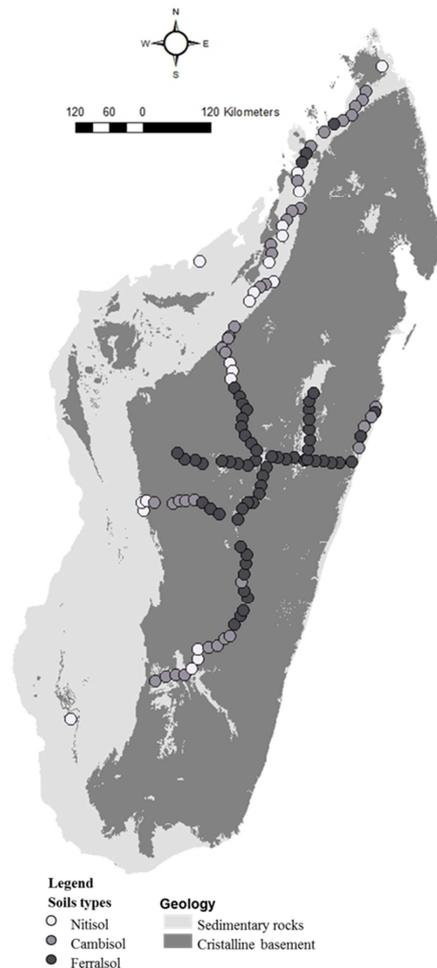


Figure 1. Présentation des sites de prélèvement sur l'ensemble des sols ferrallitiques de Madagascar à l'échelle régionale

Concernant les analyses des sols, des constituants minéraux, comme les oxydes de fer (Fe_2O_3), la kaolinite (Kt), la gibbsite (Gb), des teneurs de carbone total, la texture (sable) et des propriétés physico-chimiques, comme le pH_{eau} , la rétention de P (P_{rem}), ont été mesurés au laboratoire. Concernant les mesures des constituants minéralogiques, le Fe_2O_3 a été mesuré par la méthode de déferrification au citrate-bicarbonate-dithionite (CBD) [16]. La Kt et la Gb ont été obtenues par calcul à partir des teneurs de SiO_2 et Al_2O_3 obtenues lors d'une extraction avec de l'acide sulfurique [17][18][19]. Les calculs sont les suivants :

$$\text{Kt} = \text{SiO}_2_{\text{SA}} / \text{Kt}_{\text{SiO}_2} \quad (1)$$

où Kt est la concentration en kaolinite (g kg^{-1}), SiO_2_{SA} est la concentration de la SiO_2 obtenu à partir de l'attaque à l'acide sulfurique (g kg^{-1}), Kt_{SiO_2} est la proportion de SiO_2 dans la kaolinite qui est égal à 0,465.

$$\text{Gb} = [\text{Al}_2\text{O}_3_{\text{SA}} - \text{Al}_2\text{O}_3_{\text{CBD}} - (\text{Kt} \times \text{Kt}_{\text{Al}_2\text{O}_3})] / \text{Gb}_{\text{Al}_2\text{O}_3} \quad (2)$$

où Gb est la concentration de la gibbsite (g kg^{-1}), $\text{Al}_2\text{O}_3_{\text{SA}}$ est la concentration d' Al_2O_3 obtenue à partir de l'extrait de l'attaque à l'acide sulfurique (g kg^{-1}), $\text{Al}_2\text{O}_3_{\text{CBD}}$ est la concentration de l' Al_2O_3 obtenu à partir d'une extraction CBD, Kt est la

concentration de la kaolinite, $Kt_{Al_2O_3}$ est la proportion de l' Al_2O_3 dans la kaolinite, égal à 0,395 ; et $Gb_{Al_2O_3}$ est la proportion spécifique de l' Al_2O_3 dans la gibbsite, égal à 0,654. Les équations 1 et 2 sont calculées sans substitution dans la formule de la kaolinite et de la gibbsite.

La teneur en C total a été analysé à partir d'une combustion à sec des échantillons dans un modèle LECO CHN 600 (Leco Corp., St Joseph, MI, USA).

Concernant les mesures des propriétés physico-chimiques des sols, le pH_{eau} a été mesuré dans de l'eau distillée en utilisant un rapport sol/solution de 1 : 2,5 (rapport massique). Le P_{rem} a été déterminé après une addition unique de 60 mg de $P\ I^{-1}$ (sous forme de KH_2PO_4) dans du $CaCl_2$ 0,01 M ajouté à un rapport sol / solution 1 : 10 [20]. Le sable a été déterminé à partir d'une analyse de la fraction granulométrique en utilisant la pipette pour le prélèvement après la dispersion des extraits avec du NaOH 1 M.

2.3 Analyses spectrales des sols

Les spectres des 120 sols ont été analysés dans la région du proche infrarouge de 1100 – 2498 nm. Ils sont mesurés avec un spectrophotomètre Foss NIRSystems 5000 (Silver Spring, MD, USA). Les échantillons sont des particules très fines avec une dimension < 200 μm . Ils sont mis dans une cuve en quartz de 5 cm de diamètre, qui est placée dans le spectromètre pour être scannée entre une longueur d'onde de 1100 à 2498 nm avec une résolution de 2 nm. Chaque spectre, calculé en moyenne à partir de 15 spectres, a été enregistré comme le logarithme de l'inverse de la réflectance ($\log[1/R]$). Les données spectrales sont récupérées à partir du logiciel Winisi 1.63.

2.4 Analyses statistiques

Les traitements statistiques sont réalisés à partir du logiciel statistique libre R version 3.2.3 [21]. Tout d'abord, des ACP ont été établis pour vérifier si les analyses spectrales permettent de distinguer des groupes de sols et de les comparer à partir d'une classification du groupe de sol issu des variables mesurées. Ces ACP correspondent à une méthode d'analyse des données numériques quantitatives visant à former des groupes homogènes (clusters), en fonction des types de sol. Enfin, une autre ACP avec une représentation des ellipses a été établi pour vérifier si l'utilisation des données spectrales permet de classer les sols en fonction des types de sol obtenus à partir des observations de terrain et des analyses physico-chimiques.

3. Résultats

3.1 Comparaison de la classification des sols basée sur des données analytiques et spectrales

La Figure 2 montre la répartition des sols en fonction des types de sol (Ferralsols, Cambisols, Nitisols). Les clusters obtenus à partir des données spectrales pour les variables qualitatives les plus représentatives (Figure 2 II) sont comparées à ceux obtenus à partir des données analysées au laboratoire (Figure 2 I). On constate que les deux types d'analyses (spectrales, chimiques) donnent des clusters très

similaires. Ceci justifie que l'on puisse traiter les sols soit à partir des données spectrales soit à partir des variables analytiques des échantillons.

Les trois groupes de sol forment des clusters assez bien distincts : de gauche à droite, selon l'axe PC3, on distingue les Ferralsols (Fer), qui sont bien différenciés d'un second cluster qui regroupe les Cambisols (Cam) et les Nitisols (Nit). Ces groupes distinguent les sols les plus altérés (Ferralsols) de ceux qui sont moins altérés (Cambisols et Nitisols). Ces deux derniers groupes (Cam et Nit) ne se distinguent pas à partir des analyses spectrales ou physico-chimiques.

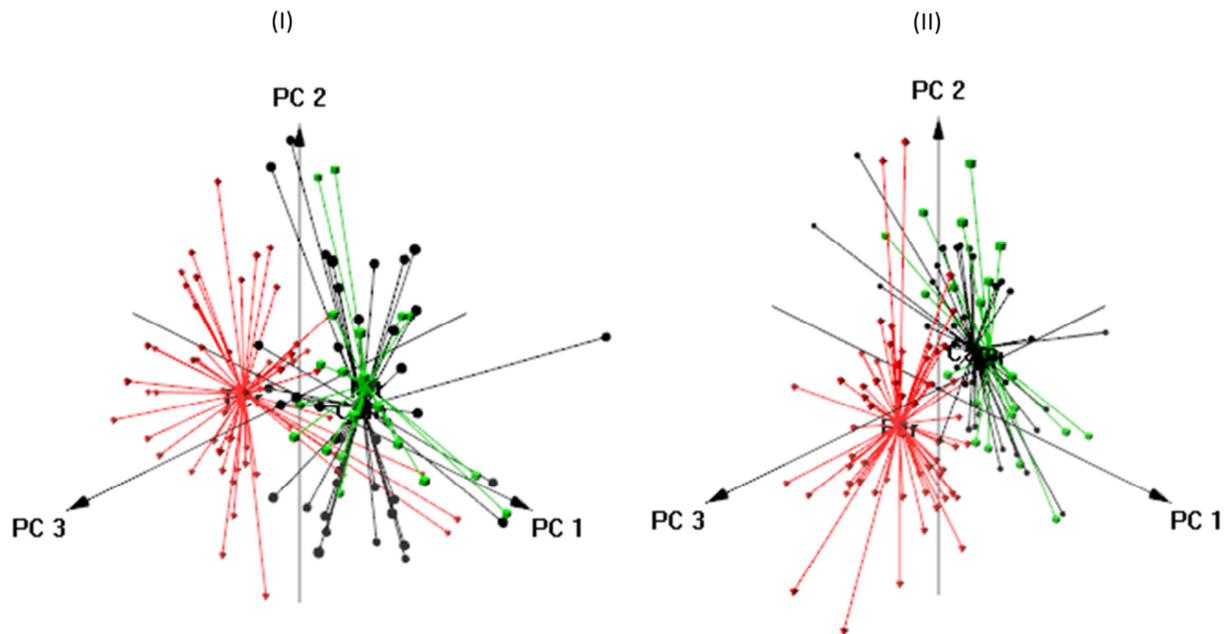


Figure 2. Classification des sols en fonction des types de sols à partir des données analysées au laboratoire (I) et des données spectrales (II). Type des sols : F = Ferralsol ; C = Cambisol ; N = Nitisol).

3.2 Utilisation des données spectrales pour la classification des sols

La Figure 3 montre la répartition des sols en fonction des types de sol (Ferralsols, Cambisols, Nitisols) à partir des données spectrales. Seules les projections des points de l'ACP en fonction des axes 1 et 2 sont présentées. On constate que la majorité des sols classés dans un groupe de sol à partir des observations pédologiques de terrain présentent des caractéristiques spectrales qui les rapprochent de ce groupe de sol (Figure 3). Néanmoins, quelques sols classés dans un groupe de sol à partir des observations pédologiques présentent des caractéristiques spectrales intermédiaires entre les deux groupes de sols ou bien qui les rapprochent de l'autre groupe de sol (Figure 3). En effet, 47 des 61 échantillons de sols classés comme Ferralsols à partir des observations pédologiques correspondant uniquement au cluster des Ferralsols sont bien classés comme des Ferralsols (77%). De même, 46 des 59 échantillons de sols correspondant uniquement au cluster des Cambisols_Nitisols sont bien classés comme des

Cambisols ou des Nitisols (78%). Néanmoins, 8 échantillons de sols (13%) classés comme des Ferralsols et 11 échantillons de sols (19%) classés comme des Cambisols ou des Nitisols se trouvent à l'intersection des deux clusters, ce qui rendrait leur classification sur des critères spectraux assez difficile. Enfin, 6 échantillons de sols (10%) classés comme des Ferralsols se trouvent dans la partie des Cambisols ou des Nitisols, et, 2 échantillons de sols (3%) classés comme des Cambisols ou des Nitisols se trouvent dans la partie des Ferralsols, sont mal classés par les spectres et entraînant leur positionnement dans un mauvais groupe .

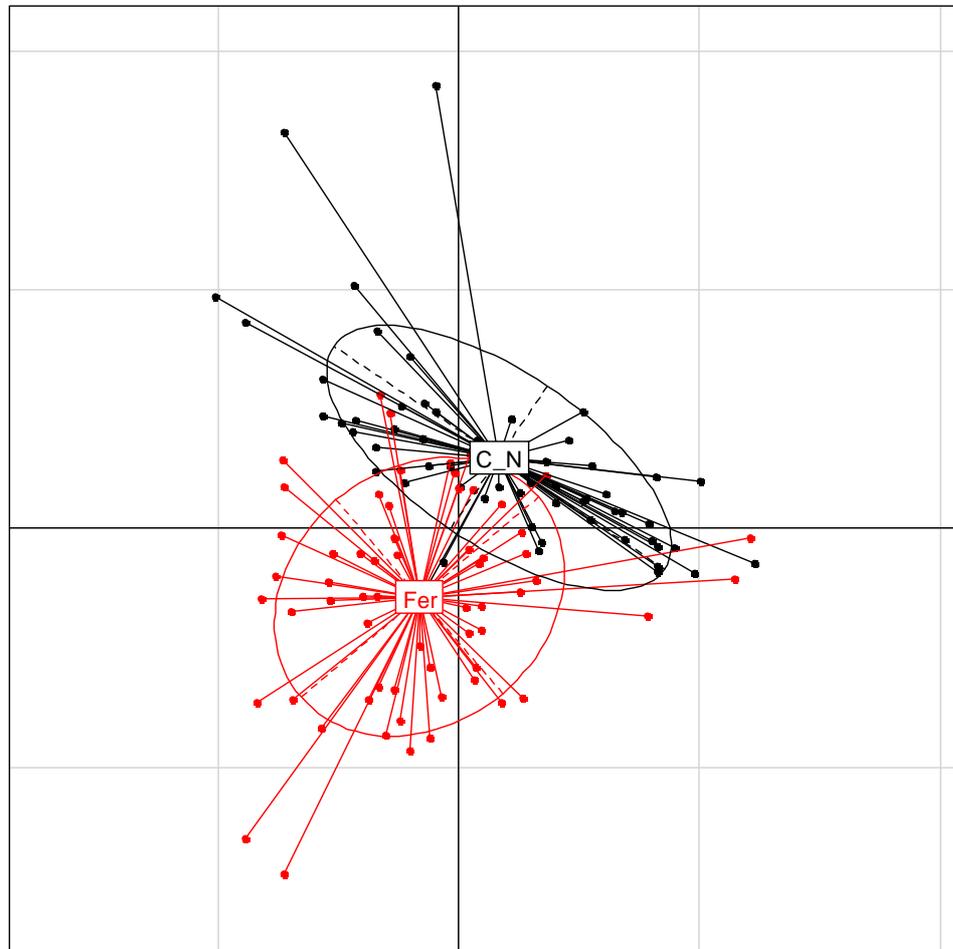


Figure 3. Utilisation des données spectrales pour la classification des sols en fonction des types de sols. Type des sols : Fer = Ferralsol ; Cam = Cambisol ; Nit = Nitisol).

4. Discussions

4.1 Classification de clusters de sols

Les sols sont le résultat d'une altération chimique poussée de la roche mère, qui, lorsqu'elle est très poussée, se traduit par une dissolution de tous les minéraux et la lixiviation profonde de la plupart des éléments (silice, cations basiques, etc.) sauf du fer et de l'aluminium [7]. Cette altération poussée se traduit par la présence dominante d'oxydes de fer (goethite, hématite) et d'aluminium (gibbsite), alors qu'une altération plus modérée se traduit par la néoformation de kaolinite en quantité plus

importante. Les variations des constituants minéralogiques dans le sol peuvent expliquer les différents types de sol ferrallitiques se formant sur les diverses roches mères soumises à diverses conditions pédo-climatiques. La figure 2 met bien en évidence la distinction entre deux clusters regroupant les sols : un groupe correspondant aux Ferralsols, riches en gibbsite, et un autre groupe correspondant principalement aux Cambisols et Nitisols, plus riches en kaolinite.

Ségalen et Brion [22] montrent que l'on peut avoir deux types d'altération dans les sols tropicaux suivant le comportement du silicium et de l'aluminium libéré par l'hydrolyse des minéraux primaires des roches (quartz, feldspaths, micas, etc). La première est la monosiallisation, où la kaolinite et le fer migrent séparément à une altitude faible, une température élevée et une pluviométrie moyenne annuelle < 1500 mm, pour former des sols ferrugineux tropicaux [22]. Ces sols sont caractérisés par un rapport silice/alumine élevée, correspondant à une forte dominance de la kaolinite [23]. Les cambisols et les nitisols (Figure 2, I) ont les mêmes caractéristiques typiques que ces sols ferrugineux (selon la classification [14]). Ils sont caractérisés par une forte concentration en kaolinite (327 g kg^{-1}) et sont riches en sable (497 g kg^{-1}). La seconde altération est l'allitisation où les oxydes et hydroxydes de Fe et d'Al se trouvent en forte concentration dans les sols tropicaux à une altitude élevée, une température plus faible et une pluviométrie moyenne annuelle > 1500 mm, pour former des Ferralsols [22]. Ces sols sont caractérisés par un rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 2$ où la kaolinite est moins abondante [23]. Nos résultats sont conformes aux propositions de Ségalen et Brion [22].

La comparaison de la classification des sols basés sur des données analytiques et spectrales donnent des clusters très similaires. Les groupes distinguent les sols les plus altérés (Ferralsols) de ceux qui sont moins altérés (Cambisols et Nitisols). Ces deux derniers groupes (Cambisol et Nisol) ne se distinguent pas à partir des analyses spectrales ou physico-chimiques. La figure 2 justifie alors que l'on puisse traiter les sols soit à partir des données spectrales soit à partir des variables analytiques des échantillons. Par ailleurs, il est à noter que quelques sols classés dans un groupe de sol à partir des observations pédologiques de terrain présentent des caractéristiques spectrales qui les rapprochent de l'autre groupe de sol et qui les rendrait leur classification sur des critères spectraux assez difficile (Figure 3). C'est le cas des 19 échantillons qui se trouvent uniquement à l'intersection des deux clusters et des 8 échantillons qui sont mal classés à partir des spectres. On peut dire alors que 93 échantillons par rapport aux 120 échantillons (78%) sont bien classés à partir des données spectrales. Ceci nous permet de dire que les techniques spectrales peuvent apporter une aide très efficace pour la classification des sols ferrallitiques de Madagascar.

5. Conclusion

La classification des sols en fonction des types de sol a montré une bonne distinction de deux types de sol : les Ferralsols, d'une part ; les Cambisols et les Nitisols, d'autre part. Ces deux types de sols sont affectés à partir de leurs constituants minéralogiques, en lien avec la pluviométrie, la température et l'altitude.

L'étude nous a permis de (i) faire une comparaison de la classification des sols basés à partir des données analytiques et des données spectrales. Les résultats ont montré que les deux types d'analyses (spectrales, chimiques) donnent des clusters très similaires. Ceci justifie que l'on puisse traiter les sols soit à partir des données

spectrales soit à partir des variables analytiques des échantillons ; (ii) d'utiliser des données spectrales pour la classification des sols. Les résultats ont montré que 93 échantillons sont bien classés à partir des spectres par rapport aux 120 échantillons totaux (78%).

Ainsi, on peut conclure qu'on a atteint l'objectif principal de ce travail qui est « de vérifier si les techniques spectrales peuvent apporter une aide pour la classification des sols ferrallitiques de Madagascar ». Par ailleurs, il est toujours difficile à distinguer les Cambisols des Nitisol à partir des données des spectres ou des données analytiques.

6. Références bibliographiques

- 1 Leveque, A., 1975 - Pédogenèse sur le socle granito-gneissique du Togo. Différenciation des sols et remaniements superficiels. Thèse Doctorat. Strasbourg, 301 p.
- 2 Baptista, G.M.M., Corrêa, R.S., Dos Santos, P.F., 2011. Use of imaging spectroscopy for mapping and quantifying the weathering degree of tropical soils in Central Brazil. *Applied and Environmental Soil Science*, volume 2011, 7 p.
- 3 Ministère de l'Environnement et des Forêts, 2012. Rapport sur l'Etat de l'Environnement à Madagascar. p 102-129.
- 4 Razafimahatratra, H.M., 2011. Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen infrarouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, 200 p.
- 5 IUSS, 2014. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. FAO. 203 p.
- 6 Tucker, R. D., Peters, S. G., Roig, J. Y., Théveniaut, H., & Delor, C. (2012). Notice explicative des cartes géologique et métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1,000,000. *Ministère des Mines, PGRM, Antananarivo, République de Madagascar*.
- 7 Andriamasy, H.L., 2015. Relation entre les caractéristiques pédologiques des sols ferrallitiques de Madagascar et leurs propriétés d'échange. Mémoire en vue d'obtention du diplôme de DEA, Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences. 102 p.
- 8 Cécillon, L., Barthès, B.G., Gomez, C., Ertlen, D., Genot, V., Hedde, M., Stevens, A., Brun, J.J., 2009. Assessment and monitoring of soil quality using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Eur. J. Soil Sci.* 60, 770–784.
- 9 Nocita, M., Stevens, A., Van Wesemael, B., Aitkenhead, M., Bachmann, M., Barthès, B., Ben Dor, E., Brown, D.J., Clairotte, M., Csorba, A., Dardenne, P., Demattê, J. A. M., Genot, V., Guerrero, C., Knadel, M., Montanarella, L., Noon, C., Ramirez-Lopez, L., Robertson, J., Sakai, H., Soriano-Disla, J.M., Shepherd, K.D., Stenberg, B., Towett, E.K., Vargas, R., Wetterlind, J., 2015. Soil spectroscopy: an alternative to wet chemistry for soil monitoring. *Adv. Agron.* 132, 139–159.
- 10 Shepherd, K.D., Walsh, M.G., 2002. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 988.
- 11 Soriano-Disla, J.M., Janik, L.J., Viscarra Rossel, R.A., MacDonald, L.M., McLaughlin, M.J., 2014. The performance of visible, near-, and mid-infrared reflectance spectroscopy for prediction of soil physical, chemical, and biological properties. *Appl. Spectrosc. Rev.* 49, 139–186.

- 12 Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., Skjemstad, J.O., 2006b. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* 131, 59–75.
- 13 Collins, A.S., Windley, B.F., 2002. The tectonic evolution of central and northern Madagascar and its place in the final assembly of Gondwana. *J. Geol.* 110, 335-340.
- 14 CPCS, 1967. Classification des sols. Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols, ENSA, Grignon.
- 15 Bond, W.J., Silander, J.A., Ranaivonasy, J., Ratsirarson, J., 2008. The antiquity of Madagascar's grasslands and the rise of C4 grassy biomes. *J. Biogeogr.* 35, 1743–1758.
- 16 Mehra, O.P., Jackson, M., 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Min.* 7, 317–327.
- 17 Reatto, A., Bruand, A., Martins, E.S., Muller, F., Silva, E.M., Carvalho, O.A., Brossard, M., 2008. Variation of the kaolinite and gibbsite content at regional and local scale in Latosols of the Brazilian Central Plateau. *C. R. Geosci.* 340, 741–748.
- 18 Vendrame, P.R.S., Marchão, R.L., Brunet, D., Becquer, T., 2012. The potential of NIR spectroscopy to predict soil texture and mineralogy in Cerrado Latosols. *Eur. J. Soil Sci.* 63, 743–753.
- 19 Ramarason, H.V., Becquer, T., Oliveira, S.O., Razafimahatratra, H., Delarivière, J.L., Blavet, D., Vendrame, P.R.S., Rabeharisoa, L., Rakotondrazafy, A.F.M., 2016. Mineralogical analysis of ferralitic soils in Madagascar using NIR spectroscopy Université d'Antananarivo, Département des Sciences de la Terre, BP 906, 101 Antananarivo, Madagascar. Université d'Antananarivo, Laboratoire des Radiosotopes, BP.UMR Eco&Sols. Article soumis à *Geoderma*. 36 p.
- 20 Alvarez V, Novais, V. H., Dias, R.F. de, Oliveira, J. D., 2000. Determinação e uso do fósforo remanescente. *B. Inf. SBCS*, 25(1), 27-32.
- 21 R Core Team, 2015. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- 22 Philippon, O., 2015. Climat, altération et diversité mondiale des sols. Une présentation organisée par SupAgro Montpellier et l'Institut des Régions Chaudes. 36p.
- 23 Ségalen, P., Brion, J.C., 1981. Pédochimie : Les constituants minéraux des roches et des sols. ORSTOM. Services scientifiques centraux. 1184 p.

Actes dans des congrès internationaux

Diogo Néia Eberhardt; Robélio Leandro Marchão; Hervé Quiquampoix; Christine Le Guernevé; Volaniaina Henintsoa Ramaroson; Takashi Muraoka; Luiz Francisco da Silva Souza Filho; Thierry Becquer, 2012. Characterization of Organic Phosphorus in Conservation Agriculture Systems by ³¹P Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. FERTBIO 2012 publishing. 4 p.

Ramaroson H.V., Rajaonarison N., Brunet D., Razakavololona A, Andriamalaza S , Rakotondrazafy A.F.M., Razafimbelo T., Rabeharisoa L., Marchão R.L., Becquer T. The potential of NIR and MIR spectroscopy to predict soil physical and chemical properties for uplands of the central Madagascar. ICNIRS 2013 - 16th International Conference on Near Infrared Spectroscopy 2-7 june 2013, Convention Center, la Grande-Motte, France. Copyright IRSTEA - France. p. 8.

Ramaroson H.V., Marchão R.L., Vendrame P.R.S., Razafimahatratra H., Fanjaniaina M.L. , Andriamalaza S., Rakotondrazafy A.F.M., Razafimbelo T., Rabeharisoa L. and Becquer T. The potential of NIR and MIR spectroscopy to predict the P retention capacity of Malagasy and Brasilan uplands soils. The proceedings of the II Iberoamerican conference on beneficial plant-microorganism-environment interactions (IBEMPA), Espain. Microorganisms for Future Agriculture. From 2nd to 6th September, 2013. p. 2.

Ramaroson H.V., Brito O.R., Marchão R.L., Vendrame P.R.S., Rabeharisoa L., Becquer T. Potencial da Espectroscopia NIR na Predição da Retenção de Fósforo em Solos Tropicais. XXXIV Congresso Brasileiro De Ciencia Do Solo. 28 de julho a 2 de agosto de 2013. Brasil, Costao do Santinho Resort. Florianopolis SC.p. 4.

Ramaroson Henintsoa Volaniaina., Razafimahatratra H., Larvy Delarivière Jean^{2,4} , Razafimbelo Tantely² , Rakotondrazafy Amos Fety Michel¹, Becquer Thierry². The potential of NIR and MIR spectroscopy to predict carbon and mineral contents of upland soils of central Madagascar for characterization of soil fertility. Internationale Conference – Agroecology and sustainability of Tropical Rainfed Cropping Systems for Africa – AfA 2014. November 03 – 07, 2014 – Antananarivo - Madagascar. p. 4.

Communications et posters dans des congrès internationaux

Ramaroson H.V., Rajaonarison N., Brunet D., Razakavololona A, Andriamalaza S , Rakotondrazafy A.F.M., Razafimbelo T., Rabeharisoa L., Marchão R.L., Becquer T. The potential of NIR and MIR spectroscopy to predict soil physical and chemical properties for uplands of the central Madagascar. ICNIRS 2013 - 16th International Conference on Near Infrared Spectroscopy 2-7 June 2013, Convention Center, la Grande-Motte, France. (Poster)

Ramaroson H.V., Marchão R.L., Vendrame P.R.S., Razafimahatratra H., Fanjaniaina M.L. , Andriamalaza S., Rakotondrazafy A.F.M., Razafimbelo T., Rabeharisoa L. and Becquer T. The potential of NIR and MIR spectroscopy to predict the P retention capacity of Malagasy and Brazilian uplands soils. The proceedings of the II Iberoamerican conference on beneficial plant-microorganism-environment interactions (IBEMPA), Spain. Microorganisms for Future Agriculture. From 2nd to 6th September, 2013. (Poster)

Ramaroson H.V., Brito O.R., Marchão R.L., Vendrame P.R.S., Rabeharisoa L., Becquer T. Potencial da Espectroscopia NIR na Predição da Retenção de Fósforo em Solos Tropicais. XXXIV Congresso Brasileiro De Ciencia Do Solo. 28 de julho a 2 de agosto de 2013. Costao do Santinho Resort, Brasil. Florianopolis SC. (Poster)

Ramaroson Henintsoa Volaniaina., Razafimahatratra H., Larvy Delarivière Jean^{2,4} , Razafimbelo Tantely² , Rakotondrazafy Amos Fety Michel¹, Becquer Thierry². The potential of NIR and MIR spectroscopy to predict carbon and mineral contents of upland soils of central Madagascar for characterization of soil fertility. Internationale Conference – Agroecology and sustainability of Tropical Rainfed Cropping Systems for Africa – AfA 2014. November 03 – 07, 2014 – Antananarivo - Madagascar. (Orale)

Ramaroson H.V., Sá S.O., Razafimahatratra H., Larvy Delarivière J., Deleporte P., Rakotondrazafy A.F.M., Razafimbelo T. Becquer T. (2015) Use of NIR spectroscopy as a tool to predict P availability of highly weathered uplands soils of Madagascar. Colloque “Ecological Services of Legumes in Agro-Ecosystems” (ECOLEG), 24-28 août 2015, Montpellier, France. (Orale)