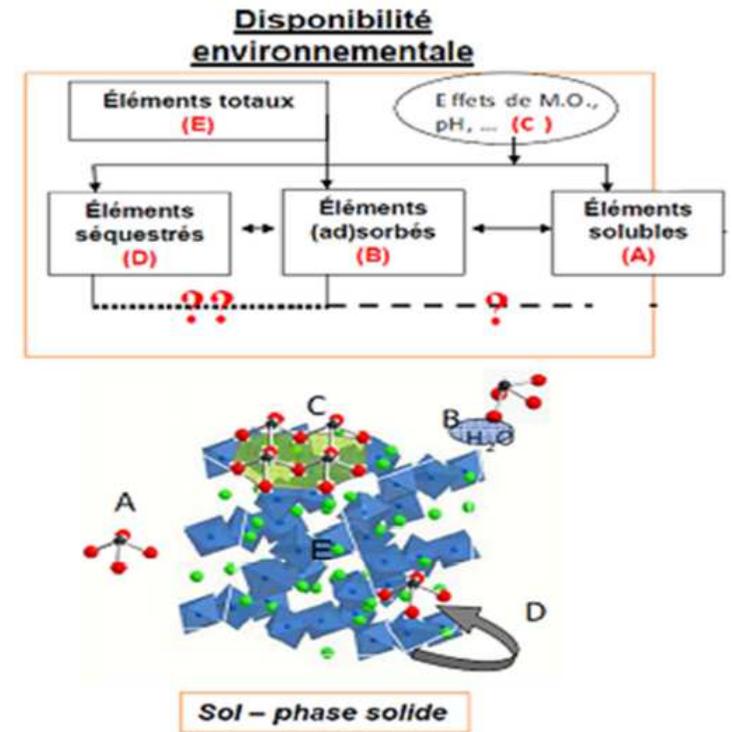


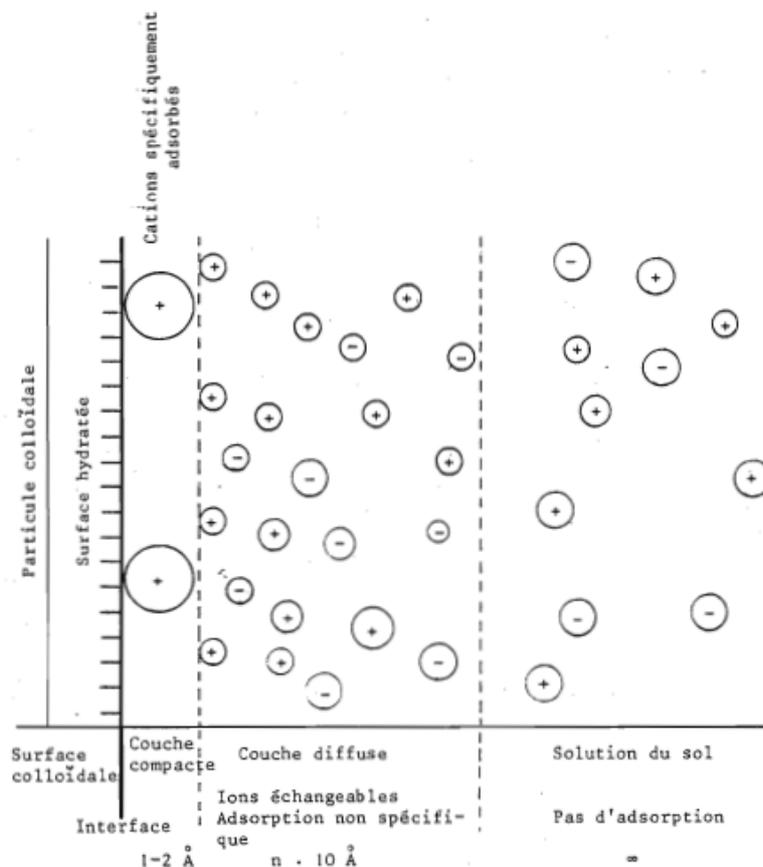
**Figure 5.** Mécanisme de la disponibilité de P dans les sols (basé à partir de Andriamananjara, 2012 ; Waithaisong, 2015)



**Figure 6.** Compartimentation du phosphore et notion de disponibilité (A : adsorbé, B : soluble, C : séquestré, E : éléments totaux) (Becquer, 2005 ; Raous, 2011)

### *3.1.3 Disponibilité de P contrôlée par les propriétés d'échanges*

Les particules d'un sol sont chargées électriquement. Les charges des particules sont en équilibre dans le sol avec des ions qui vont neutraliser les charges positives ou négatives. Dans le cas de charges négatives, ces ions supplémentaires sont des ions alcalins, alcalino-terreux ou de l'aluminium, retenus aux particules du sol par des liaisons ioniques. Ces ions peuvent être déplacés facilement, échangés contre d'autres, d'où leur nom d'ions échangeables. Les charges sont alors neutralisées par des cations ; on parlera de la capacité d'échange cationique ou CEC. Lorsqu'il s'agit de charges positives, elles sont neutralisées par des anions ; on parlera de la capacité d'échange anionique ou CEA (Olphen, 1977). Ces mécanismes sont illustrés par le modèle de Gouy-Chapman-Stern (Figure 7). Les charges de surface des minéraux sont neutralisées par les minéraux adsorbés à la surface des particules, les cations neutralisant les charges électronégatives (notamment à la surface des matières organiques et des argiles), les anions neutralisant les charges électropositives (notamment à la surface des sesquioxydes de Fe et Al).



**Figure 7.** Distribution des charges, modèle Gouy-Chapman-Stern, d'après Pieri, 1975

Les charges des constituants des sols sont de deux types (Figure 8) : les charges permanentes (ou structurales) et les charges variables. Les charges permanentes sont dues à des substitutions isomorphiques dans le réseau cristallin des argiles : substitution de  $\text{Si}^{4+}$  par  $\text{Al}^{3+}$  dans les couches tétraédriques ; substitution de  $\text{Al}^{3+}$  par des métaux divalents ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , ...) dans la couche octaédrique des argiles (Figure 8a). Les charges permanentes, issues de substitution avec des cations de moindre charge ne peuvent donc générer que des charges négatives qui contribuent à la CEC. Les charges variables sont issues de la (dé)protonation de molécules amphotères (matières organiques, oxydes de fer et d'aluminium, dans une moindre mesure kaolinite), qui sont des composés importants des sols tropicaux (Uehara et Keng, 1975 ; Pieri, 1975, 1977). Ces charges variables sont donc dépendantes du pH (Figure 8b). Les charges positives sont dues à une protonation des groupes Si-OH, Al-OH et Fe-OH de la kaolinite et des oxydes d'Al et Fe. Ce sont ces charges positives et la protonation de ces constituants qui contrôlent pour une large part la sorption du P. La protonation et la création de charges positives étant d'autant plus importantes que le pH est faible, ceci explique la plus forte sorption de P dans les sols tropicaux acides. De ce fait, avec un pH acide ou inférieur au point de charge nul d'un minéral, l'adsorption est maximum lorsque les surfaces sont

chargées positivement. Le phosphate est fortement adsorbé sur les bordures des cristallites avec formation d'un complexe du P lié à l'aluminium (Figure 9a). Avec les oxydes et hydroxydes de Fe, l'adsorption est également forte à pH faible ou inférieur au point de charge nulle du constituant (Figure 9b) (Wey, 1953-1955).

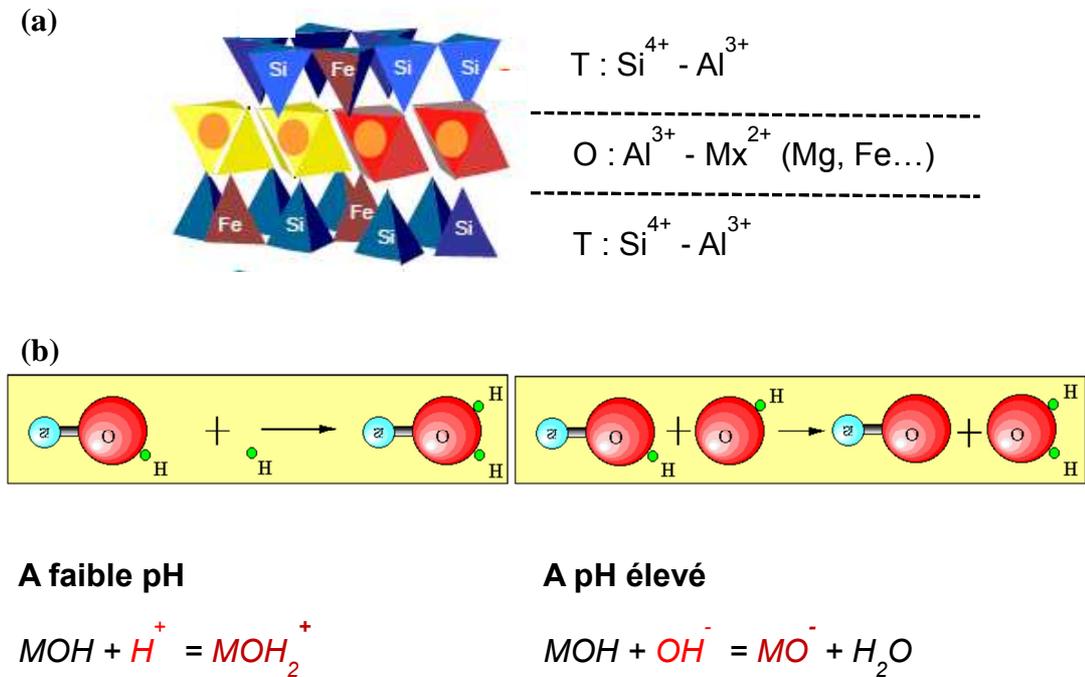
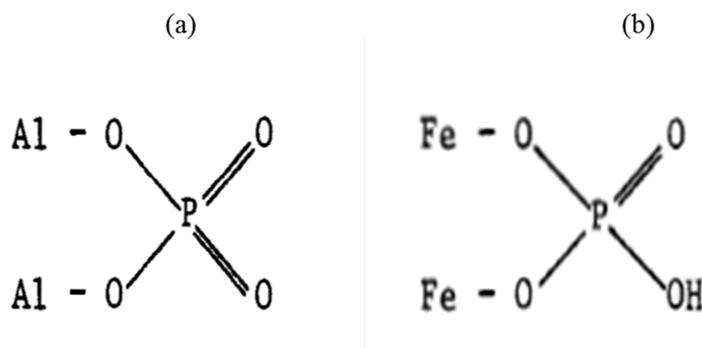


Figure 8. Représentation schématique de l'origine des charges permanentes (a) et variables (b) des sols.



Ou: O - Al - O - PO<sub>2</sub>

Figure 9. Fixation du P aux bords des oxydes de Fe et Al

Le phosphore organique, qui représente une fraction importante du phosphore total (20 à 80%), peut également contribuer à la sorption du P. Divers travaux (Chaminade, 1944 ;

Levesque et Schnitzer, 1967 ; Sinha, 1971a et b ; Bidom, 1981) ont montré qu'il y avait des liaisons entre la matière organique et les ions phosphates à travers des cations métalliques. La présence de fer et d'aluminium dans les molécules d'acide humique ou fulvique conduit à la formation de complexes phospho-organo-métallique. Le phosphate agit alors comme un ligand dans les complexes et le métal (oxydes/hydroxydes de fer et d'aluminium) comme un pont entre l'acide fulvique et le phosphate. L'adsorption spécifique (échange de ligand) se produit alors lorsque les anions phosphates remplacent les groupes hydroxyl sur la surface des oxydes d'Al et de Fe et des oxydes hydratés (Parfitt, 1978 ; Waithaisong, 2015).

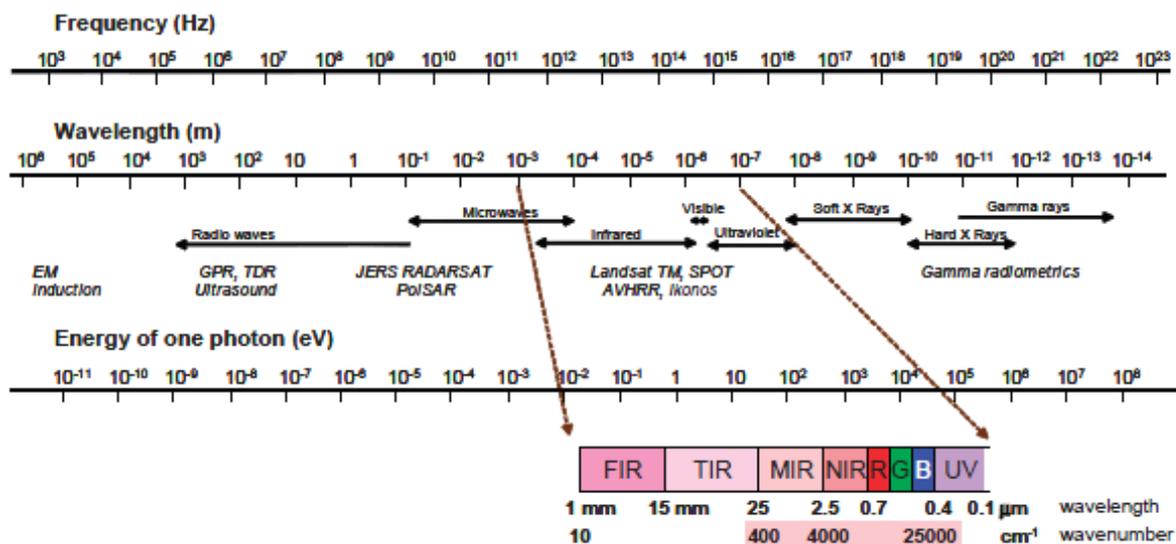
Ainsi, tous les sols fixent les phosphates à degrés divers. Ceux qui les fixent le moins énergiquement sont les plus riches en smectites. Ceux qui les fixent le plus sont les sols riches en sesquioxydes, kaolinite et matière organique (Wada, 1959 ; Amano, 1981).

## **4 Application de la spectrométrie infrarouge en Sciences du sol**

### *4.1 Principes physiques de la spectrométrie infrarouge*

Le principe de la spectrométrie infrarouge a été souvent détaillé (King, 2004; Roy 2007). Elle repose sur la mesure de l'interaction entre un rayonnement électromagnétique et la matière à différentes fréquences. Elle permet d'obtenir des informations cristallographiques sur la matière à partir de son interaction avec le rayonnement incident. Selon la fréquence de ce rayonnement (ultraviolet, visible, infrarouge...), des différents types de niveaux d'énergie se présentent.

La figure 10 présente la partie du spectre électromagnétique correspondant à l'infrarouge (IR). La fenêtre spectrale de l'IR, se décompose habituellement en 3 parties : le proche (SPIR), le moyen (SMIR) et le lointain IR. Une intense fréquence moléculaire liée aux composants du sol, se produit dans le moyen infrarouge (MIR) entre les longueurs d'onde de 2500 et 25000 nm ou  $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ . Une faible vibration correspondant à l'élongation ou la flexion des liaisons des groupes N-H, O-H et C-H est dominée dans la région de proche infrarouge (700 – 2500 nm) et une transition électronique est dominée dans la région de visible ou Vis (400 – 700 nm) (Truche, 2013). C'est pourquoi, nous nous intéresserons plus particulièrement à la région du proche (SPIR) et du moyen infrarouge (SMIR) pour notre étude.



**Figure 10.** Distribution des spectres électromagnétiques et mise en évidence de la partie visible – proche et moyen infrarouge (après McBratney *et al.*, 2003)

#### 4.2 Relation de la spectrométrie infrarouge avec les constituants

La relation de la spectrométrie infrarouge avec les constituants se trouve au niveau de la vibration de la molécule constituant les spectres. Lorsqu'une molécule est exposée au rayonnement IR, le rayonnement incident permet une vibration de la liaison de la molécule à la même fréquence que la composante spectrale. Ainsi, l'énergie absorbée est caractéristique de chacune des liaisons chimiques du composant analysé (Truche, 2013). Par conséquent, tout minéral ou constituant organique possède une signature spectrale qui lui est propre. Pour le cas du sol, ces signatures spectrales obtenues sont constituées par les bandes d'absorption des molécules des matériaux organiques et minéraux présents dans le sol (Truche, 2013). Les tableaux 3 et 4 présentent les relations des longueurs d'ondes des spectres SMIR et SPIR, respectivement, avec la liaison moléculaire de chaque constituant.

**Tableau 3.** Relation des longueurs d'ondes des spectres SMIR avec la liaison moléculaire de chaque constituant

| Wavelength (cm <sup>-1</sup> ) near of | Elements   | Assignment   | References   |
|--|--|--|--|
| 3695                                   | Kaolinite/Halloysite                             | O-H vibration  | White and Roth, 1986.  |
| 3694                                   | Kaolinite  | OH stretching vibration                              | Nguyen <i>et al.</i> , (1991) / Bardy <i>et al.</i> , (2008).                                  |
| 3670                                   | Kaolinite  | Free O-H stretch                                     | White and Roth, 1986.  |
| 3650                                   | Kaolinite  | Free O-H stretch                                     | White and Roth, 1986.  |
| 3655                                   | Kaolinite  | OH stretching vibration                              | Nguyen <i>et al.</i> , (1991) / Bardy <i>et al.</i> , (2008).                                  |
| 3625                                   | Gibbsite   | OH stretching vibration                              | Nguyen <i>et al.</i> , (1991) / Balan <i>et al.</i> , (2006).                                  |
| 3622                                   | Kaolinite/Gibbsite                               | OH stretching vibration                              | Nguyen <i>et al.</i> , (1991) / Balan <i>et al.</i> , (2006).                                  |
| 3610                                   | Gibbsite   | Free O-H stretch                                     | White and Roth, 1986.  |
| 3525                                   | Gibbsite   | O-H stretch  | White and Roth, 1986.  |
| 3450                                   | Gibbsite   | OH stretching vibration                              | Nguyen <i>et al.</i> , (1991) / Balan <i>et al.</i> , (2006).                                  |
| 3392                                   | Gibbsite   | OH stretching vibration                              | Nguyen <i>et al.</i> , (1991) / Balan <i>et al.</i> , (2006).                                  |
| 3376                                   | Gibbsite   | OH stretching vibration                              | Nguyen <i>et al.</i> , (1991) / Balan <i>et al.</i> , (2006).                                  |
| 1116                                   | kaolinite  | Al-OH deformation vibration                          | Ip <i>et al.</i> , (2008).   |
| 1105                                   | Kaolinite  | Al-OH deformation vibration                          | Ip <i>et al.</i> , (2008).   |
| 1038                                   | kaolinite  | Si-O vibration                                       | White and Roth, 1986.  |
| 1020                                   | Kaolinite / Halloysite/Montmorillonite/muscovite | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Si lattice vibration | Nguyen <i>et al.</i> , (1991) / Viscarra Rossel <i>et al.</i> , (2008) / White and Roth, 1986. |
| 1012                                   | Kaolinite  | Si-O vibration                                       | White and Roth, 1986.  |
| 975                                    | Gibbsite   | Si-O vibration                                       | White and Roth, 1986.  |

**Note :** tableau issu de la synthèse bibliographique de Razafimahatratra (2011), d'après Viscarra Rossel, 2006b et 2010.

**Tableau 3. (Suite)** Relation des longueurs d'ondes des spectres SMIR avec la liaison moléculaire de chaque constituant

| Wavelength (cm <sup>-1</sup> )<br>near of | Elements                      | Assignment                          | References  |
|---|-------------------------------|-------------------------------------|---|
| 940                                       | Kaolinite/Chlorite Al-rich    | O-H<br>Librations<br>(dioctahedral) | White and Roth, 1986.                                   |
| 915                                       | Kaolinite/<br>Montmorillonite | O-H<br>Librations<br>(dioctahedral) | White and Roth, 1986.                                   |
| 890                                       | Goethite                      | O-H<br>Librations<br>(dioctahedral) | Schwertmann and Taylor, 1989 /<br>White and Roth, 1986. |
| 800                                       | Gibbsite/Quartz               | Si-O<br>vibration                   | White and Roth, 1986.                                   |
| 797                                       | Goethite                      | Si-O<br>vibration                   | Schwertmann and Taylor, 1989.                           |
| 745                                       | Gibbsite                      | Si-O<br>vibration                   | White and Roth, 1986.                                   |
| 700                                       | Kaolinite                     | Si-O<br>vibration                   | White and Roth, 1986.                                   |
| 670                                       | Gibbsite/Vermiculite          | Si-O<br>vibration                   | White and Roth, 1986.                                   |
| 560                                       | Gibbsite                      | Si-O<br>vibrations                  | White and Roth, 1986.                                   |
| 540                                       | Hematite/Kaolinite/Gibbsite   | Si-O<br>vibration                   | Schwertmann and Taylor, 1989 /<br>White and Roth, 1986. |
| 472                                       | Kaolinite                     | Si-O<br>vibration                   | White and Roth, 1986.                                   |
| 470                                       | Hematite / Montmorillonite    | Si-O<br>vibration                   | Schwertmann and Taylor, 1989.                           |

**Note** : tableau issu de la synthèse bibliographique de Razafimahatratra (2011), d'après Viscarra Rossel, 2006b et 2010.

**Tableau 4.** Relation de la spectrométrie infrarouge avec les constituants dans la région SPIR

| Wavelengths (nm) near of | Elements             | References biblio   |
|--------------------------|----------------------|---|
| 1100 and 1230            | Goethite             | Eisele et al., 2012   |
| 1400 (1395 and 1415)     | Kaolinite            | Stenberg et al., 2010   |
| 1700                     | Goethite             | Stenberg et al., 2010 / Morris et al., 1985                                 |
| 1900                     | kaolinite            | Stenberg et al., 2010   |
| 2079 - 2277              | Kaolinite            | Malone et al., 2014   |
| 2118 - 2287              | Kaolinite - Smectite | Malone et al., 2014   |
| 2200 (2165 and 2207)     | Kaolinite            | Ben-Dor, et al., 1999/ Bellinaso et al., 2010 / Eisele et al., 2012 Vis-NIR |
| 2205                     | Kaolinite            | Madeira et al., 1995  |
| 2265                     | Gibbsite             | Madeira et al., 1995  |
| 2208                     | Kaolinite            | 19th world congress of soil science   |
| 2160                     | Kaolinite            | 19th world congress of soil science, 2010                                   |
| 2242                     | Kaolinite            | 19th world congress of soil science, 2010                                   |
| 2290                     | Kaolinite            | 19th world congress of soil science, 2010                                   |
| 2260                     | Gibbsite             | 19th world congress of soil science, 2010                                   |
| 2265                     | Gibbsite             | Madeira-Netto, 1996 / Bellinaso et al., 2010                                |

**Note :** tableau issu de la synthèse bibliographique de Razafimahatratra (2011), d'après Viscarra Rossel, 2006b et 2010.

#### 4.3 Principes physiques de la chimométrie appliquée à la spectrométrie infrarouge

La spectrométrie infrarouge est une méthode rapide et non destructive pour évaluer certaines propriétés des sols (Janik *et al.*, 1998; Viscarra Rossel *et al.*, 2006). Elle s'utilise principalement pour l'analyse qualitative et quantitative d'une molécule (Viscarra Rossel *et al.*, 2006b). Les signatures spectrales des sols sont ainsi définies par la réflectance ou l'absorbance, comme une fonction de la longueur d'onde dans le spectre électromagnétique (Mutuo *et al.*, 2006). Les spectres d'un produit donné sont discrétisés, c'est-à-dire que les valeurs d'absorbance pour les diverses longueurs d'ondes du spectre, selon un pas défini, sont transformées en autant de variables. Des statistiques multivariées sont alors conduites afin de relier les résultats d'une analyse chimique à ces données spectrales (Tableau 5).

**Tableau 5.** Exemple de présentation des tableaux sur des statistiques multivariées pour relier les résultats d'une analyse chimique à des données spectrales

| (a)     | Abs <sub>1100nm</sub> | Abs <sub>1102nm</sub> | ... | Abs <sub>2500nm</sub> |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----|-----------------------|
| éch 1   | X <sub>1-1</sub>      | X <sub>2-1</sub>      | ... | X <sub>700-1</sub>    |
| éch 2   | X <sub>1-2</sub>      | X <sub>2-2</sub>      | ... | X <sub>700-2</sub>    |
| ...     | ...                   | ...                   | ... | ...                   |
| éch 100 | X <sub>1-100</sub>    | X <sub>2-100</sub>    | ... | X <sub>700-100</sub>  |

| (b)     | %C               |
|---------|------------------|
| éch 1   | C <sub>1</sub>   |
| éch 2   | C <sub>2</sub>   |
| ...     | ...              |
| éch 100 | C <sub>100</sub> |

Il s'agit ensuite de prédire les propriétés du sol à partir d'un modèle obtenu par régression multivariée entre la variable à analyser (Figure 11b) et les variables spectrales (variables explicatives) (Figure 11a). La sélection du modèle est faite à partir des coefficients de détermination ( $R^2$ ) et les RPD, qui sont présentés et expliqués dans Malley *et al.* (2004) et Chang *et al.* (2001). Les meilleurs modèles seront ainsi appliqués et utilisés dans différentes zones à différentes échelles.

#### 4.4 Relation de la spectrométrie infrarouge avec les propriétés physico-chimiques

Diverses études ont été déjà réalisées dans les sols sur l'utilisation de la spectrométrie infrarouge. Des recherches ont été largement utilisées 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 ; Soriano-Disla *et al.*, 2014). 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.

Pour les sols tropicaux, hormis la détermination des teneurs en C et N, relativement peu de travaux sont disponibles. L'estimation des teneurs en P disponible reste encore rare. La plupart des études ont montré que la disponibilité du P est mal prédite par la spectrométrie infrarouge (Janik *et al.*, 1998). Cependant, Janik *et al.* (1998, 1999) et Minasny *et al.* (2009) ont montré que la sorption de P est bien prédite dans la région du moyen infrarouge (SMIR) et un peu moins dans la région de Vis-NIR. Cette bonne prédiction est reliée à une grande affinité des anions phosphates avec les minéraux tels que oxyhydroxyde de Fe et d'Al, les carbonates ou les matières organiques (Janik *et al.*, 1997), dont les bandes spectrales sont bien marquées. Cohen *et al.* (2005) et Bogrekci *et al.* (2007) sont les seuls auteurs qui montrent que la prédiction du P total est très bonne dans la région de Vis-NIR et proche infrarouge (SPIR).

## 5 Application des fonctions de pédotransfert (PTF) pour la prédiction de la sorption de P

Une fonction de pédotransfert (PTF) est une méthode statistique permettant d'estimer un paramètre à partir d'analyses par régression multiple de données facilement disponibles sur un ensemble des données indépendantes (Jeffrey, 1970; Manrique et Jones, 1991; Tamminen et Starr, 1994; Leonaviciute, 2000; Calhoun *et al.*, 2001; Heuscher *et al.*, 2005), ou à partir de modèles conceptuels (Stewart *et al.*, 1970; Adams, 1973; Rawls, 1983; Tranter *et al.*, 2007; Hollis *et al.*, 2012). Les fonctions de pédotransfert sont utilisées dans l'estimation des propriétés physico-chimiques des sols depuis les années 50 et 60 (Stirk, 1957; De Leenheer et Van Ruymbeke, 1960). Dans les années 70 et 80, de nombreux chercheurs se sont intéressés à la prédiction de la teneur en eau à la capacité au champ (MacLean et Yager, 1972; Pidgeon, 1972; Aina et Periaswamy, 1985). Lal (1979) a donné un aperçu de l'utilisation de ces fonctions de pédotransferts dans divers sols tropicaux. Des études ont été développées principalement dans les pays tempérés, mais Young *et al.* (1999) ont montré que les fonctions de pédotransferts développés pour les régions tempérées (Etats-Unis et Europe) ne sont pas fiables pour des sols tropicaux comme ceux de Tanzanie. Malgré des améliorations, les nombreuses méthodes publiées ont donc des limites si elles sont appliquées dans des échelles qui vont au-delà de l'échelle d'acquisition, comme à l'échelle européenne (Hollis *et al.*, 2012). Néanmoins, les PTFs sont intéressantes car, après le développement de modèles, elles permettent de prédire certaines propriétés des sols de façon rapide et peu coûteuse (Minasny et Hartemink, 2011).

Pour la sorption de P, les principaux prédicteurs sont la teneur en argile, le C organique et le Fe extractible par l'oxalate (Minasny *et al.*, 2011). Le Mare (1981) a développé des fonctions pédotransferts pour prédire la sorption de P dans les sols tropicaux (riche en oxydique de Fe et d'Al) à partir des teneurs de matière organique et de Fe extrait par l'oxalate d'ammonium. Des études ont également été développées au Brésil par Alves et Lavorenti (2006) pour prédire le P résiduel à partir du pH et d'argile. Par ailleurs, Borggaard *et al.* (2004) ont également menés des études sur des sols tempérés du Danemark et des sols tropicaux du Ghana et de Tanzanie. Ils ont montré que le Fe et l'Al extraits par l'oxalate d'ammonium et le Fe extrait par le citrate-bicarbonate-dithionite (CBD) étaient les meilleurs prédicteurs pour estimer la capacité d'adsorption du P des sols. Minasny et Hartemink (2011) suggèrent que les paramètres chimiques qui sont liés aux propriétés d'échange des sols (telle que la capacité d'adsorption) peuvent être prédits à partir d'autres propriétés du sol mesuré. Par contre, des indices de qualité des sols, tel que le P disponible, ne peuvent pas être

facilement prédits. Le développement de la fonction de pédotransfert pour l'estimation du P disponible ou du potentiel de sorption du sol dans les sols ferrallitiques reste encore très limité.

## Références bibliographiques

- Achat, D. 2009. Biodisponibilité du phosphore dans les sols Landais pour les peuplements forestiers de pin maritimes. Université de Bordeaux 1, p. 291.
- Adams, W.A., 1973. The effect of organic matter on the bulk and true density of some uncultivated podzolic soils. *Journal of Soil Science*, 24, 10–17.
- Aina, P.O., Periaswamy, S.P., 1985. Estimating available water-holding capacity of western Nigerian soils from soil texture and bulk density, using core and sieved samples. *Soil Science*, 140, 55–58.
- Ainsworth, C.C., Sumner, M.E., 1985. Effect of aluminum substitution in goethite on phosphorus adsorption. 2. Rate of adsorption. *Soil Science Society of America Journal*. 49 (5), 1149–1153.
- Ainsworth, C.C., Sumner, M.E., Hurst, V.J., 1985. Effect of aluminum substitution in goethite on phosphorus adsorption. 1. Adsorption and isotopic exchange. *Soil Science Society of America Journal*, 49 (5), 1142–1149.
- Amano, Y., 1981. Phosphorus status of some andosols in Japan. *T.A.R.C. (Japan)*, 15,1. 14-21 p.
- Andriamananjara, A., 2011. Système de culture à rotation Vouandzou - Riz Pluvial (ORYZA SATIVA) sur les Hautes Terres de Madagascar. Rôle du Vouandzou (VIGNA SUBTERRANEA) sur la biodisponibilité du phosphore dans les ferralsols. Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo - Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA) de Madagascar. 186 p.
- Andriamaniraka, J. H., 2009. Etude de modélisation du phosphore dans un sol cultivé de Madagascar en fonction des pratiques culturales. Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo - ESSA. 186 p.
- Andriamasy, H.L., 2015. Etude de modélisation du phosphore dans un sol cultivé de Madagascar en fonction des pratiques culturales. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master II. Université d'Antananarivo – Faculté des Sciences – Département Sciences de la Terre – Parcours : Ressources Minérales et Environnement. 102 p.
- Barrow, N.J., 1983. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. *Journal of Soil Science* 34: 733-750.
- Bellinaso, H., Demattê J.A.M., Romeiro S.A., 2010. Soil spectral library and its use in soil classification. *Revista Brasileiro de Ciência do Solo*, 34(3), 861-870.
- Boissezon, P., 1973. Les matières organiques dans les sols ferrallitiques. *ORSTOM*, p 9-66.
- Borggaard, O.K., Szilas, C., Gimsing, a. L., Rasmussen, L.H., 2004. Estimation of soil phosphate adsorption capacity by means of a pedotransfer function. *Geoderma* 118, 55–61.
- Brydon, J.E., Kodama, H., Ross, G.J., 1968. Mineralogy and weathering of clays in orthic podzols. *C.R. 9th Internat. Soil Congo (Adélaïde)*. 3 p.
- Calhoun, F.G., Smeck, N.E., Slater, B.L., Bigham, J.M., Hall, G.F., 2001. Predicting bulk density of Ohio soils from morphology, genetic principles, and laboratory characterization data. *Soil Science Society of America Journal*. 65, 811–819.
- Camargo, L.A., Marques, J., Pereira, G.T., Alleoni, L.R.F., 2012. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. *Catena* 100, 100–106.
- 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). *European Journal of Soil Science*. 60, 770–784.
- Chaminade, R., 1944. Les formes du phosphore dans les sols: nature et rôle des complexes phospho-humiques. Thèse de doctorat, Dunod. 53 p.
- Charlet, L., 2001. Les constituants des sols: signification de la charge électrique superficielle. L'acidification des sols: origine, approche, enjeux et maîtrise. 6–7.
- Chatelin, Y., 1974. Les sols ferrallitiques: L'altération. 24, 1-144.

- Clark, R.N., 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. Remote sensing for the earth sciences. Manual of remote sensing, 3, 3-58.
- Collomb, P., 1999. Une voie étroite pour la sécurité alimentaire d'ici à 2050. *Economica*.
- Cox, R., Bierman, P., Jungers, M.C., et al., 2009. Erosion Rates and Sediment Sources in Madagascar Inferred from <sup>10</sup>Be Analysis of Lavaka, Slope, and River Sediment. *The Journal of Geology*, vol. 117, p 363-376.
- Cox, R., Zentner, D.B., Rakotondrazafy A.F.M., Rasoazanamparany, C.F., 2010. Shakedown in Madagascar : Occurrence of lavakas (erosional gullies) associated with seismic activity. *Geology*, 38(2), 179-182.
- CPCS, 1967. Numérisé par l'Association Française pour l'Etude du Sol (www.afes.fr - 2011) pour mise à disposition de la communauté (avec corrections de Denis Baize) 100.
- CREAM, 2013. Monographie Alaotra Mangoro, 234 p.
- CREAM, 2013. Monographie Analamanga, 304 p.
- CREAM, 2013. Monographie Bongolava, 150 p.
- 19th World Congress of Soil Science, 2010. Soil sense: rapid soil measurements. *Soil Solutions for a Changing World*. Australia.135 p.
- Drouet, T., 2010. Pédologie. BING-F-302, 138 p.
- Dubus, G., Becquer, I., 2001. Phosphorus sorption and desorption in oxide rich Ferralsols of New Caledonia. *Soil Research*, 39, 403–414.
- Eisele, A.; Lau I.; Hewson, R.; Carter, D.; Wheaton, B.; Ong, C., Cudahy, T.J.; Chabrilat, S. and Kaufmann, H.; 2012. Applicability of the Thermal Infrared Spectral region for the Prediction of Soil Properties Across Semi-Arid Agricultural Landscapes. *Remote Sensing*, 4(11), 3265-3286.
- Fallavier P., 1996. Physico-chimie des sols tropicaux acides. pp. 23-39. In : Pichot J., Sibelet N., Lacoeuilhe J.J. (eds.). *Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides*. Montpellier, France, CIRAD.
- Fardeau, J., et Conesa, A. 1994. Le phosphore. Dans: *Bonneau et Souchier, Pédologie vol 2. Constituants et propriétés du sol*. Masson. 557 - 568 p.
- FAO, 1974. Carte pédologique de Madagascar.
- FAO, 2009. La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2014 Résumé.
- FAO, 2014. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *Soil resources reports*. 191 p.
- Fontes, M.P.F., Weed, S.B., 1996. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: Relationships with specific surface area and mineralogy. *Geoderma* 72, 37–51.
- Gérard, F., 2016. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils - A myth revisited. *Geoderma* 262, 213–226.
- Gérard, F., 2016. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils — A myth revisited. *Geoderma* 262, 213–226.
- Grinand, C., Rajaonarivo, a, Bernoux, M., Pajot, V., Brossard, M., Razafimbelo, T., 2009. Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols*, 16(1), 23–33.
- Guan, X.H., Chen, G.H., and Shang, C., 2007. Adsorption behavior of condensed phosphate on aluminum hydroxide. *Journal of Environmental Sciences*, 19(3), 312–318 p.
- Hammond, L.L., Chien, S.H., Mokwunye, A.U., 1986. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. *Advance in Agronomy* 40, 89-140.
- Harlem, B.G., Khalid, M., 1987. Rapport Brundtland.
- Henintsoa, M., Becquer, T., Rabeharisoa, L., Gerard, F., 2017. Geochemical and microbial controls of the effect of citrate on phosphorus availability in a ferralsol. *Geoderma*, 291, 33–39.
- Hervieu, J., 1967. Géographie des sols malgaches. Essai synthétique. ORSTOM, p 39-82.
- Heuscher, S.A., Brandt, C.C. & Jardine, P.M. 2005. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 51–56.
- Hinsinger, P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant Soil* 237, 173–195.
- Hollis, J.M., Hannam, J., Bellamy, P.H., 2012. Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils. *European Journal of Soil Science*, 63, 96–109.
- Huang, W.H., Keller, W.D., 1971. Dissolution of clay minerals in dilute organic acids at room temperature. *American Mineralogist*. 56 p.

- IUSS Working Group WRB, 2015. World reference base for soil resources 2014 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports 106, FAO, Rome.
- Janik, L. j., Merry, R.H., J.O., S., 1998. Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions?. *Animal Production Science*, 38(7), 681–696.
- Jeffrey, D.W. 1970. A note on the use of ignition loss as a means for the approximate estimate of bulk density. *Journal of Ecology*, 58, 297–299.
- Jenny, H., 1941. Factors of soil formation, a system of quantitative pedology. Dover publications, INC. New York, 191 p.
- King P.L., R. M. S., Swayze G.A, 2004. *Infrared Spectroscopy in Geochemistry, Exploration Geochemistry, and Remote Sensing.*, Mineralogical Association of Canada.
- Kononova, M.M., Aleksandrova, I.V., Titova, N.A.A, 1964. Decomposition of silicates by organic substances the soil. *Sov. Soil Sci*, 63, 1005-1014p.
- Lal, R., 1979. Physical characteristics of soils of the tropics: determination and management. In: Lal, R., Greenland, D.J. (Eds.), *Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 7–44.
- Le Mare, P.H., 1981. Phosphorus sorption and release. In: Greenland, D.J. (Ed.), *Characterization of Soils*. Clarendon Press, Oxford, pp. 97–134.
- Legros, J.P., 2007. *Les grands sols du monde*. Presse Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Leonaviciute, N. 2000. Predicting soil bulk and particle densities by pedotransfer functions from existing soil data in Lithuania. *Geografijos Metraštis*, 33, 317–330.
- Les Complexes Adsorbants Du Sol*, 2013. Chapitre V Chim. du sol 5ème versi, 110–137.
- Levesque, M., Schnitzer, M., 1967. Organo-métallique interactions in soils. 6. Préparation and properties of fulvic acid and metal phosphates. *Soil Science*, 103(3), 183-190.
- Madeira, J., Bedidi, A., Pouget, M., Cervelle, B., Flay, N., 1995. 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. Near-infrared spectroscopy in agriculture, (nearinfraredspe), 729-784.
- Malone B.P., Philip H., McBartney A.B., Minasny B., 2014. A model for the identification of terrons in the Lower Hunter Valley, Australia. *Geoderma Regional*, 1, 31 - 47.
- Manrique, L.A., Jones, C.A. 1991. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 476–481.
- McBratney, A.B., Mendonca Santos, M.L, Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3– 52.
- Minasny, B., Hartemink, A.E., 2011. Predicting soil properties in the tropics. *Earth-Science Reviews* 106(1), 52–62.
- Morel C. 2002. Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution. Considérations théoriques et analyses du cycle de P et du comportement des plantes dans les parcelles de grandes cultures. Mémoire d'HDR à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 80 p
- Morel, C., Le Clech, B., Linères, M., Pellerin, S. 2006. Gare à la baisse de la biodisponibilité du phosphore. *Alter Agri*, 79(3), 21-23.
- Mutuo, P.K., Shepherd, K.D., Albrecht, A., Cadisch, G., 2006. Prediction of carbon mineralization rates from different soil physical fractions using diffuse reflectance spectroscopy. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(7), 1658–1664.
- Parfitt, R.S., 1978. Anion adsorption by soils and soil materials. 30: 1-43.
- Parks, G. A., de Bruyn, P.L., 1962. The zero point of charge of oxides. *Journal of physical chemistry*, 66, 967-973.
- Pichot, J., et Roche, P., 1972. Phosphore dans les sols tropicaux. Communication au Séminaire sur la Fertilité des sols, Ibadan. 939-965 p.
- Pieri, C., 1975. Les propriétés électro-chimiques des colloïdes du sol et leurs conséquences agronomiques. 39 p.
- Pieri, C., 1977. Minéralogie et propriétés de surface de deux sols sableux du Sénégal. *Agronomic Tropical*, XXXII, 4, pp. 339-351.

- Olphen, V., 1977. Les charges du sol – La capacité d'échange. « The exchange capacity is a rather outstanding property of the clay ». 418 – 448 p.
- Ondo, J.A., 2011. Vulnérabilité des sols maraîchers du Gabon (région de Libreville) : acidification et mobilité des éléments métalliques. Thèse pour obtenir le grade de Docteur en Science de l'Environnement Terrestre. Université de Provence, 304 p.
- Rabeharisoa, L., 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. These de Doctorat de l'Université d'Antananarivo, specialite: Science de Sol. 202 p
- Rakotomanga, H.N.H., 2013. Evaluation des teneurs et du stock de phosphore (P) total et de son potentiel de rétention sur les sols d'une petite région agricole du Moyen Ouest de Madagascar. Mémoire pour l'obtention d'un diplôme de Master en Sciences Agronomiques. Athénée Saint Joseph Antsirabe, 96 p
- Ramaroson, H.V., 2012. Incidence des modes de gestion des sols et des restitutions organiques sur la disponibilité du phosphore dans un sol sur "Tanety" des Hautes Terres de Madagascar (cas d'Andranomanelatra). Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) en Pédologie Appliquée. Université d'Antananarivo - Faculté des Sciences. 89p.
- Randriamanantsoa, L., 2013. Effet d'apports de résidus de légumineuse et de fumier sur la phytodisponibilité du phosphore du sol dans un ferralsol du Moyen Ouest de Madagascar. Thèse de Doctorat de l'Université d'Antananarivo, spécialité: Sciences Agronomiques. 152 p
- Rawls, W.J., 1983. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Science* 135, 123–125.
- Razafimahatratra, H., 2011. Sols Malgaches et spectroscopie dans le Moyen Infrarouge: classification, caractérisation et sensibilité au climat. Thèse de Doctorat de l'Université d'Antananarivo, spécialité: Sciences Agronomiques. 242 p.
- Riquier, J., 1966. Définition et classification des sols ferrallitiques de Madagascar. ORSTOM, p 75-88.
- Robert, M., Razzaghe-Karimi, M., 1975. Mise en évidence de deux types d'évolution minéralogique des micas trioctaédriques en présence d'acides organiques hydrosolubles. *CR Acad. Sci. Paris, Ser. D*, 280, 2175-2178.
- Robert, M., Razzaghe, M.K., Vivente, M.A., Veneau, G., 1979. Rôle du facteur biochimique dans l'altération des minéraux silicatés. *Science du Sol*, 2-3, pp.
- Roederer, P., 1971. Les sols de Madagascar. ORSTOM, 56 p.
- Roy, R., 2007. Influence des altérations de surface naturelle sur la reconnaissance des roches par télédétection V-IR: application à la cartographie de l'ophiolite d'Oman et au programme d'étude des nouvelles AOC des Muscadet de la région nataise. sciences de la terre, télédétection. Nantes, Université de Nantes \_ faculté des sciences et des techniques: 480.
- Sanchez, P.A., Shepherd, K.D., Soule, M.J., Place, F.M., Buresh, R.J., Izac, A.N., Mokwunye, A.U., Kwesiga, F.R., Ndiritu, C.G., Woome, P.L., 1997. Soil Fertility Replenishment in Africa: An Investment in Natural Resource Capital Pedro. Replenishing soil Fertil. *Africa* 1–47.
- Schofield, R.K., 1949. Effect of pH on electric charges carried by clay particles. *Journal Soil Science*, 8 p.
- Sharpley, A.N., Ahuja, L.R., Yamamoto, M., Menzel, R.G., 1981. The kinetics of phosphorus desorption from soil. *Soil Science Society of America Journal* 45, 493-496
- Ségalen, P., Brion, J.C., 1981. *Pédochimie 1<sup>ère</sup> partie : les constituants minéraux des roches et des sols.* Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer – Services Scientifiques Centraux. 1184 p.
- Ségalen, P., 1994. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique. Tome 1, 2, 3. Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération. ORSTOM. Paris, 198 p.
- Ségalen, P., 1995. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique: les facteurs de formation et les sols ferrallitiques en Amérique. Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération., p. 169p.
- Sinha, M.K., 1971. Organo-metallic phosphates. I Interaction of phosphorous compounds with humic substances. *Plant Soil*, 35. 471-484 p.

- 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. *Applied Spectroscopy Reviews*, 49(2), 139-186.
- Sourisseau, A.J., Rasolofo, P., Belieres, J., Guengant, J., 2016. Document de travail Diagnostic Territorial de la Région du Vakinankaratra à Madagascar.
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M., Wetterlind, J., 2010. Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. *Advances in agronomy*, 107, 163-215.
- Stewart, V.I., Adams, W.A. & Abdulla, H.H. 1970. Quantitative pedological studies on soils derived from Silurian mudstones. II. The relationship between stone content and apparent density of the fine earth. *Journal of Soil Science*, 21, 248-255.
- Tamminen, P., Starr, M. 1994. Bulk density of forested mineral soils. *Silva Fennica*, 28, 53-60.
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671-7.
- Tranter, G., Minasny, B., McBratney, A.B., Murphy, B., McKenzie, N.J., Grundy, M. et al. 2007. Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density. *Soil Use & Management*, 23,437-443.
- Truche, C., 2013. Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain. *J. Chem. Inf. Model.* 53, 1689-1699.
- Uehara, G., Keng J., 1975. Management implications of soil mineralogy in Latin America. Publisher not identified. 351-363 p.
- UNPP, 2008. World Population Prospects The 2008 Revision Highlights. *Popul. English Ed.* 1-57.
- 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. *European Journal of Soil Science*, 63, 743-753.
- Viscarra Rossel, R.A., 2011. Fine-resolution multiscale mapping of clay minerals in Australian soils measured with near infrared spectra. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116, 1-15.
- Viscarra Rossel, R.A. & Behrens, T. 2010. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma*, 158, 46-54.
- Viscarra Rossel, R.A., McGlynn, R.N., McBratney, A.B., 2006a. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* 137, 70-82.
- 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.
- Wada, K., 1959. Reaction of phosphate with allophane and halloysite. *Soil Science*, 87, 6 p.
- Waithaisong, K., 2015. Effet de l'introduction d'une essence fixatrice d'aote sur le cycle du phosphore en plantations forestières tropicales. Thèse en Ecosystèmes et Sciences Agronomiques. Collège Doctorale du Languedoc-Roussillon – SupAgro Montpellier – UMR Eco&Sols. 264 p.
- Wang, X.M., et al., 2013b. Characteristics of phosphate adsorption-desorption onto ferrihydrite: comparison with well-crystalline Fe (Hydr)oxides. *Soil Sci.* 178 (1), 1-11.
- Wei, S., Tan, W., Liu, F., Zhao, W., Weng, L., 2014. Surface properties and phosphate adsorption of binary systems containing goethite and kaolinite. *Geoderma* 213, 478-484.
- Weng, L.P., Vega, F.A., Van Riemsdijk, W.H., 2011. Competitive and synergistic effects in pH dependent phosphate adsorption in soils: LCD modeling. *Environmental Science and Technology.* 45 (19), 8420-8428.
- Wey, R., 1953. Sur l'adsorption de l'anion phosphorique par la montmorillonite. *Comptes rendus hebdomadaires des seances de l'academie des sciences*, 236(12), 1298-1300.
- Wey, R., 1955. Sur l'adsorption, en milieu acide, d'ions  $PO_4H_2^-$  par la montmorillonite. *Bull. Group. Franç. Argiles.* 6 p.
- Young, M.D.B., Gowing, J.W., Hatibu, N., Mahoo, H.M.F., Payton, R.W., 1999. Assessment and development of pedotransfer functions for semi-arid sub-Saharan Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* 24, 845-849

*Chapitre 1. Les sols ferrallitiques, réactivité et disponibilité du phosphore, la spectrométrie infrarouge pour caractériser les sols : état de l'art.*

Zhang, H.X., Dong, Z., Tao, Z.Y., 2006. Sorption of thorium (W) ions on gibbsite: effects of contact time, pH, ionic strength, concentration, phosphate and fulvic acid. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 278(1), 46-52.