

## **SPECTROMETRIE INFRAROUGE : OUTIL ALTERNATIF POUR CARACTERISER LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DU TANETY**

**Razakavololona A.<sup>1,2</sup>, Ramaroson H. V.<sup>1,5</sup>, T. Becquer<sup>3</sup>, N. Rabetokotany-Rarivoson<sup>4,5</sup>**

<sup>1</sup>Ecole Normale Supérieure, Université d'Antananarivo, complexe scolaire Ampefiloha, BP 881-101 Antananarivo

<sup>2</sup>Ecole Doctorale Problématique de l'Education et Didactique des Disciplines (PE2Di) - Ecole Normale Supérieure, Université d'Antananarivo, complexe scolaire Ampefiloha, BP 881-101 Antananarivo

<sup>3</sup>Institut de Recherche pour le Développement, UMR Eco&Sols, 2 Place de Viala 34000 Montpellier

<sup>4</sup>Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo, BP 1500-101 Antananarivo

<sup>5</sup>Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, Université d'Antananarivo, BP 1500, 101 Antananarivo

Auteur correspondant : RAMAROSON Henintsoa Volaniaina

Email : [volaniainah.ramaroson@gmail.com](mailto:volaniainah.ramaroson@gmail.com)

Téléphone : +261 34 86 009 58

### **Résumé**

Les rendements des cultures restent encore faibles dans les régions tropicales. Les ressources nutritives pour les plantes sont très limitées dans les sols ferrallitiques, notamment le phosphore (P). Les déficiences en phosphore sont dues à la capacité de rétention des phosphates par les sesquioxydes de fer et d'aluminium. Ce problème est important à Madagascar, dans un contexte de croissance démographique forte et où le secteur agricole concerne près de 80% de la population active. L'enjeu de notre étude est de présenter au secteur agricole l'intérêt de la spectrométrie infrarouge comme outil de caractérisation des ressources en sols des agro-écosystèmes des Hautes Terres de Madagascar, notamment les

propriétés affectant la disponibilité du phosphore. Un prélèvement d'échantillons de sol (120 points ; 600 échantillons) a été réalisé à l'échelle régionale (un point tous les 20 km environ, le long des axes routiers principaux). Ces échantillons ont été analysés par des méthodes physico-chimiques et minéralogiques conventionnelle du sol et par des analyses spectrales proche (NIRS) et moyen infrarouge (MIRS). Des zones spectrales spécifiques de certains minéraux, la kaolinite et la gibbsite, ont été étudiées à partir de la hauteur des pics spécifiques. Nos résultats ont montré les grandes potentialités du NIRS et du MIRS dans la prédiction des teneurs des constituants minéralogiques du sol et des propriétés physico-chimiques du sol. Des modèles de prédiction de la kaolinite et de la gibbsite à partir de l'analyse de leurs pics spécifiques NIRS ont été proposés.

**Mots clés :** Aluminium, Constituants minéralogiques, Disponibilité du P, MIRS, NIRS, Physico-chimique, Prédiction, Sesquioxydes de fer.

## Abstract

Crop yields remain low in tropical regions. Nutrient resources for plants are very limited in ferrallitic soils, particularly phosphorus (P). The lack of this element in the ferrallitic soil is due to its high sorption by iron and aluminium sesquioxides. This issue is important for Madagascar in case of the overpopulation and where the agricultural sector concerns nearly 80% of the active population. That is why, the objective of this study is to present the interest of infrared spectrometry as a tool for characterizing soil resources in agro-ecosystems in the Highlands of Madagascar, particularly the properties affecting phosphorus availability. Therefore, 600 samples were taken along the national road of the Highlands of Madagascar with depths of 0-10, 10-20, 20-30, 50-60 and 80-90 cm ; of which 148 samples were selected representatively from their spectrum. These samples were analyzed by conventional method for physicochemical and mineralogical analyzes. The predictions were based on two types of methods, chemometric methods using multivariate calibration models from partial least squares (PLS) regressions, and the use of spectral signatures of specific minerals. Our results showed the great potential of NIRS and MIRS in predicting the content of soils mineralogical constituents and physico-chemical properties of the soil. Prediction models of kaolinite and gibbsite from the analysis of their specific NIRS were proposed.

**Key words :** tropical region, phosphorus, iron sesquioxides, aluminium sesquioxides, infrared spectrometry, physicochemical, mineralogical, spectral signatures, specific minerals.

## 1. INTRODUCTION

A Madagascar, la malnutrition touche encore 76% de la population avec une grande prévalence dans les milieux ruraux alors que les terres arables ne représentent qu'environ 20% de la superficie du pays. Face à la pression démographique et la paupérisation sévissant dans le pays, la production sur les sols de bas-fond n'arrive plus à couvrir les besoins alimentaires de la population.

La valorisation des *tanety* peu exploités qui représentent la majeure partie des terrains potentiellement cultivables dans les hautes terres est actuellement une des meilleures alternatives pour sécuriser l'alimentation de la population.

Or ces *tanety* sont connus pour avoir des sols acides, riches en oxyde et hydroxyde de fer (Fe) et aluminium (Al), à faible teneur en matière organique, entraînant à une forte sorption de P sur le sol (Ramaroson, 2017 ; Ramaroson et al., 2018 ; Ramaroson et a., 2023). Les formes minérales du phosphore sont associées aux minéraux argileux, comme la kaolinite, et plus particulièrement aux oxydes et hydroxydes de Fe (goethite et hématite) et Al (gibbsite), ce qui réduit fortement leur disponibilité, limitant ainsi fortement la production agricole (Ramaroson, 2017 ; Ramaroson et al., 2018 ; Ramaroson et al., 2023). Or, pour pouvoir augmenter la production agricole sur les *tanety*, il est impératif d'augmenter la disponibilité du phosphore (Rabeharisoa et al., 2012).

Historiquement notre compréhension des propriétés du sol a été acquise grâce à des analyses en laboratoire. Toutefois, ces déterminations nécessitent du temps et coûtent cher. Il a été montré que les techniques de spectrométrie par réflectance, des méthodes rapides et non destructives pour évaluer les propriétés des sols, pouvaient être considérées comme des alternatives possibles pour remplacer les méthodes classiques de laboratoire (Janik et al., 1998).

Depuis quelques années, la spectrométrie infrarouge a été largement utilisée pour la prédiction des teneurs en carbone organique du sol, en relation notamment avec des mesures de la séquestration du C (Viscarra Rossel et al., 2006 ; Cécillon et al., 2009). De nombreuses études ont permis de montrer que cette technique permettait de faire des prédictions précises des teneurs totales de C et N des sols. Diverses autres propriétés chimiques des sols ont été prédites correctement dans diverses conditions. Ceci est en partie lié au fait que ces propriétés sont en partie corrélées avec les teneurs en matière organique des sols (Malley et al., 2004). Des travaux récents ont également montrés des résultats prometteurs pour caractériser la texture, notamment les teneurs en argile, ou la minéralogie des sols. Les résultats de notre recherche sont également très prometteurs pour la prédiction des minéraux argileux (kaolinite Kt et gibbsite Gb) (Ramaroson et al., 2018) et la sorption du phosphore à partir de ces constituants (Ramaroson et al., 2023).

L'objectif principal de cette présentation est de montrer que l'utilisation de la spectrométrie infrarouge est un outil pour l'étude des sols ferrallitiques du pays et, plus généralement, qu'elle pourrait servir d'outil pour l'étude des sols dans les formations universitaires.

De ce fait, l'intérêt de cette étude est de proposer l'utilisation d'un outil innovant dans l'enseignement-apprentissage au niveau universitaire. C'est une opportunité pour nous de faire connaître aux chercheurs, étudiants et autres acteurs, les intérêts et les avantages de cet outil. Ceci entre dans le sous-thème 4 de ce colloque, portant le titre : le développement, l'agro-alimentaire, l'élevage et l'agriculture.

## 2. MATERIELS ET METHODES

### 2.1. Echantillonnage

La figure 1 présente les sites de prélèvement de sols à l'échelle régionale. Les échantillons de sol utilisés ont été prélevés sur 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. 600 échantillons ont été collectés et parmi ces échantillons, 148 échantillons ont été sélectionnés selon la représentativité spectrale et ont été analysés pour la caractérisation des propriétés physico-chimiques et des constituants minéralogiques du sol.

Les sols étaient couverts de plantes herbacées naturelles avec quelques plantes ligneuses. Selon Bond et al. (Bond et al., 2008), la végétation naturelle du plateau central de Madagascar est dominé par des prairies et des savanes, avec, notamment les espèces *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*. Les zones étudiées sont utilisées par les agriculteurs pour le pâturage extensif. Les sols de ce type sont néanmoins de plus en plus utilisés par l'agriculture pour produire des cultures vivrières pluviales.

### 2.2. Analyses conventionnelles

Concernant les mesures des constituants minéraux, les oxydes de  $Fe_2O_3$  ont été mesurés par la méthode de déferrification au citrate-bicarbonate-dithionite (CBD) (Mehra et al., 1960). Kt et Gb ont été obtenus par calcul à partir des quantités de  $SiO_2$  et  $Al_2O_3$  solubilisées lors d'une

extraction avec de l'acide sulfurique (Reatto et al., 2008 ; Vendrame et al., 2012 ; Ramarosan et al., 2018). Les calculs sont les suivant :

$$Kt = SiO_{2\_SA} / Kt_{SiO_2} \quad (1)$$

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.

$$Gb = [Al_2O_3_{SA} - Al_2O_3_{CBD} - (Kt \times Kt_{Al_2O_3})] / Gb_{Al_2O_3} \quad (2)$$

où  $Gb$  est la concentration de la gibbsite ( $g\ kg^{-1}$ ),  $Al_2O_3_{SA}$  est la concentration d' $Al_2O_3$  obtenue à partir de l'extrait de l'attaque à l'acide sulfurique ( $g\ kg^{-1}$ ),  $Al_2O_3_{CBD}$  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.

Concernant les mesures des propriétés physico-chimiques, 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). 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  $P\ l^{-1}$  (sous forme de  $KH_2PO_4$ ) dans du  $CaCl_2\ 0,01\ M$  ajouté à un rapport sol / solution 1 : 10. L'argile, le limon et le sable ont été déterminés 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 par la spectrométrie infrarouge

Les analyses spectrales ont été faites sur les 148 échantillons de 120 sites à l'échelle régionale. Les échantillons ont été broyés à  $< 200\mu m$  pour être scannés : i) dans la région proche infrarouge (NIRS) avec un spectrophotomètre Foss NIRSystems 5000 (Silver Spring,

MD, USA), entre une longueur d'onde de 1100 à 2498 nm avec une résolution de 2nm ; et ii dans la région moyenne infrarouge (MIRS) à partir d'un spectromètre Nicolet 6700 spectrophotometer (Thermo Fisher Scientific Instruments, Madison, WI, USA), entre une longueur d'onde de 400 à 4000  $\text{cm}^{-1}$  avec une résolution de 3,857  $\text{cm}^{-1}$ .

Les analyses spectrales vont ensuite être récupérés et traitées avec le logiciel WinISI III - V 1.63 (Foss NIR Systems/Tecator Infrasoft International, LLC, Silver Spring, MD, USA). Ces analyses spectrales consistent à combiner les analyses conventionnelles avec les données spectrales pour assurer la prédiction des constituants minéraux et des propriétés physico-chimiques du sol.

La méthode statistique utilisée était la mPLS (*modified Partial Least Square regression*). Les paramètres de détermination du modèle sont le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et le rapport de performance de l'erreur type à l'écart type des données de référence (RPD). Selon Chang et al. (Chang et al., 2001) concernant le  $R^2$ , si le  $R^2 < 0,65$ , le modèle est faible ; si le  $R^2$  est entre de 0,65 à 0,81, le modèle est acceptable ; si le  $R^2 > 0,81$ , le modèle est satisfaisant. Selon Malley et al. (Malley et al., 2004) concernant la valeur du RPD : si le RPD  $< 2$ , le modèle est très faible ; si le RPD est entre de 2,0 à 3,0, le modèle est acceptable ; si le RPD  $> 3$ , le modèle est satisfaisant. (Chang et al., 2001 ; Malley et al., 2004). Les traitements statistiques sont réalisés à partir du logiciel statistique libre R version 3.2.3 (R Core Team R, 2015).

#### **2.4. Analyse à partir des hauteurs de pics**

L'analyse à partir des hauteurs de pics consiste à analyser les intensités de l'absorption des constituants à partir des pics d'absorptions spécifiques pour Kt et Gb, produites par les vibrations des radicaux hydroxyls (OH) dans leur réseau cristallin. Ces deux pics sont très visibles dans le NIRS. Madeira et al. (1995) ont démontré la possibilité d'utiliser l'intensité d'absorption de ces deux pics pour la détermination quantitative de la kaolinite et de la

gibbsite dans des sols très altérés. Ils se situent vers 2205 nm pour la kaolinite et vers 2265 nm pour la gibbsite (Madeira et al., 1995. ). Ramarosan et al. (2018) ont introduits une modification dans la méthodologie originale de Madeira et al. (1995). Cela consiste à l'utilisation de la première dérivée des spectres pour réduire la variation de la ligne de base et améliorer les caractéristiques spectrales (Ben-Dor et al., 1994 ; Reeves et al., 2002. ). Les premières dérivées du pic d'intensité de réflectance maximale ont été alors décalées de près de 7 à 13 nm par rapport aux spectres non dérivés de ceux de Madeira et al. (1995) : soit entre 2212 et 2214 nm pour la kaolinite (P1) et entre 2272 et 2284 nm pour la gibbsite (P3) (Ramarosan et al., 2018).

Des régressions linéaires et polynomiales ont été utilisées pour construire les modèles reliant les teneurs en kaolinite et les teneurs en gibbsite avec leurs intensités d'absorption respectives. Un premier modèle de régression a conduit à éliminer les échantillons situés en dehors d'un intervalle de prédiction ( $p = 0,90$ ). Le modèle de régression final a été évalué sur la base des échantillons restants et sur lequel le coefficient de détermination ( $R^2$ ) qui est le paramètre de détermination du modèle, a été calculé (Chang et al., 2001 ; Malley et al., 2004). Le traitement des données a été réalisé à partir d'un logiciel libre R version 3.2.3 (R Core Team R, 2015).

### 3. RESULTATS

Le tableau 1 montre les résultats prédits des constituants minéraux et des propriétés physico-chimiques du sol à partir de la méthode mPLS et des hauteurs des pics sur les spectres NIRS et MIRS.

#### 3.1. Prédiction des constituants minéraux à partir de NIRS et MIRS

Pour le NIRS, Kt et Gb sont bien prédits à partir des hauteurs de pics, avec un  $R^2_c$  et  $R^2_v$  de 0,69 et 0,72 et de 0,71 et 0,72, respectivement. Ces éléments minéraux ne sont pas prédits de façon satisfaisante par la mPLS, avec un  $R^2_{cv}$  et un  $RPD_{cv}$  de 0,60 et 1,6 pour Kt et Gb, et des  $R^2_v$  et  $RPD_v$  de respectivement 0,37 et 1,3 pour Kt et 0,51 et 1,4 pour Gb. Par ailleurs,  $Fe_2O_{3cbd}$  est prédit à partir de mPLS, avec un  $R^2_{cv}$  et  $RPD_{cv}$  de 0,80 et 2,2, un  $R^2_v$  et  $RPD_v$  de 0,63 et 1,6 (Tableau 1).

Pour le MIRS, les Kt, Gb ne sont pas prédits à partir de la méthode mPLS. Ils ont un  $R^2_{cv}$  et  $RPD_{cv}$  de 0,59 et 1,6 – 0,54 et 1,5, respectivement, et un  $R^2_v$  et  $RPD_v$  de 0,30 et 1,2 – 0,45 et 1,3, respectivement. Par ailleurs, le  $Fe_2O_{3cbd}$  est moyennement prédit par le mPLS, avec un  $R^2_{cv}$  et  $RPD_{cv}$  de 0,57 et 1,5, un  $R^2_v$  et  $RPD_v$  de 0,72 et 1,9 (Tableau 1).

#### 3.2. Prédiction des propriétés physico-chimiques à partir de NIRS et MIRS

Pour le NIRS, le C est très bien prédit par la mPLS avec un  $R^2_{cv}$  et  $RPD_{cv}$  de 0,79 et 2,2, un  $R^2_v$  et  $RPD_v$  de 0,81 et 2,3. Le  $P_{rem}$  est prédit par le mPLS avec un  $R^2_{cv}$  et  $RPD_{cv}$  de 0,70 et 1,8, un  $R^2_v$  et  $RPD_v$  de 0,65 et 1,7. Par ailleurs, les argiles, limons, sables et  $pH_{eau}$  ne sont pas prédits par le mPLS, avec des  $R^2$  et  $RPD$  qui sont très faibles (Tableau 1).

Pour le MIRS, le C est très bien prédit par la mPLS avec un  $R^2_{cv}$  et  $RPD_{cv}$  de 0,85 et 2,6, un  $R^2_v$  et  $RPD_v$  de 0,87 et 2,8. Le  $P_{rem}$  et le sable sont prédits par le mPLS avec des  $R^2_{cv}$  et  $RPD_{cv}$  de 0,73 et 1,9 et de 0,66 et 1,7, respectivement; et des  $R^2_v$  et  $RPD_v$  de 0,77 et 2,1 et de 0,76 et 2,0, respectivement. Par ailleurs, les argiles, limons et  $pH_{eau}$  ne sont pas prédits par le mPLS, avec un  $R^2$  et  $RPD$  qui sont très faibles (Tableau 1).

#### 4. DISCUSSIONS

Selon Malley et al. (2004), la précision des modèles est déterminée à partir du RPD. Il est généralement admis que lorsque  $RPD < 1,5$ , le modèle de prédiction est faible ; pour un RPD compris entre 1,5 et 2,0, le modèle de prédiction est acceptable et lorsque le RPD est supérieur à 2,0, il est considéré comme bon (Chang et al., 2001 ; Mórón et al., 2003 ; Malley et al., 2004). Malley et al. (2004) ont également montré que le  $R^2$  est un autre paramètre d'évaluation du modèle. Pour un  $R^2 < 0,50$ , le modèle est faible ; pour un  $R^2$  entre 0,50 – 0,64, le modèle est considéré acceptable ; pour un  $R^2 > 0,65$ , le modèle est acceptable. Par rapport aux résultats obtenus, nos modèles de prédiction des constituants (Kt :  $R^2_c = 0,69$  et  $R^2_v = 0,72$ ; Gb :  $R^2_c = 0,71$  et  $R^2_v = 0,72$  ;  $Fe_2O_{3cbd}$  :  $R^2_{cv} = 0,80$  et  $RPD_{cv} = 2,2$ ) (Tableau 1) et les propriétés physico-chimiques (C :  $R^2_{cv} = 0,85$  et  $RPD_{cv} = 2,6$  ;  $P_{rem}$  :  $R^2_{cv} = 0,73$  et  $RPD_{cv} = 1,9$ ; Sable :  $R^2_{cv} = 0,66$  et  $RPD_{cv} = 1,7$ ) sont considérés comme bons ou acceptables. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus sur des sols ferrallitiques du Brésil qui sont développés aux mêmes latitudes que ceux de Madagascar, où les modèles de prédiction des constituants (kaolinite, gibbsite, carbone et  $Fe_2O_3$ ) et des propriétés physicochimiques (sable,  $P_{rem}$ ) ont un  $R^2 > 0,65$  et un  $RPD > 2,0$  (Vendrame et al., 2012 ; Ramaroson et al., 2013).

### 3. CONCLUSION

L'étude nous a permis de présenter des outils alternatifs aux méthodes physicochimiques traditionnelles pour déterminer les caractéristiques des sols ferrallitiques de Madagascar. Ces outils, basés sur la spectrométrie infrarouge, présentent l'avantage d'être peu coûteux et rapide, ce qui n'est pas le cas des méthodes de caractérisation minéralogiques des sols, qui ne sont pas utilisées en routine dans les laboratoires d'analyses. Ils présentent aussi l'avantage de pouvoir faire des prédictions à partir d'un seul spectre NIRS ou MIRS au lieu d'effectuer de nombreuses analyses physico-chimiques, spécifiques à chaque élément ou constituant déterminé. Ces méthodes ont été développées principalement pour des applications lors d'analyses de laboratoire. Néanmoins, des résultats prometteurs ont été obtenus pour des utilisations directes sur le terrain (voir, par exemple, Gras *et al.*, 2014). Des travaux ont aussi été développés afin d'utiliser les données spectrales fournies par les satellites afin de caractériser les sols. Par exemple, Rosin *et al.* (2023) ont proposé une cartographie de la minéralogie des sols du Brésil à partir de données satellitaires. Ces travaux ouvrent de très larges perspectives pour une utilisation accrue de la spectrométrie infrarouge pour la caractérisation des sols. Ces méthodes, peu coûteuses, sont particulièrement intéressantes pour soutenir l'agriculture des pays en développement, où les laboratoires d'analyses de sols sont peu développés.

Nos résultats ont montré que les constituants minéraux et les propriétés physico-chimiques contribuant à la sorption de P sont correctement déterminés à partir de l'utilisation de la spectrométrie infrarouge. A partir d'un exemple issu de nos travaux, nous avons montré l'intérêt de la spectrométrie infrarouge pour caractériser les sols (ses constituants, ses propriétés physico-chimiques). La spectrométrie infrarouge peut être utilisée dans de nombreux autres domaines. Par exemple, en agriculture, des caractérisations des productions (qualité des grains, des fourrages) des amendements organiques, etc. ont été proposées. De

très nombreuses applications sont possibles dans divers domaines économiques ainsi que dans d'autres domaines d'analyse.

## **Remerciements**

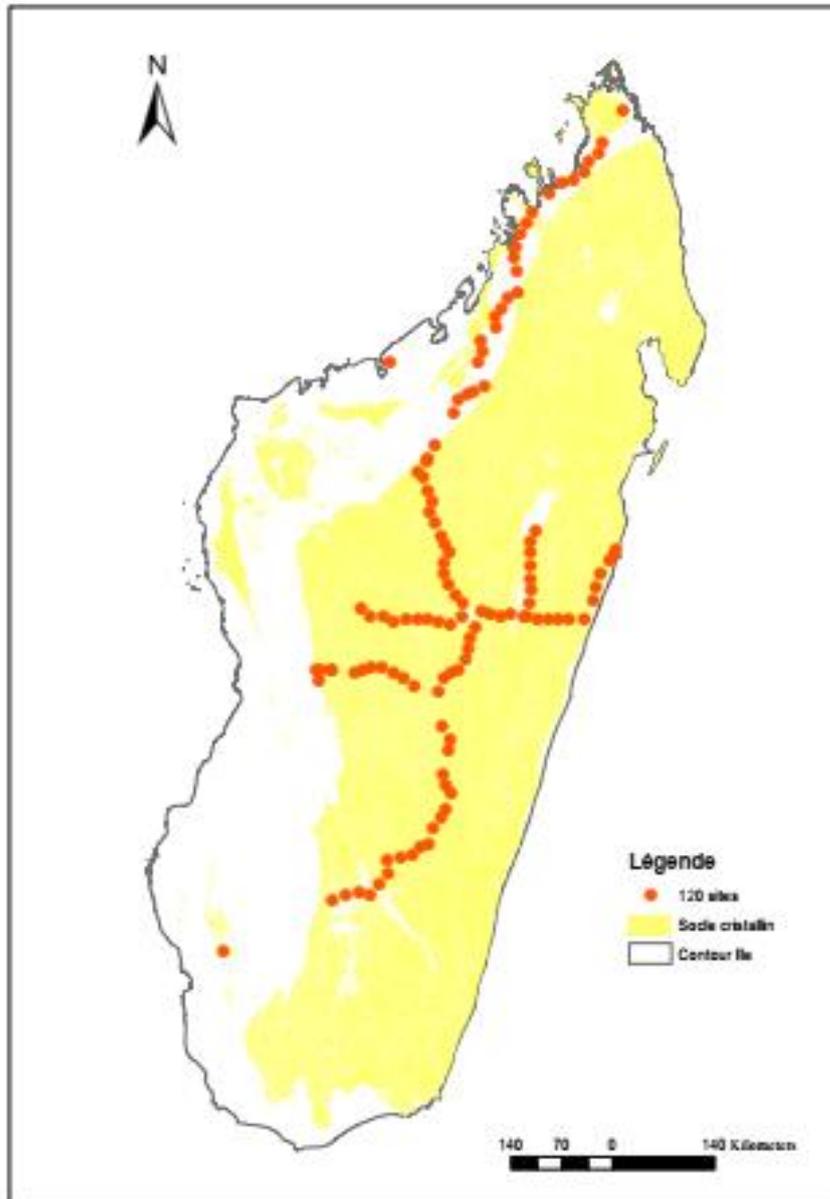
Notre recherche a été menée en collaboration avec le Laboratoire des RadioIsotopes (LRI) et l'Institut de la Recherche pour le Développement (IRD), grâce à des soutiens financiers apportés par : Agropolis Fondation, Montpellier, France (projet FABATROPIMED) et par l'IFS (International Foundation for Science), Stockholm, Suède. Nous les remercions pour cette collaboration.

## Références

- Ben-Dor, E., Banin, A. (1994). Visible and near-infrared (0.4–1.1  $\mu\text{m}$ ) analysis of arid and semiarid soils. *Remote Sens. Environment*., 48, 261–274.
- 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.
- Cécillon, L., Barthès, B.G., Gomez, C., Ertlen, D., Génot, V., Hedde, M., Brun, J.J. (2009). Assessment and monitoring of soil quality using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). . *Eur. J. SoilSci*, 60, 770-784.
- Chang, C.W., Laird, D.A., Mausbach, M.J., Hurburgh, C.R. (2001). Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analysis of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am.*, 65, 480-490.
- Gras, J. P., Barthès, B. G., Mahaut, B., Trupin, S. . (2014). Best practices for obtaining and processing field visible and near infrared (VNIR) spectra of topsoils. *Geoderma*, 214, 126-134.
- Janik, L.J., Merry, R.H., Skjemstad, J.O. (1998). Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions? *Aust. J. Exp. Agric.* , 38, 681–696.
- Madeira, J., Bedidi, A., Pouget, M., Cervelle, B., Flay, N., 1995. . (s.d.). Spectral (MIR) determination of kaolinite and gibbsite contents in lateritic soils. *Comptes rendus de l'Académie des sciences Série 2. Sciences de la terre et des planètes*, 321(2), 119-127.
- Malley, D.F., Martin, P.D., Ben-Dor, E. (2004). Application in analysis of soils. *In: Roberts C.A. (Ed.), Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture, Agronomy Monograph 44, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society*, 729-784.

- Móron, A., Cozzolino, D. (2003). Exploring the use of near infrared reflectance spectroscopy to study physical properties and microelements in soils. . *J. Near Infrared Spectrosc.* 1, 11, 145–154 .
- R Core Team R. (2015). A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.* .
- Rabeharisoa, L., Razanakoto, O.R., Razafimanantsoa, M.P., Rakotoson, T., Amery, F., Smolders, E. (2012). Larger bioavailability of soil phosphorus for irrigated rice copared with rainfed rice in Madagascar: results from a soil and plant survey. *Soil Use Manage, 448-456*, 28.
- Ramaroson H.V., Brito O.R., Marchão R.L., Vendrame P.R.S., Rabeharisoa L., Becquer T. (2013). Potencial da espectroscopia NIR na predição da retenção de fósforo em solos tropicais. . *XXXIV Congresso Brasileiro de Cienca do Solo. 28 juillet - 2 août 2013. Florianopolis, SC, Brésil*, 4p.
- Ramaroson, H. (2017). La spectromètre infrarouge comme outil de caractérisation des constituants et des propriétés physico-chimiques des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. *Thèse en cotutelle de l'Institut National d'Etudes Supérieures Agronomiques de Montpellier et la Faculté de Sciences de l'Université d'Antananarivo*, 159.
- Ramaroson, H.V.; Becquer, T.; Razafimahatratra, H.; Razakavololona, A.; Rabeharisoa, L.; Rakotondrazafy, A.F.M. . (2023). Prediction of Phosphorus Sorption Index and Availability by NIR and MIR in Soils in Madagascar. *Land, 196*.
- Ramaroson, V.H.; Becquer, T.; Sá, S.O.; Razafimahatratra, H.; Larvy Delarivière, J.; Blavet, D.; Vendrame, P.R.S.; Rabeharisoa, L.; Rakotondrazafy, A.F.M. (2018). Mineralogical analysis of ferralitic soils in Madagascar using NIR spectroscopy. *Catena, 168*, , 102-109.

- 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.
- Reeves III, J., McCarty, G., Mimmo, T. (2002. ). The potential of diffuse reflectance  
spectroscopy for the determination of carbon inventories in soils. . *Environ. Pollut.* ,  
116, 277–284 .
- Rosin, N. A., Demattê, J. A., Poppiel, R. R., Silvero, N. E., Rodriguez-Albarracin, H. S.,  
Rosas, J. T. F., Greschuk, L.T., Bellinaso, H., Minasny B., Gomez C., Junior, J.M.,  
Fernandes, K. . (2023). Mapping Brazilian soil mineralogy using proximal and remote  
sensing data. *Geoderma*, 432, 116413.
- 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.
- 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.



**Figure 1** : Localisation des sites de l'étude

**Tableau 1** : Récapitulatif des résultats prédits des constituants minéraux et des propriétés physico-chimiques du sol à partir de NIRS et de MIRS

Variables		mPLS				Hauteur des pics	
		R <sup>2</sup> <sub>cv</sub> <sup>8</sup>	RPD <sub>cv</sub> <sup>9</sup>	R <sup>2</sup> <sub>v</sub> <sup>10</sup>	RPD <sub>v</sub> <sup>11</sup>	R <sup>2</sup> <sub>c</sub> <sup>12</sup>	R <sup>2</sup> <sub>v</sub>
<b>Minéraux/physico-chimiques</b>							
<b>NIRS<sup>1</sup></b>							
Kt <sup>2</sup>	g kg <sup>-1</sup>	0,60	1,6	0,37	1,3	<b>0,69</b>	<b>0,72</b>
Gb <sup>3</sup>	g kg <sup>-1</sup>	0,60	1,6	0,51	1,4	<b>0,71</b>	<b>0,72</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3cbd</sub> <sup>4</sup>	g kg <sup>-1</sup>	<b>0,80</b>	<b>2,2</b>	0,63	1,6	-	-
C <sup>5</sup>	g kg <sup>-1</sup>	<b>0,79</b>	<b>2,1</b>	<b>0,81</b>	<b>2,3</b>	-	-
P <sub>rem</sub> <sup>6</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	<b>0,70</b>	<b>1,8</b>	<b>0,65</b>	<b>1,7</b>	-	-
Argile	g kg <sup>-1</sup>	0,49	1,4	0,33	1,2	-	-
Limon	g kg <sup>-1</sup>	0,39	1,3	0,02	1,0	-	-
Sable	g kg <sup>-1</sup>	0,58	1,5	0,40	1,3	-	-
pH <sub>eau</sub>		0,37	1,3	0,27	1,2	-	-
<b>MIRS<sup>7</sup></b>							
Kt	g kg <sup>-1</sup>	0,59	1,6	0,30	1,2	-	-
Gb	g kg <sup>-1</sup>	0,54	1,5	0,45	1,3	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3cbd</sub>	g kg <sup>-1</sup>	0,57	1,5	0,72	1,9	-	-
C	g kg <sup>-1</sup>	<b>0,85</b>	<b>2,6</b>	<b>0,87</b>	<b>2,8</b>	-	-
P <sub>rem</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	<b>0,73</b>	<b>1,9</b>	<b>0,77</b>	<b>2,1</b>	-	-
Argile	g kg <sup>-1</sup>	0,56	1,5	0,55	1,5	-	-
Limon	g kg <sup>-1</sup>	0,58	1,5	0,32	1,2	-	-
Sable	g kg <sup>-1</sup>	<b>0,66</b>	<b>1,7</b>	<b>0,76</b>	<b>2,0</b>	-	-
pH <sub>eau</sub>		0,24	1,1	0,38	1,3	-	-

**N.B.** : Proche infrarouge<sup>1</sup>; Kaolinite<sup>2</sup>; Gibbsite<sup>3</sup>; la totalité de fer déterminé à partir de la méthode CBD<sup>4</sup>; Carbone<sup>5</sup>; Sorption du phosphore<sup>6</sup>; Moyen infrarouge<sup>7</sup>; Coefficient de détermination à partir d'une cross-validation<sup>8</sup>; le rapport de la performance de l'erreur type des données de référence<sup>9</sup>; coefficient de détermination de la validation<sup>10</sup>; 1/[racine (1 - R<sup>2</sup>)]<sup>11</sup>; coefficient de détermination de la calibration<sup>12</sup>.