



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES



THESE

Présentée à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
pour l'obtention du diplôme de **Doctorat en Sciences Agronomiques**

SOLS MALGACHES ET SPECTROSCOPIE DANS LE MOYEN INFRAROUGE : CLASSIFICATION, CARACTERISATION ET SENSIBILITE AU CLIMAT

Par

RAZAFIMAHATRATRA Hery Manantsoa

Soutenue le 13 Mai 2011 devant le jury composé de :

| | | |
|--------------------------------------|---|--------------------|
| Jean Roger Emile RASOARAHONA | Professeur ESSAgro- Université d'Antananarivo | Président du jury |
| Amos Fety Michel RAKOTONDRAZAFY | Professeur Titulaire Faculté des Sciences- Université d'Antananarivo | Rapporteur externe |
| Jean Chrysostome RANDRIAMBOAVONJY | Professeur ESSAgro- Université d'Antananarivo | Rapporteur interne |
| Pax RAJAONERA | Professeur Titulaire Faculté des Sciences- Université d'Antananarivo | Examineur |
| Lilia RABEHARISOA | Professeur ESSAgro- Université d'Antananarivo | Directeur de thèse |
| Alain ALBRECHT | Directeur de Recherche IRD- Madagascar | Directeur de thèse |





UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES



THESE

Présentée à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
pour l'obtention du diplôme de **Doctorat en Sciences Agronomiques**

SOLS MALGACHES ET SPECTROSCOPIE DANS LE MOYEN INFRAROUGE : CLASSIFICATION, CARACTERISATION ET SENSIBILITE AU CLIMAT

Par

RAZAFIMAHATRATRA Hery Manantsoa

Soutenue le 13 Mai 2011 devant le jury composé de :

| | | |
|--------------------------------------|---|--------------------|
| Jean Roger Emile RASOARAHONA | Professeur ESSAgro- Université d'Antananarivo | Président du jury |
| Amos Fety Michel RAKOTONDRAZAFY | Professeur Titulaire Faculté des Sciences- Université d'Antananarivo | Rapporteur externe |
| Jean Chrysostome RANDRIAMBOAVONJY | Professeur ESSAgro- Université d'Antananarivo | Rapporteur interne |
| Pax RAJAONERA | Professeur Titulaire Faculté des Sciences- Université d'Antananarivo | Examineur |
| Lilia RABEHARISOA | Professeur ESSAgro- Université d'Antananarivo | Directeur de thèse |
| Alain ALBRECHT | Directeur de Recherche IRD- Madagascar | Directeur de thèse |

REMERCIEMENTS

Plus de trois ans se sont écoulés et me voilà au terme de cette thèse. Malgré ma persévérance, ce travail n'aurait pu aboutir sans la contribution de nombreuses personnes et entités à qui j'aimerais exprimer ma très vive reconnaissance.

- Je tiens à exprimer ma très vive reconnaissance à Madame Lilia RABEHARISOA, Professeur à l'Université d'Antananarivo, Département Agriculture de l'ESSA et Directeur du Laboratoire des Radioisotopes, à qui je dois la direction de cette thèse. Malgré ses multiples occupations, elle m'a enrichi de ses précieux conseils et a toujours su assurer le bon déroulement de ce travail.
- Je suis tout particulièrement reconnaissant à Monsieur Alain ALBRECHT, Directeur de Recherche à l'IRD, d'avoir accepté de codiriger cette thèse et pour la confiance qu'il m'a accordé toutes ces années depuis mon DEA. Ses conseils intarissables, le partage de connaissances et expériences qu'il a mené en matière de pédologie ainsi que sa rigueur scientifique ont permis la concrétisation du présent travail.
- Je voudrais vivement remercier Monsieur Jean Roger Emile RASOARAHONA, Professeur à l'École Supérieure des Sciences Agronomiques- Université d'Antananarivo et Directeur de l'ESSA, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette soutenance et d'avoir examiné ce travail.
- J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Jean Chrysostome RANDRIAMBOAVONJY, Professeur à l'École Supérieure des Sciences Agronomiques- Université D'Antananarivo, Département des Eaux et Forêts, qui a bien voulu accepter d'être rapporteur interne de ce travail malgré ses nombreuses responsabilités.
- Je souhaite également remercier Monsieur Amos Fety Michel RAKOTONDRAZAFY, Professeur titulaire à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, Département Géologie, pour m'avoir fait l'honneur d'être le rapporteur externe de cette thèse et pour son entière disponibilité malgré ses occupations.
- Je voudrais aussi remercier Monsieur Pax RAJAONERA, Professeur titulaire à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, Département de Chimie minérale et Chimie Physique, initiateur de la formation Doctorale option Chimie Minérale de la Faculté des Sciences (de 1975 à 2005), d'avoir voulu examiner ce travail et de siéger parmi les membres de jury malgré ses innombrables occupations.
- Je tiens à remercier Monsieur Clovis GRINAND, de m'avoir accompagné et aidé pour les travaux de terrain en traversant tout Madagascar durant des mois avec toutes les difficultés que nous avons dû surmonter ensemble. Il a encore apporté son assistance lors du traitement des données, je lui en suis reconnaissant.
- Je souhaite aussi remercier Monsieur Emmanuel FRITSCH, Directeur de Recherche à l'IRD, de m'avoir reçu durant mon passage auprès de l'Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux Condensés (IMPMC) à Paris. Il m'a partagé ses connaissances sur la minéralogie des sols et la spectroscopie infrarouge et m'a fait découvrir les appareils pour les études minéralogiques des matériaux.
- Que toute l'équipe du Laboratoire des Radioisotopes, mon laboratoire d'accueil à Madagascar, dirigé par la Professeur Lilia RABEHARISOA, chercheurs et techniciens, trouve ici mes sincères remerciements pour l'accueil logistique, pour leurs aides, conseils et assistance

dans une ambiance très conviviale durant ces années. Un grand merci à Madame Marie Paule RAZAFIMANANTSOA et à Monsieur Modeste RAKOTOARIMANANA, qui n'ont pas ménagé leurs efforts pour m'aider à la réalisation des analyses chimiques et spectrales sur des milliers d'échantillons de sol.

- Tous mes remerciements vont également à toute l'équipe de l'UMR 210 Eco&Sol, sous la direction du Docteur Jean Luc CHOTTE, d'avoir accepté de m'accueillir au sein de cette unité pendant mon séjour à Montpellier.
- Je tiens aussi à remercier mes aînées : Madame Tantely RAZAFIMBELO et Madame Herintsitohaina RAZAKAMANARIVO pour leurs partages d'expérience et leurs conseils afin d'améliorer ce travail. Sans oublier mes amis thésards et stagiaires pour leur amitié et sollicitude.
- Mes sincères remerciements à l'endroit des enseignants et techniciens du Département Agriculture de l'ESSA, dirigé par le Docteur Jean Chrysostome RAKOTONDRAVELO, pour leur collaboration et leur encouragement.
- Tous mes remerciements vont à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques de l'Université d'Antananarivo, sous la direction du Professeur Jean Roger Emile RASOARAHONA, ainsi qu'à tous les enseignants et le personnel administratif, pour avoir accepté mon inscription en thèse au sein de l'Ecole.

Cette thèse n'aurait pu avoir lieu sans la contribution financière des différents partenaires :

- Ma profonde reconnaissance au Projet Adaptation aux Changements Climatiques en Afrique (ACCA-MADAGASCAR) et au CRDI-Canada pour avoir financé le présent travail et avoir m'octroyé des bourses d'étude durant les 3 années de thèse. Cette thèse entre dans le cadre d'un partenariat entre le LRI, le Département Agriculture de l'ESSA et l'IRD à travers le projet ACCA. Merci beaucoup à toute l'équipe du projet : Lilia RABEHARISOA, Alain ALBRECHT, Jean Chrysostome RAKOTONDRAVELO, Jeannin RANAIVONASY, Nosy ALIZANY, Rivo RABARIJOHN, Samoelina RAMANANTSIALONINA, Holy RAHARINJANAHARY, Odette RASOHARIMALALA et Mamitiana RANAIVOARIVONY.
- Mes remerciements s'adressent également à la représentation de l'IRD à Madagascar et tout son personnel pour ses appuis logistiques.
- Je remercie aussi le Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) de l'Ambassade de France à Madagascar d'avoir soutenu financièrement mes séjours à Montpellier et à Paris.

Sans oublier toute ma famille pour leur encouragement, je suis particulièrement reconnaissant envers ma femme pour sa compréhension même dans des moments difficiles et pour son aide précieuse.

Et enfin mon petit bonhomme, celui qui n'a pas encore fait ses premiers pas quand j'ai débuté cette thèse alors qu'actuellement il sait déjà lire et écrire, qui constitue la source de ma motivation et à qui je dédie tout ce travail.

RESUME

Connaître la sensibilité actuelle des sols malgaches aux climats permettra de prédire la sensibilité future aux changements climatiques. Madagascar a la spécificité d'avoir à la fois une grande diversité de sols et de climats. Des prélèvements sur 119 sites couvrant les différents gradients climatiques ont été réalisés sur des parcelles sous *bozaka (aristida sp.)*. Les analyses ont été effectuées par le biais de la modélisation des couleurs du sol et par l'application de la technique de la spectrométrie moyen infrarouge (SMIR).

Les ferralsols, les cambisols, les nitisols, les luvisols, les arenosols, les vertisols et les calcari regosols sont les principaux groupes de sol identifiés. La caractérisation et la classification des sols à partir des spectres MIR ont démontré que les groupes de sol ont été discriminés par leur minéralogie. La méthode supervisée PLS-DA a permis de classer 88% des échantillons en calibration et 87% de ceux en validation. Ces mêmes spectres ont également permis de prédire la teneur en Al_{CBD} ($R^2= 0,85$ et $RPD= 2,48$), en argile + limon fin ($R^2= 0,88$ et $RPD= 2,85$), en carbone ($R^2= 0,79$ et $RPD= 2,14$) et le pH_{KCl} ($R^2= 0,76$ et $RPD= 2,05$).

La prédiction de la teneur en fer et en C à partir des modèles spatiaux de couleur a montré que ces deux constituants sont plutôt corrélés aux couleurs RVB qu'aux couleurs Munsell. Les meilleurs résultats en calibration ont été obtenus avec les ferralsols et le chroma CIE C ($R^2= 0,95$ et $RMSE= 2,88\%$) et avec les luvisols et la chromaticité x ($R^2= 0,86$ et $RMSE= 4,82\%$) pour le Fe_{cbd} et avec les arenosols et le chroma C ($R^2= 0,72$ et $RMSE= 1,34\%$), avec les ferralsols et la chromaticité u^* ($R^2= 0,63$ et $RMSE= 4,99\%$) et avec les nitisols et le chroma C ($R^2= 0,61$ et $RMSE= 2,96\%$) pour le carbone.

Les couleurs ne sont pas des indicateurs de la sensibilité des sols au climat. En revanche, les analyses de la sensibilité avec les spectres MIR ont montré que la kaolinite, la gibbsite et les composés organiques à base de C sont les plus sensibles à la température et à la pluviosité. L'étude de la dynamique du C avec le modèle RothC a permis de constater que le C est plutôt sensible aux changements d'usage des terres qu'aux changements climatiques. Malgré une augmentation jusqu'à 4°C de la température, les stocks de C du sol augmentent de 40% à 160% sur 200 ans et se stabilisent ensuite sur des parcelles sous *bozaka*.

En tant que travail d'exploration sur l'évaluation de la sensibilité des sols au climat, les résultats de la présente étude permettent de conclure que: les sols à texture argileuse (ferralsols, cambisols) sont plus sensibles au climat que les sols à texture sableuse (arenosols, luvisols).

Mots clés : sol malgache, spectrométrie infrarouge, classification, prédiction des propriétés, modélisation des couleurs, sensibilité au climat, carbone.

ABSTRACT

Understanding the current sensitivity of Malagasy soils to climate will permit to predict the future sensitivity to the climate changes. Madagascar has the specificity to display a large variety of soil types and climates. Samples from 119 sites covering climatic gradients were collected under natural vegetation mainly *Aristida pseudostep*. Analyses were performed through the modeling of soil color and use of mid infrared spectroscopy (MIRS).

Ferralsols, cambisols, nitisols, luvisols, arenosols, vertisols and calcaric regosols are the main soil groups identified. Characterization and classification of soils from the MIR spectra showed that soil groups were discriminated through their mineralogy. The supervised PLS-DA method was used to classify 88% of the calibration samples and 87% of those in validation. These same spectra were also used to predict the Al_{CBD} content ($R^2 = 0,85$ and $RPD = 2,48$), clay + fine silt content ($R^2 = 0,88$ and $RPD = 2,85$), soil carbon content ($R^2 = 0,79$ and $RPD = 2,14$) and pH_{KCl} ($R^2 = 0,76$ and $RPD = 2,05$). Iron and C content prediction from the spatial color models showed that these two components are rather correlated with RVB colors than the Munsell color. The best results in calibration were obtained with ferralsols and chroma CIE C ($R^2 = 0,95$ and $RMSE = 2,88\%$), luvisols and chromaticity x ($R^2 = 0,86$ and $RMSE = 4,82\%$) for Fe_{CBD} content, and with arenosols and chroma C ($R^2 = 0,72$ and $RMSE = 1,34\%$), with ferralsols and chromaticity u^* ($R^2 = 0,63$ and $RMSE = 4,99\%$) and with nitisols and chroma C ($R^2 = 0,61$ and $RMSE = 2,96\%$) for carbon content.

Soil color is not the best indicator for soil sensitivity to climate. In contrast, sensitivity analysis with MIR spectra showed that kaolinite, gibbsite and organic compounds are more sensitive to temperature and rainfall. RothC model for C dynamics showed that this component is more sensitive to land use changes than to climate changes. Despite an increase until 4°C of temperature, soil C stocks increased from up 40% to 160% over 200 years and then stabilize on *bozaka* plots. An exploration work results on soil sensitivity to climate assessment, this study concluded that: clayey soils (ferralsols, cambisols) are more sensitive to climate than sandy soils (arenosols, luvisols).

Key words: Malagasy soil, infrared spectrometry, classification, prediction of properties, color modeling, climate sensitivity, carbon.

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| CHAPITRE I - SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE | 5 |
| 1- SENSIBILITE DES SOLS AU CLIMAT | 5 |
| 1.1 CONCEPTS DE VULNERABILITE : SENSIBILITE, EXPOSITION ET ADAPTATION | 5 |
| 1.2 SERVICES ECOSYSTEMIQUES RENDUS PAR LE SOL..... | 7 |
| 1.3 ROLES ET INFLUENCES DES VARIABLES CLIMATIQUES SUR LES PROPRIETES DES SOLS..... | 10 |
| 2- CLIMAT ET SOL DE MADAGASCAR : REVUE SYNTHETIQUE..... | 12 |
| 2.1 LES PRINCIPAUX SOLS DE MADAGASCAR | 13 |
| 2.1.1 <i>Les études antérieures.....</i> | <i>13</i> |
| 2.1.2 <i>Classification française des sols (CPCS) de Madagascar</i> | <i>13</i> |
| 2.1.3 <i>Classification FAO des sols de Madagascar.....</i> | <i>19</i> |
| 2.2 LE CLIMAT ET LES REGIONS CLIMATIQUES DE MADAGASCAR..... | 22 |
| 2.2.1 <i>Température et pluviosité</i> | <i>22</i> |
| 2.2.2 <i>Les différentes régions climatiques</i> | <i>24</i> |
| 3- APPLICATION DE LA SPECTROMETRIE INFRAROUGE EN SCIENCE DU SOL..... | 25 |
| 3.1 PRINCIPES DE BASE..... | 26 |
| 3.2 INTERETS DE LA SPECTROMETRIE INFRAROUGE EN SCIENCE DU SOL..... | 28 |
| CHAPITRE II - MATERIELS ET METHODES | 29 |
| 1- CADRE CONCEPTUEL | 29 |
| 2- PRESENTATION DES SITES D'ETUDES ET METHODE D'ECHANTILLONNAGE..... | 30 |
| 2.1 SITES D'ETUDE..... | 30 |
| 2.2 ECHANTILLONNAGE | 35 |
| 3- METHODOLOGIE GENERALE | 36 |
| 3.1 EXTRACTION DES DONNEES PEDO-CLIMATIQUES PAR LE SIG | 36 |
| 3.2 DETERMINATION DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS | 37 |
| 3.2.1 <i>Densité apparente et humidité relative.....</i> | <i>37</i> |
| 3.2.2 <i>pH eau et pH KCl.....</i> | <i>37</i> |
| 3.2.3 <i>Analyse granulométrique</i> | <i>37</i> |
| 3.2.4 <i>Carbone organique :.....</i> | <i>37</i> |
| 3.2.5 <i>Forme du fer et de l'aluminium</i> | <i>38</i> |
| 3.2.6 <i>Bases échangeables.....</i> | <i>38</i> |
| 3.3 ANALYSES STATISTIQUES DES DONNEES..... | 38 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 3.4 | ANALYSES SPECTRALES ET CLASSIFICATION DES SOLS | 38 |
| 3.5 | MODELISATION ET PREDICTION DES PROPRIETES DES SOLS | 40 |
| 3.6 | PREDICTION DE LA TENEUR EN FER ET EN CARBONE A PARTIR DES COULEURS DU SOL | 40 |
| 3.7 | EVALUATION DE LA SENSIBILITE DU SOL A LA VARIABILITE CLIMATIQUE..... | 44 |
| 3.8 | ETUDE DE LA DYNAMIQUE DU CARBONE..... | 44 |
| CHAPITRE III – CLASSIFICATION DES PRINCIPAUX GROUPES DE SOL DE MADAGASCAR EN UTILISANT LA SPECTROMETRIE MOYEN INFRAROUGE | | 47 |
| 1- | INTRODUCTION..... | 47 |
| 2- | MATERIELS ET METHODES | 48 |
| 2.1 | ZONES D’ETUDES | 48 |
| 2.2 | ECHANTILLONNAGE | 49 |
| 2.3 | ANALYSE SPECTRALE | 50 |
| 2.4 | PRETRAITEMENT DES DONNEES..... | 50 |
| 2.5 | DECONVOLUTION DES SPECTRES POUR LES ANALYSES QUALITATIVES | 50 |
| 2.6 | CLASSIFICATION NON SUPERVISEE : K-MEANS CLUSTERING | 51 |
| 2.7 | CLASSIFICATION SUPERVISEE : PARTIAL LEAST SQUARES- DISCRIMINANT ANALYSIS | 51 |
| 2.8 | ANALYSE MULTIVARIEE ET DECONVOLUTION DES BANDES | 52 |
| 2.9 | TESTS DE CORRELATION | 52 |
| 2.10 | ANALYSES STATISTIQUES | 53 |
| 3- | RESULTATS ET DISCUSSION | 53 |
| 3.1 | CLASSIFICATION NON SUPERVISEE..... | 53 |
| 3.2 | CLASSIFICATION SUPERVISEE..... | 56 |
| 3.3 | ANALYSES QUALITATIVES | 58 |
| 3.4 | CORRELATION ENTRE LES METHODES K-MEANS ET PLS-DA..... | 65 |
| 4- | CONCLUSION..... | 66 |
| CHAPITRE IV - PREDICTION DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES DIFFERENTS GROUPES DE SOL DE MADAGASCAR PAR LA TECHNIQUE DE SPECTROMETRIE MOYEN INFRAROUGE (SMIR) | | 71 |
| 1- | INTRODUCTION..... | 72 |
| 2- | MATERIELS ET METHODES | 73 |
| 2.1 | ZONE D’ETUDE ET PRINCIPAUX GROUPES DE SOL..... | 73 |
| 2.2 | DESCRIPTION DES PROFILS PEDOLOGIQUES | 74 |
| 2.3 | ECHANTILLONNAGE ET PREPARATION DES ECHANTILLONS | 74 |
| 2.4 | ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES EN LABORATOIRE | 74 |
| 2.4.1 | <i>Texture</i> | 74 |

| | | |
|--|--|------------|
| 2.4.2 | Carbone organique..... | 75 |
| 2.4.3 | pH eau et pH KCl..... | 75 |
| 2.4.4 | Extraction des formes du fer et de l'aluminium..... | 75 |
| 2.4.5 | Humidité relative..... | 75 |
| 2.4.6 | Densité apparente..... | 75 |
| 2.4.7 | Bases échangeables..... | 75 |
| 2.5 | ANALYSES SPECTRALES..... | 75 |
| 2.6 | PRETRAITEMENT DES DONNEES..... | 76 |
| 2.7 | MODELISATION PAR DES ANALYSES STATISTIQUES..... | 76 |
| 2.7.1 | Sélection des lots de calibration et de validation..... | 76 |
| 2.7.2 | Régression PLS..... | 76 |
| 2.7.3 | Critères d'évaluation de la qualité de la prédiction..... | 76 |
| 3- | RESULTATS ET DISCUSSIONS..... | 77 |
| 3.1 | CARACTERISATION DES SOLS..... | 77 |
| 3.1.1 | Caractéristiques morphologiques des profils pédologiques..... | 77 |
| 3.1.2 | Propriétés physico-chimiques des groupes de sol..... | 80 |
| 3.2 | PREDICTIONS DES PROPRIETES DES SOLS..... | 83 |
| 3.2.1 | Statistiques descriptives des propriétés des sols analysées..... | 83 |
| 3.2.2 | Propriétés des spectres moyens par groupes de sol..... | 84 |
| 3.2.3 | Résultats des prédictions..... | 85 |
| 4- | CONCLUSION..... | 99 |
| CHAPITRE V - MODELISATION DES COULEURS DU SOL POUR LA PREDICTION DE LA TENEUR EN FER ET EN CARBONE ORGANIQUE..... | | |
| 103 | | |
| 1- | INTRODUCTION..... | 104 |
| 2- | MATERIELS ET METHODES..... | 107 |
| 2.1 | ZONE D'ETUDE ET ECHANTILLONNAGE..... | 107 |
| 2.2 | PREPARATION DES ECHANTILLONS ET ANALYSES EN LABORATOIRE..... | 107 |
| 2.3 | MESURE DES COULEURS..... | 108 |
| 2.4 | TRAITEMENT DES IMAGES..... | 109 |
| 2.5 | TRANSFORMATION DES COULEURS..... | 110 |
| 2.6 | TEST DE CORRELATION..... | 111 |
| 2.7 | ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE..... | 111 |
| 2.8 | MODELISATION : RELATION ENTRE COULEUR DU SOL ET TENEUR EN FER ET EN CARBONE..... | 111 |
| 3- | RESULTATS ET DISCUSSIONS..... | 112 |
| 3.1 | TENEUR EN C _{ORG} ET EN F _{ECBD} | 112 |

| | | |
|---|---|------------|
| 3.2 | VARIATION DES COULEURS MUNSELL AVANT ET APRES HUMECTATION | 113 |
| 3.3 | VARIATION DES COULEURS MESUREES AVEC L'APPAREIL PHOTO NUMERIQUE..... | 114 |
| 3.4 | CORRELATION ENTRE PROPRIETES DES SOLS ET MODELES DE COULEUR | 116 |
| 3.4.1 | <i>Corrélation avec les couleurs Munsell</i> | 116 |
| 3.4.2 | <i>Corrélation avec les couleurs RVB</i> | 117 |
| 3.5 | ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE..... | 120 |
| 3.6 | MODELES ENTRE Fe_{CBD} ET C_{ORG} ET PARAMETRES COULEURS | 123 |
| 3.6.1 | <i>Relations entre teneur en Fe_{CBD} et modèles de couleurs à l'état sec (RVB)</i> | 123 |
| 3.6.2 | <i>Relations entre teneur en C_{org} et modèles de couleurs à l'état humides (RVB)</i> | 125 |
| 4- | CONCLUSION..... | 127 |
| CHAPITRE VI - RELATIONS « SOL-CLIMAT » : ANALYSES DE LA SENSIBILITE DES PROPRIETES DES SOLS AU CLIMAT..... | | |
| | | 132 |
| 1- | INTRODUCTION..... | 133 |
| 2- | MATERIELS ET METHODES | 135 |
| 2.1 | SITES D'ETUDES | 135 |
| 2.2 | DONNEES SOLS..... | 135 |
| 2.3 | VARIABLES « COULEURS DE SOL » | 135 |
| 2.4 | DONNEES SPECTRALES | 135 |
| 2.5 | DONNEES SUR LES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES..... | 135 |
| 2.6 | DONNEES CLIMATIQUES | 136 |
| 2.6.1 | <i>Température et pluviosité.....</i> | <i>136</i> |
| 2.6.2 | <i>Evapotranspiration potentielle (ETP)</i> | <i>136</i> |
| 2.7 | ANALYSES DE LA SENSIBILITE..... | 136 |
| 2.7.2 | <i>Analyses qualitatives de la relation « propriétés des sols-climat »</i> | <i>136</i> |
| 2.7.3 | <i>Analyses en composante principale (ACP) entre propriétés des sols et climat:.....</i> | <i>136</i> |
| 2.7.4 | <i>Analyses en composante principale entre variables couleurs et climats.....</i> | <i>136</i> |
| 2.7.5 | <i>Régression linéaire du moindre carré partiel (PLSR) des variables couleurs</i> | <i>136</i> |
| 2.7.6 | <i>Régression linéaire du moindre carré partiel (PLSR) des spectres.....</i> | <i>137</i> |
| 2.8 | SIMULATION SUR LA DYNAMIQUE DU CARBONE ORGANIQUE DU SOL : MODELE ROTHC..... | 137 |
| 3- | RESULTATS ET DISCUSSIONS | 140 |
| 3.1 | PROPRIETES DES SOLS ET CLIMATS | 140 |
| 3.2 | EVALUATION DE LA SENSIBILITE AVEC LES COULEURS..... | 143 |
| 3.2.1 | <i>Analyse en composante principale.....</i> | <i>143</i> |
| 3.2.2 | <i>Régression entre variables de couleurs et variables climatiques</i> | <i>149</i> |
| 3.3 | EVALUATION DE LA SENSIBILITE AVEC LES SIGNATURES SPECTRALES..... | 151 |
| 3.3.1 | <i>Analyses en composante principale</i> | <i>151</i> |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.3.2 | <i>Régression entre signatures spectrales et variables climatiques</i> | 154 |
| 3.4 | SIMULATION ROTHC | 161 |
| 3.4.1 | <i>Stock de carbone et changement du climat</i> | 162 |
| 3.4.2 | <i>Stock de carbone et changement d'usage des terres</i> | 164 |
| 3.4.3 | <i>Changement du climat et changement d'usage des terres</i> | 165 |
| 4- | CONCLUSION | 167 |
| | CONCLUSION GENERALE, LIMITES ET PERSPECTIVES DE L'ETUDE | 176 |
| 1- | RAPPELS SUR LES OBJECTIFS | 176 |
| 2- | CONCLUSION | 176 |
| 2.1 | DISTRIBUTION DES SOLS SOUS DIFFERENTS TYPES DE CLIMAT | 176 |
| 2.2 | APPLICATION DE LA SPECTROMETRIE INFRAROUGE EN SCIENCE DU SOL | 177 |
| 2.2.1 | <i>Spectres MIR : outils pour la classification et la caractérisation des sols</i> | 177 |
| 2.2.2 | <i>Spectres MIR : outils de prédiction des propriétés des sols</i> | 180 |
| 2.3 | UTILISATION DES COULEURS POUR LA PREDICTION DES PROPRIETES DES SOLS | 181 |
| 2.4 | SENSIBILITE DES PROPRIETES DES SOLS A LA TEMPERATURE ET A LA PLUVIOSITE | 183 |
| 3- | LIMITES ET PERSPECTIVES DE L'ETUDE | 186 |
| 3.1 | LIMITES DE L'ETUDE | 186 |
| 3.1.1 | <i>Travaux sur le terrain</i> | 186 |
| 3.1.2 | <i>Travaux d'analyse en laboratoire</i> | 187 |
| 3.1.3 | <i>Travaux de traitement des données</i> | 187 |
| 3.2 | PERSPECTIVES POUR LES RECHERCHES FUTURES | 188 |
| 3.2.1 | <i>Affinage des résultats obtenus</i> | 188 |
| 3.2.2 | <i>Constitution d'une base de données spectrales des sols de Madagascar</i> | 188 |
| 3.2.3 | <i>Cartographie de la sensibilité des sols aux climats</i> | 189 |
| | ANNEXES | 201 |

LISTE DES ABREVIATIONS

| | |
|------------------------|--|
| ACP | : Analyse en composante principale |
| ALF | : Argile + Limon Fin |
| Al | : Aluminium |
| ALT | : Altitude |
| C | : Carbone |
| C_{org} | : Carbone organique |
| CBD | : Citrate- Bicarbonate- Dithionite |
| CEC | : Capacité d’Echange Cationique |
| CH₄ | : Méthane |
| CIE | : Commission Internationale de l’Eclairage |
| CO₂ | : Dioxyde de carbone |
| COS | : Carbone Organique du Sol |
| CPCS | : Commission de Pédologie et Cartographie des Sols |
| DA | : Densité Apparente |
| ETP | : Evapotranspiration potentielle |
| FAO | : Food and Agricultural Organisation |
| Fe | : Fer |
| FTIR | : Fourier Transform InfraRed |
| HVC | : Hue- Value- Chroma |
| IPCC | : InterGovernmental Panel on Climate Change |
| log | : logarithme décimale |
| meq | : milliéquivalent |
| MIR | : Moyen InfraRouge |
| OX | : Oxalate |
| PC | : Principal Component |
| PLS-DA | : Partiel Least Squares- Discriminant Analysis |
| PLSR | : Partial Least Squares Regression |
| Pluv | : Pluviosité |
| PPN | : Production Primaire Nette |
| Prec | : Précipitation |

| | |
|--------------|--|
| RMSEC | : Root Mean Squared Error in Calibration |
| RMSEP | : Root Mean Squared Error in Prediction |
| RPD | : Residual of prediction deviation |
| RothC | : Rothamsted Carbon |
| SIG | : Système d'Information Géographique |
| SNV | : Standard Normal Variate |
| RVB | : Rouge- Vert- Bleu |
| Temp | : Température |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1-1: Cadre des risques (la chaîne débute avec les aléas), le concept de vulnérabilité en ligne pointillée (Turner II <i>et al.</i> , 2003)..... | 6 |
| Figure 1-2: Les services écosystémiques (Millenium Assessment, 2005) | 8 |
| Figure 1-3 : Carte pédologique de Madagascar-classification CPCS (Delenne et Pelletier, 1981) | 16 |
| Figure 1-4 : carte pédologique de Madagascar- classification FAO (FAO, 1974) | 21 |
| Figure 1-5 : Carte de la pluviométrie et de la température moyenne annuelle de Madagascar (Raunet, 1997)..... | 23 |
| Figure 1-6 : Carte des régions climatiques de Madagascar (Raunet, 1998)..... | 24 |
| Figure 1-7 : Une portion d'un spectre lumineux | 26 |
| Figure 1-8a : Vibrations d'élongation (stretching) | 27 |
| Figure 1-8b : Déformation angulaire (bending)..... | 27 |
| Figure 2-1 : Cadre conceptuel de l'étude | 29 |
| Figure 2-2: Carte de localisation des sites de prélèvement | 31 |
| Figure 2-3 : Carte pédologique (FAO, 1974), carte de la pluviosité et de la température moyenne annuelle (Hijmans <i>et al.</i> , 2005) et localisation des sites de prélèvement. | 33 |
| Figure 2-4 : Groupes de sol prélevés en fonction de la température et de la pluviosité moyenne annuelle | 34 |
| Figure 2-5 : Carré de prélèvement | 35 |
| Figure 2-6: (a) Modèle de couleur Munsell représenté par un système de coordonnées cylindriques, (b) Modèle RGB, (c) Diagramme de chromaticité CIE xy, (c) Modèle d'espace de couleur CIEL u* v * et CIEL a * b * , d'après Viscarra Rossel <i>et al.</i> (2006a)..... | 42 |
| Figure 2-7 : Structure du modèle RothC..... | 45 |
| Figure 3-1: Carte pédologique de Madagascar (FAO, 1974) et localisation des sites de prélèvement | 49 |
| Figure 3-2: Spectres moyens et déconvolution de chaque cluster | 54 |
| Figure 3-3: Surface cumulée des constituants minéraux | 56 |
| Figure 3-4: ACP des 5 horizons reclassés avec la méthode PLS-DA (noir: ferralsols, rouge : cambisols-nitisols, bleu: calcaric regosols, gris: vertisols, vert: Luvisols, magenta: arenosols) | 59 |
| Figure 3-5: ACP de la moyenne des scores et leurs écarts types (■ Ferralsols, ◆ Cambisols-Nitisols, ▲ Arenosols, ✕ Luvisols, ○ Vertisols, ● Calcaric Regosols)..... | 60 |
| Figure 3-6: Déconvolution des spectres moyens de ferralsols, cambisols-nitisols, calcaric regosols, vertisols et déconvolution des loadings PC1, PC2, PC3, PC4 | 62 |
| Figure 3-7: Déconvolution des spectres moyens des arenosols et des luvisols, et déconvolution des loadings PC5, PC6..... | 63 |
| Figure 4-1: Variation de la densité apparente, des pH_{eau} et pH_{KCl} , de la teneur en argile, en limon et en sable sur 0-10 cm..... | 80 |
| Figure 4-2: Variation des différents constituants chimiques des sols sur 0-10 cm..... | 81 |

| | |
|--|-----|
| Figure 4-3 : Spectres moyens des groupes de sols étudiés..... | 84 |
| Figure 4-4 : Teneur en argile, en limon et en sable mesurées vs prédites en validation..... | 87 |
| Figure 4-5: Loading pour la prédiction des textures | 88 |
| Figure 4-6: Fréquence de distribution pour le C_{org} avant et après transformation en $\log C_{org}$ | 89 |
| Figure 4-7 : Teneurs en C_{org} mesurées vs prédites en validation..... | 90 |
| Figure 4-8: Loading pour la prédiction de la teneur en C_{org} | 90 |
| Figure 4-9 : Teneurs en Al_{CBD} , en Fe_{CBD} , en Al_{OX} et en Fe_{OX} mesurées vs prédites en validation (5 groupes de sol) | 92 |
| Figure 4-10: Loading pour la prédiction de la teneur en Al_{CBD} , en Fe_{CBD} , en Al_{OX} et en Fe_{OX} | 93 |
| Figure 4-11 : Teneur en Al_{CBD} mesurées vs prédites pour les ferralsols et les cambisols..... | 94 |
| Figure 4-12 : pH_{eau} et pH_{KCl} mesurés vs prédits | 95 |
| Figure 4-13 : Densité apparente et humidité relative mesurées vs prédites..... | 96 |
| Figure 4-14: Bases échangeables mesurées vs prédites | 97 |
| Figure 4-15: Loading pour les prédictions des bases échangeables | 98 |
| Figure 5-1 : Carte pédologique (FAO, 1974) et localisation des sites de prélèvements | 107 |
| Figure 5-2 : Transformation d'espace couleur (d'après Viscarra Rossel <i>et al.</i> , 2006)..... | 110 |
| Figure 5-3 : Variation du pourcentage des variables expliquées par les PC | 120 |
| Figure 5-4 : ACP des modèles spatiaux de couleur et la teneur en fer et en carbone..... | 122 |
| Figure 5-5 : Modèles pour la teneur en Fe_{CBD} à partir des paramètres de modèles de couleurs (RVB) | 124 |
| Figure 5-6 : Modèles pour la teneur en C_{org} à partir des paramètres de modèle de couleur (RVB) ... | 126 |
| Figure 6-2 : Température et pluviosité moyenne annuelle des sites étudiés..... | 138 |
| Figure 6-3 : Relation « température-pluviosité » des sites de prélèvement..... | 141 |
| Figure 6-4 : Relations entre température, pluviosité et certaines propriétés des sols..... | 142 |
| Figure 6-5: ACP (axe1-axe2) des variables climatiques et des variables couleurs issues des RVB à l'état humide (Temp : température, pluv : pluviosité) | 144 |
| Figure 6-6: ACP des variables climatiques et des variables issues des couleurs RVB à l'état sec | 145 |
| Figure 6-7: ACP des variables climatiques et des variables issues des couleurs Munsell à l'état humide | 147 |
| Figure 6-8: ACP des variables climatiques et des variables issues des couleurs Munsell à l'état sec. | 148 |
| Figure 6-9: Températures mesurées vs températures prédites..... | 150 |
| et pluviosités mesurées vs pluviosités prédites pour les nitisols..... | 150 |
| et les arenosols..... | 150 |
| Figure 6-10 : ACP des variables climatiques et des constituants du sol..... | 153 |
| Figure 6-11 : Coefficient de détermination R^2 des PLSR entre « spectres des sols et les variables température et pluviosité moyenne » par groupe de sol et sur 30cm de profondeur (F: ferralsols, C: cambisols, N: nitisols, A: arenosols, L: luvisols/ a: 0-10 cm, b: 10-20 cm, c: 20-30 cm) | 154 |

| | |
|---|-----|
| Figure 6-12 : Loading et température mesurée vs température prédite..... | 156 |
| Figure 6- 13 : Loading et pluviosité mesurée vs pluviosité prédite..... | 158 |
| Figure 6-14: Dynamique du stock total de carbone des sols nus (à gauche) et sous « <i>bozaka</i> en permanence» (à droite) entre 2008 et 2508 pour les 4 sites..... | 161 |
| Figure 6-15: Simulations sur le stock total de carbone ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) suivant les différents scénarii de changement climatique entre 2008 et 2508 | 162 |
| Figure 6-16: Pourcentage d'augmentation des stocks de C avec les scénarii de changement climatique | 162 |
| Figure 6-17: Stock total de carbone entre 2008 et 2508 pour les scénarii de changement d'usage des terres..... | 164 |
| Figure 6-18: Pourcentage de variation des stocks totaux de C pour les scénarii de changement d'usage des terres..... | 164 |
| Figure 6-19: Pourcentage de variation des stocks de C pour les scénarii combinés de changement du climat et de changement d'usage des terres | 166 |
| Figure 7-1 : Localisation des sites d'étude, spectres moyens par groupe de sol et résultat des ACP | 179 |
| Figure 7-2 : Synthèse de l'analyse de la sensibilité des sols au climat..... | 186 |

LISTE DES PHOTOS

| | |
|---|-----|
| Photo 2-1: Prélèvement au carottier sur 1 m de profondeur | 36 |
| Photo 2-2: Appareil pour l'analyse spectrale en MIR..... | 39 |
| Photo 2-3: Code Munsell, dispositif d'acquisition des photos, vue d'en haut de l'intérieur du dispositif, images issus de la numérisation | 41 |
| Photo 2-4: Diversité de couleur de quelques groupes de sol de Madagascar | 43 |
| Photo 4-1: Prélèvement au carottier sur 1m de profondeur | 79 |
| Photo 5-1 : (a) Identification des couleurs avec le Munsell colour chart, (b) dispositif pour la prise des photos, (c) vue d'en haut de l'intérieur du dispositif de prise de photo , (d) exemple d'image non traitée | 109 |
| Photo 5-2 : Echantillons secs et humides numérisés (par groupe de sol), région d'intérêt pour l'extraction des valeurs RVB | 115 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|-----|
| Tableau 1-1: Les services écosystémiques, les fonctions appropriées aux sols et l'utilisation des terres (d'après Haygarth et Ritz, 2009) | 9 |
| Tableau 1-2: Proportion des différentes classes de sol de Madagascar selon la carte de Delenne et Pelletier , 1981 (in Grinand <i>et al.</i> 2009)..... | 17 |
| Tableau 1-3 : Proportion des différentes classes de sol de Madagascar selon la carte FAO, 1974 | 20 |
| Tableau 2-1 : Groupes de sol prélevés | 34 |
| Tableau 3-1: Nombre d'échantillons de sol et les noms attribués sur le terrain | 50 |
| Tableau 3-2: Nombre de spectres par cluster | 53 |
| Tableau 3-3: Centres et surfaces analytiques des bandes correspondant à des éléments minéraux pour chaque cluster | 55 |
| Tableau 3-4: Résultats de la PLS-DA en calibration et en validation..... | 57 |
| Tableau 3-5: Coefficient de détermination R^2 entre les spectres moyens des résultants du K-means clustering et de la PLS-DA..... | 65 |
| Tableau 4-1: Descriptions des profils types (+++ : très abondant, ++ : abondant, + : faible) | 78 |
| Tableau 4-2 : Statistique sur les résultats des analyses physico-chimiques en laboratoire | 83 |
| Tableau 4-3 : Résultats des modèles en calibration et des prédictions en validation | 86 |
| Tableau 5-1: Nombre d'échantillon utilisé par groupe de sol..... | 108 |
| Tableau 5-2 : Statistiques descriptives pour la teneur en C_{org} et en Fe_{CBD} | 112 |
| Tableau 5-3 : Extraits des couleurs Munsell à l'état « secs et humides » pour les 5 groupes de sol étudiées | 113 |
| Tableau 5-4 : Statistiques descriptives des modèles de couleur..... | 116 |
| Tableau 5-5a : Corrélations entre teneur en C_{org} , en Fe_{CBD} et les modèles de couleurs Munsell..... | 118 |
| Tableau 5-5b: Corrélations entre teneur en C_{org} , en Fe_{CBD} et les modèles de couleurs RVB | 119 |
| Tableau 6-1 : Teneur en carbone et en argile des échantillons étudiés | 139 |
| Tableau 6-2 : Teneur en carbone des « entrées » utilisés..... | 139 |
| Tableau 6-3 : Scenarii utilisés pour le RothC..... | 140 |
| Tableau 6-4: Coefficient de détermination R^2 des PLS entre les variables climatiques et les couleurs du sol..... | 149 |

LISTE DES ANNEXES

| | |
|---|-----|
| Annexe 2.1 : Echantillonnage sur des zones de tanety sous bozaka..... | 201 |
| Annexe 3.1 : Corrélations entre clusters et spectres moyens en PLS-DA | 201 |
| Annexe 3.2 : Contributions des axes (valeurs propres) en % pour les ACP en classification supervisée | 202 |
| Annexe 3.3 : ACP des spectres en classification PLS-DA | 202 |
| Annexe 4.1 : Résultats des analyses en laboratoire sur 0-10 cm : Al _{CBD} , Fe _{CBD} , Fe _{OX} , Al _{OX} , C _{org} | 203 |
| Annexe 4.2 : Résultats de l'analyse granulométrique sur 20-30 cm..... | 204 |
| Annexe 4.3 : Résultats de la densité apparente et des pH du sol..... | 207 |
| Annexe 5.1 : Histogrammes de fréquence des modèles spatiaux de couleur Munsell à l'état sec.... | 210 |
| Annexe 5.2 : Histogrammes de fréquence des modèles spatiaux de couleur Munsell à l'état humide | 211 |
| Annexe 5.3 : Histogrammes de fréquence des modèles spatiaux de couleur RVB à l'état sec | 211 |
| Annexe 5.4 : Histogrammes de fréquence des modèles spatiaux de couleur RVB à l'état humide ... | 212 |
| Annexe 6.1 : Coefficients de détermination R ² et pente par groupe de sol pour les PLSR entre spectres et variables climatiques | 212 |
| Annexe 6.1 : Données climatiques des 4 sites utilisés pour la simulation avec le modèle RothC..... | 214 |
| Annexe 6.2 : Exemples de résultat complet d'une simulation RothC (Fe1, scénario S1 et Fe1, scénario SFO) | 214 |

INTRODUCTION GENERALE

A l'aube du troisième millénaire, les questions relatives aux changements climatiques ont pris de l'ampleur dans divers secteurs relevant directement ou non de l'environnement. Effectivement, les changements climatiques et les changements d'usage des terres constituent les deux futurs changements globaux majeurs prédits (Dale, 1997). L'attention porte particulièrement sur le réchauffement planétaire global. L'augmentation de la température aura un impact considérable sur l'écosystème. Une augmentation de 1°C de celle-ci modifiera plus de 10% de tous les écosystèmes terrestres (Leemans et Eickhout, 2004), sachant que ces derniers fournissent des services indispensables à la population : les services de prélèvements (nourriture, fibre, eau douce...), les services de régulation (régulation du climat, régulation de l'eau...), les services culturels (beauté écologique, agrément et écotourisme...) et les services d'auto-entretien (production primaire, formation du sol...). Le secteur agricole fait partie du domaine le plus sensible et qui serait influencé par le réchauffement climatique global et les changements du climat associés (Lal et *al.*, 1998). Selon la FAO (2007), pour le cas des pays en développement, les changements climatiques pourront affecter 11% des terres cultivables. Les impacts des changements auront des répercussions sur les cultures et sur les sols. Pour le cas du sol en particulier, objet de la présente étude, le climat agit sur leurs propriétés. Les problématiques liées à une éventuelle baisse de la fertilité des sols dues aux impacts du climat préoccupent tant les scientifiques que les agriculteurs. La température et la pluviosité constituent les variables climatiques les plus impliquées dans ce contexte. Les projections sur l'évolution future du climat annoncent une augmentation de la température à la surface de la terre ainsi qu'une diminution de la pluviosité dans certains endroits (IPCC, 2007). Afin d'atténuer les effets des variabilités et des changements climatiques et de pouvoir identifier une stratégie d'adaptation plus adéquate, il faut dans un premier temps évaluer le degré de sensibilité et de vulnérabilité des sols au climat. En effet, l'analyse de la vulnérabilité est un élément de départ pour la détermination des moyens efficaces pour la recherche des stratégies d'adaptation (Kelly et Adger, 2000). La connaissance des propriétés des sols sensibles aux climats contribuera au choix et à l'adoption des modes de gestion les plus appropriés dans l'optique d'une diminution des effets des changements du climat sur la production agricole.

L'agriculture a été avancée comme le mode d'utilisation des terres le plus dominant. A l'échelle mondiale, la superficie totale cultivée est estimée à 1,2-1,5 milliards d'hectares (Howden *et al.*, 2007). A Madagascar, elle est de l'ordre de 2 083 590 ha (Ministère de l'Agriculture, 2004). Le secteur primaire réunissant l'élevage, l'agriculture et la pêche génère les 26,7% du produit intérieur brut (PIB) de la grande île (INSTAT, 2009).

Alors que l'accroissement démographique continue sa lancée, celui des surfaces cultivées semble en stagnation. Afin de satisfaire les besoins en nourriture, les formes d'intensification agricole constituent une alternative à l'extension des surfaces cultivées. Des événements naturels conduisant à une diminution des productions agricoles ne feront qu'amplifier la

situation d'insuffisance alimentaire qui prévaut actuellement dans plusieurs pays. L'état de fertilité des sols conditionne impérativement les rendements des cultures. Le mode de gestion des sols a des impacts non seulement sur la production actuelle mais également sur la potentialité future de ces sols.

Situé dans une zone tropicale, Madagascar a le privilège d'avoir à la fois une grande diversité de sols et de climats. Un même type de sol se retrouve dans diverses zones climatiques. Cette situation laisse comprendre que les relations « sol-climat » peuvent être appréhendées à l'échelle du pays. En conséquence, l'existence des gradients de température et de pluviosité permettra d'analyser la dynamique des propriétés physico-chimiques d'un même sol sous différentes conditions climatiques. Cette approche à grande échelle, dictée notamment par les gradients climatiques, requiert un échantillonnage très important et géographiquement très étendu et par la suite des travaux d'analyse en laboratoire. Les coûts des analyses physico-chimiques limitent toujours le nombre d'échantillons à utiliser. Ainsi, la recherche des nouvelles techniques pour remplacer les analyses conventionnelles des sols est plus que nécessaire. En science du sol, deux nouvelles techniques ont été développées ces dernières années : celle utilisant les couleurs du sol en tant que variables de prédiction des teneurs en fer et en carbone organique et celle appliquant l'utilisation de la spectrométrie infrarouge. Ce sont des techniques simples, non destructives, nettement reproductibles, rapides et surtout moins coûteuses par rapport aux techniques conventionnelles (Viscarra Rossel *et al.*, 2006).

L'évaluation de la sensibilité des sols au climat nécessite donc le développement d'une nouvelle méthode à partir de ces techniques de prédiction des propriétés des sols. Le but est d'identifier les constituants les plus sensibles à la température et à la pluviosité. La connaissance de la sensibilité actuelle des constituants du sol permettra de réaliser une prédiction de leur sensibilité avec les changements futurs du climat. Ces connaissances serviront de base pour toute action visant à améliorer les stratégies d'adaptation des systèmes agraires malgaches selon leur localisation et les conditions climatiques locales.

A Madagascar, la présence d'une large palette de zones climatiques où sont distribués différents types de sol informe que les sols ne subissent pas les mêmes types de stress liés au climat. A titre d'exemple le cas des sols ferrallitiques : ils sont distribués sous un climat perhumide à l'Est, sous un climat humide au centre et subhumide sur la partie Ouest.

Tous ces contextes nous ont permis de formuler la problématique centrale de la présente étude. La question se pose ainsi : « **les sols malgaches sont-ils sensibles aux changements et à la variabilité climatique ?** ».

Pour appréhender le questionnement susmentionné, la présente étude se fixe pour objectif général de :

- Développer une méthode de classification des principaux groupes de sol de Madagascar à partir de leurs signatures spectrales dans le moyen infrarouge
- Utiliser la technique de spectrométrie infrarouge et modéliser la couleur des sols afin prédire les propriétés des sols en se basant sur les résultats de la classification
- Analyser d'une part les relations entre les propriétés des sols et les variables climatiques et d'autre part, identifier les constituants sensibles à la température et à la pluviosité par le biais des couleurs et des signatures spectrales des sols.

Les hypothèses de recherche suivantes sont testées :

Hypothèse 1 : La spectrométrie moyen infrarouge permet d'une part de caractériser et de classer les sols tropicaux de Madagascar et d'autre part de prédire leurs propriétés.

Hypothèse 2 : La couleur du sol constitue un outil adéquat pour la prédiction de la teneur en fer et en carbone organique du sol.

Hypothèse 3 : La couleur du sol peut être utilisée comme indicateur de sensibilité des sols.

Hypothèse 4 : Les effets du climat sur les propriétés des sols peuvent être appréhendés à travers leurs signatures spectrales.

Hypothèse 5 : Le carbone organique et ses produits dérivés constituent les principaux constituants du sol les plus sensibles à la variabilité climatique.

Les méthodologies générales utilisées au cours de cette étude sont développées en premier lieu dans le Chapitre 2.

L'hypothèse 1 est testée par la méthode de classification supervisée et non supervisée des spectres dans le moyen infrarouge (MIR) des sols prélevés dans plusieurs sites dans tout Madagascar (Chapitre 3). Ces spectres sont ensuite utilisés pour la modélisation des propriétés physico-chimiques des sols afin de réaliser un travail de prédiction (Chapitre 4).

En se basant sur les résultats de la classification des principaux groupes de sol dans le chapitre 3, l'hypothèse 2 est ensuite vérifiée par la mesure et la modélisation de la teneur en fer et en carbone du sol à partir de leur couleur et suivant leur groupe respectif (Chapitre 5).

Les hypothèses 3, 4 et 5 sont testées par l'évaluation des relations entre les variabilités des variables climatiques et les propriétés des sols à travers leurs signatures spectrales et leurs couleurs (Chapitre 6).

Par conséquent, cette thèse est divisée en 6 chapitres :

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

Chapitre 2 : Méthodologies générales pour des analyses qualitatives et quantitatives des signatures spectrales des sols, une modélisation de leur couleur et une étude de leur relation avec les variables climatiques.

Chapitre 3 : Classification des principaux groupes de sol de Madagascar en utilisant leur signature spectrale.

Chapitre 4 : Prédiction des propriétés physico-chimiques des différents groupes de sol à partir des spectres MIR.

Chapitre 5 : Mesure et modélisation des couleurs du sol pour une prédiction de la teneur en fer et en carbone organique

Chapitre 6 : Analyse de la sensibilité des propriétés du sol à la variabilité climatique.

Le chapitre 3 a fait l'objet de 2 communications scientifiques durant les 10ème rencontres internationales HELIOSPIR, en septembre 2010 à Montpellier (Agropolis International). Cette manifestation scientifique se rapporte au thème de « l'application de la spectrométrie infrarouge en science du sol ». Ce chapitre sera soumis prochainement à la revue Geoderma.

CHAPITRE I - SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1- SENSIBILITE DES SOLS AU CLIMAT

1.1 CONCEPTS DE VULNERABILITE : SENSIBILITE, EXPOSITION ET ADAPTATION

La problématique liée aux changements climatiques continue de préoccuper autant la communauté scientifique mondiale que les politiques publiques en général. Différents sommets et protocoles ont déjà été tenus afin de juguler l'émission des gaz à effet de serre. Parmi ces protocoles : le protocole de Montréal en 1987 qui visait à réduire de moitié les substances qui appauvrissent la couche d'ozone, la convention-cadre des nations unies sur le changement climatique (CCNUCC) en 1992 à Rio de Janeiro portant sur la stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le protocole de Kyoto a vu le jour en 1997 : les pays industrialisés ont pris des engagements quantifiés pour une réduction de 5,2 % des émissions des 6 gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, HFC, PFC) entre la période de 2008 à 2012 par rapport à l'année de référence (1990). Prévu expirer en début 2013, ce protocole de Kyoto a dû être remplacé d'où le sommet de Copenhague sur le climat en 2009 qui s'était soldé par un échec. En 2010, un nouveau sommet a eu lieu à Cancun (Mexique). Plusieurs accords ont été adoptés à Cancun, entre autres la création d'un fond vert pour aider les pays en développement à faire face au réchauffement du climat.

Le réchauffement planétaire figure toujours au premier plan quant à l'effet du changement du climat. Depuis 1850, l'année à partir de laquelle on disposait d'un enregistreur de la température de surface, 11 des 12 dernières années font partie des 12 années les plus chaudes. Dans le monde, les projections indiquent une augmentation de la température moyenne à la surface de la terre de 1,4°C à 5,8°C entre 1990 et 2100 (IPCC, 2001). Dans l'Océan Indien, les analyses démontrent un réchauffement entre 0 et 0,5°C par décennie entre 1971 et 2004 (IPCC, 2007). Pour la période située entre 2010 et 2039, une supposition pour la tendance future estime une augmentation comprise entre 0,51 et 0,98°C et une variation de -5,4 à 6% pour les précipitations dans l'Océan Indien (IPCC, 2007). A l'échelle planétaire, les effets du réchauffement climatique diffèrent d'une région à l'autre. La montée du niveau de la mer, due à la fonte des glaces, menace certaines zones côtières, menaçant certaines îles de disparition. Dans les pays tropicaux, à part l'augmentation de la température moyenne, on assiste à une mauvaise répartition (voir une diminution) de la pluviosité annuelle. Le degré d'incidence de ces changements ou variabilités du climat sur la population et sur les différentes composantes de l'écosystème en général dépendra surtout de leur niveau de vulnérabilité. L'agriculture des pays en développement sont les plus vulnérables aux événements climatiques extrêmes. Géographiquement, les populations vivant dans des zones arides ou semi-arides, dans des zones côtières de faible élévation, dans des zones assujetties à l'inondation ou encore sur des petites îles sont particulièrement les plus vulnérables (Mirza, 2003).

Le terme « vulnérabilité » est de plus en plus utilisé dans différents domaines (social, économique, environnement,...). Plusieurs définitions ont été avancées pour définir la vulnérabilité : c'est la susceptibilité de subir un dégât (Luers, 2005), c'est la susceptibilité d'être affecté par l'exposition aux stress liés au changement social et environnemental, et en l'absence de la capacité de s'adapter (Adger, 2006), c'est le degré pour lequel un système est susceptible (ou incapable) à faire face aux effets défavorables des changements climatiques, y compris la variabilité du climat et les événements extrêmes (IPCC, 2001). La vulnérabilité est fonction de la sensibilité (ou l'exposition) d'un système à un choc, les stress ou perturbations, l'état initial du système par rapport au seuil de la catastrophe et la capacité du système à s'adapter aux conditions de changement (Luers, 2005). D'après Adger (2006), la vulnérabilité est une fonction du caractère, de la magnitude et le taux de variation du climat pour lequel le système est exposé, sa sensibilité ainsi que ses capacités d'adaptation.

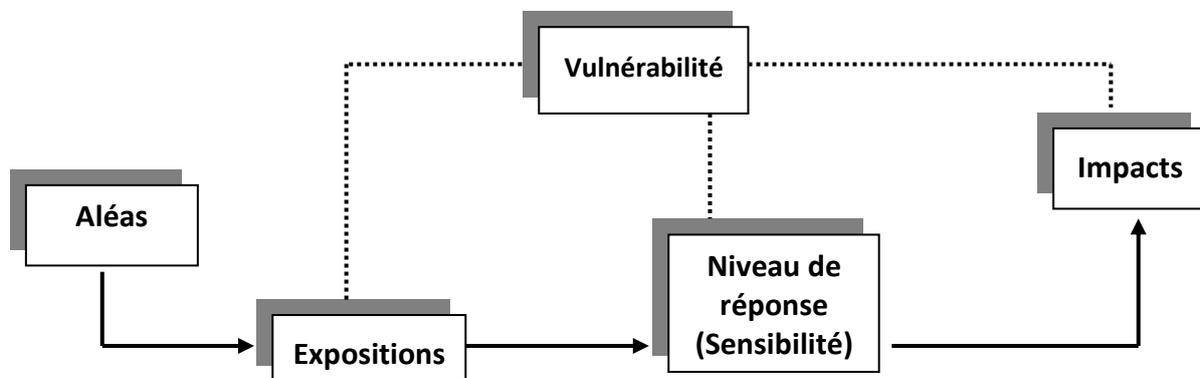


Figure 1-1: Cadre des risques (la chaîne débute avec les aléas), le concept de vulnérabilité en ligne pointillée (Turner II *et al.*, 2003)

En principe, les principaux facteurs déterminants de la vulnérabilité d'un système sont « leur sensibilité, leur niveau d'exposition et leur capacité d'adaptation ». La sensibilité et l'exposition sont nécessairement liées. La vulnérabilité concerne non seulement l'exposition aux risques (perturbation ou stress) mais elle réside également à sa sensibilité et au niveau de résilience du système (Turner II *et al.*, 2003, Polsky *et al.*, 2007). Un système sensible mais non exposé à un risque climatique potentiel n'est pas vulnérable et vice versa malgré qu'il soit exposé, le système n'est pas sensible donc non vulnérable. Le niveau de vulnérabilité pour chaque système dépendra par contre de leur capacité à s'adapter aux changements. La sensibilité est définie comme la proportion dans laquelle un système est influencé, favorablement ou défavorablement, par des stimuli liés au climat et au mode d'usage (IPCC, 2001). Il s'agit du degré pour lequel chaque système pourra répondre à une force de dérangement extérieure (Luers, 2005). Quant à l'exposition, elle parle des caractéristiques des forces qui pourraient stresser le système. En principe, un système ne peut être vulnérable que s'il est exposé et pourra être moins vulnérable s'il est moins sensible malgré l'exposition.

L'augmentation ou le renforcement de la capacité des systèmes à s'adapter à des nouvelles conditions (dues à des perturbations, des stress liés au climat...) nécessite non seulement la connaissance des risques mais surtout la mesure du niveau de vulnérabilité. Les cadres de travail sur la vulnérabilité reconnaissent l'existence du système couplé « homme-environnement » (Turner II *et al.*, 2003). Le concept de système couplé « homme-environnement » est utilisé pour mettre en évidence le fait que les systèmes humains et environnementaux ne sont pas des entités séparées (Schröter *et al.*, 2005). Dans la littérature, il est extrêmement difficile de trouver des consensus sur le mode de structuration et d'évaluation de la vulnérabilité du système « homme-environnement » (Polsky *et al.*, 2007). Nombreux sont les chercheurs qui proposent leurs propres démarches scientifiques pour diriger un travail d'évaluation de la vulnérabilité à la variabilité climatique.

1.2 SERVICES ECOSYSTEMIQUES RENDUS PAR LE SOL

Les effets des variables climatiques sur les propriétés du sol se répercutent de manière directe ou indirecte sur les services rendus par le sol. Il est donc capital de connaître les divers services offerts par le sol à la population. En effet, les humains demeurent toujours dépendants de la nature, par le biais des biens environnementaux comme l'eau, les nutriments et la formation des sols (Swift *et al.*, 2004, Tallis et Kareiva, 2005). L'écosystème terrestre offre de nombreux services vitaux à la population et à la société en général (Metzger *et al.*, 2006). Communément connu sous le nom de « services écosystémiques », il s'agit des bénéfices tirés par la population de l'écosystème naturel (Millenium Assessment, 2005 ; Costanza *et al.*, 2007). Pourtant, ces services ne sont pas entièrement connus par la population (Guo *et al.*, 2001). Une classification des services écosystémiques a été élaborée par le Millenium Assessment en 2005 :

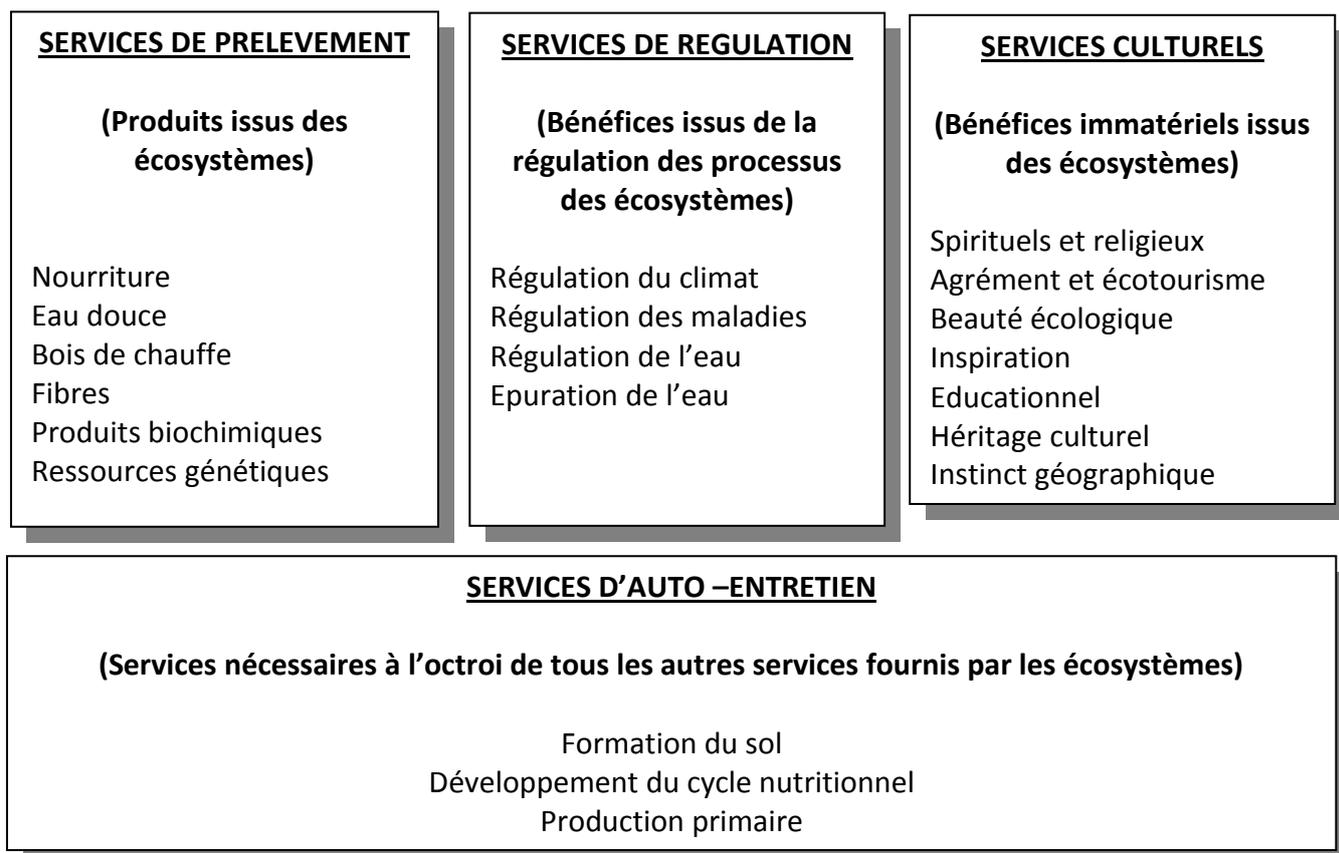


Figure 1-2: Les services écosystémiques (Millenium Assessment, 2005)

La figure 1-2 montre les différents services qu'offrent les écosystèmes à la population. La capacité future des écosystèmes à offrir ces services est déterminée par les changements des caractéristiques socio-économiques, l'usage des terres, la biodiversité, la composition atmosphérique et le climat (Metzger, 2006). Le sol, un des compartiments de l'écosystème, rend divers services à l'homme. Il entre directement dans la catégorie des « services d'auto-entretien ». Indissociée aux sols, l'agriculture reste la forme la plus dominante de l'utilisation des terres (Dale et Polsky, 2007). Généralement, les services rendus par l'agriculture à la population concernent l'approvisionnement en nourriture, en combustion et en fibres (Swinton *et al.*, 2007). Ainsi, les sols contribuent également à l'octroi des « services de prélèvement ». Le tableau ci-après récapitule les différentes fonctions assurées par les sols dans l'octroi des différentes classes de services écosystémiques :

Tableau 1-1: Les services écosystémiques, les fonctions appropriées aux sols et l'utilisation des terres (d'après Haygarth et Ritz, 2009)

| Classes de service | Services écosystémiques rendus | Fonctions assurées par le sol |
|--------------------|--|--|
| PRELEVEMENTS | <ul style="list-style-type: none"> - Production primaire - Formation des sols - Cycles des nutriments | <ul style="list-style-type: none"> - Support pour les végétations - Processus de formation du sol - Stockage, cycles internes, transformations des nutriments |
| AUTO-ENTRETIENS | <ul style="list-style-type: none"> - Refuges - Réservoirs d'eau - Approvisionnement en nourriture - Biomatériaux - Matériaux premiers | <ul style="list-style-type: none"> - Octroi d'habitats pour les résidents et les populations de passage - Rétention d'eau dans le paysage - Approvisionnement pour la croissance des plantes - Approvisionnement pour la croissance des plantes - Approvisionnement en matériaux de sources |
| REGULATIONS | <ul style="list-style-type: none"> - Régulation de la qualité de l'eau - Régulation de l'offre en eau - Régulation du climat - Contrôle de l'érosion | <ul style="list-style-type: none"> - Epuration (filtration) de l'eau - Régulation des flux hydrologiques - Régulation de la température et de la pluviosité mondiale et autres médiations biologiques des processus climatiques - Rétention du sol au sein de l'écosystème |
| CULTURELS | <ul style="list-style-type: none"> - Agrément - Cognitive - Héritage | <ul style="list-style-type: none"> - Offre une plateforme pour les activités de récréation - Opportunité pour des activités non commerciales - Détient le record archéologique de l'occupation terrestre et des civilisations |

Ce tableau montre que les sols contribuent à différentes échelles à la fourniture des services écosystémiques. Quant aux rôles directs des sols (services directs rendus par le sol) : les cycles nutritionnels dans le sol assurent le renouvellement des nutriments et la libération de ces nutriments pour les plantes (Zhang *et al.*, 2007). Les sols retiennent et filtrent les eaux et les stockent afin de les mettre à disposition des plantes. Les sols constituent une source de matériaux comme l'argile (Dominati *et al.*, 2010). Ce sont aussi les matières organiques du sol qui offrent une grande partie des nutriments minéraux essentiels à la croissance des plantes, le carbone du sol joue un rôle majeur sur la structure du sol, et les agrégats du sol sont formés par des particules minérales provenant des produits d'altération et de décomposition (Swinton *et*

al., 2007). La nature des agrégats détermine la qualité de l'infiltration et de la rétention en eau, ainsi que la porosité et l'aération du sol.

Pourtant, les services écosystémiques rendus par le sol sont fortement tributaires de leurs modes de gestion. On peut citer à titre d'exemple la quantité d'eau retenue et disponible pour les plantes qui pourront diminuer de façon significative suite à des pertes en terre par érosion. L'érosion a toujours été considérée comme le résultat d'une mauvaise gestion des terres, notamment en milieu cultivé.

1.3 ROLES ET INFLUENCES DES VARIABLES CLIMATIQUES SUR LES PROPRIETES DES SOLS

Les sols sont tributaires de nombreux facteurs : climat, roches, végétation, homme,... (Roederer, 1971). Le climat constitue un facteur très important dans la pédogénèse. L'eau de pluie constitue un des agents de l'altération des roches (Segalen, 1994). Dans les zones chaudes et humides, l'hydrolyse demeure le processus dominant (Duchaufour, 1991). Le climat (par le biais de la pluviosité et de la température) participe activement à la désagrégation mécanique des roches, après fissuration de ces dernières par des contraintes tectoniques. L'altération chimique se produit également grâce à la présence des eaux de pluie combinée à un niveau assez élevé de la température. Cette altération chimique comprend la dissolution, l'hydratation, l'oxydo-réduction et l'hydrolyse. En surface, l'eau de pluie cause également l'érosion hydrique. L'érosion hydrique est un phénomène de dégradation qui affecte de larges surfaces des sols dans des zones intertropicales et méditerranéennes (Barthès et Roose, 2001). Elle dépend à la fois de la quantité des pluies, de leur intensité et leur énergie (Nearing *et al.*, 2005).

Au niveau des propriétés physico-chimiques des sols, les deux variables climatiques qui interviennent le plus sont la pluviosité et la température. L'augmentation de la pluviosité et de la température a des conséquences sur l'altération des roches et sur la quantité d'argile néoformée (Alvarez et Lavado, 1998). L'intervention de la température se fait par une accélération de la vitesse d'altération des roches en augmentant le degré de dissociation de l'eau, qui provoque l'augmentation de l'action dissolvante de cette dernière. La teneur en argile du sol augmente ainsi avec ces phénomènes pour certains types de roches mères. Durant l'altération des minéraux dépourvus de fer par exemple, l'eau intervient à la néoformation des pyrophyllites, des kaolinites et des gibbsites. Les réactions ci-après (d'après Segalen, 1994) montrent l'altération du feldspath potassique, les produits néoformés sont fonction de l'abondance en eau et le niveau de drainage :



**L'eau est peu abondante et l'acide silicilique est partiellement évacuée*



***L'eau est abondante et un bon drainage a permis une évacuation en grande partie des acides siliciliques. Les silices restantes ont eu des réactions avec l'aluminium pour former la kaolinite*



****L'eau est très abondante et un très bon drainage a évacué la totalité des silices. L'aluminium se précipite sous forme d'hydroxyde pour former les gibbsites.*

Pour les minéraux ferro-magnésiens, la cristallisation des oxydes de fer amorphes est favorisée par les alternances d'humectation et de dessiccation et la température élevées du pédoclimat (Duchaufour, 1991). Les 2 principales formes cristallines sont la goethite et l'hématite. La goethite (αFeOOH) est souvent abondante dans des sols à longue saison de pluie. Elle est le responsable de la couleur jaune à brunâtre des sols. L'hématite ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) de couleur rouge est favorisée par les climats chauds, à saisons contrastées (saisons sèches). La goethite résulte d'une cristallisation progressive tandis qu'elle est beaucoup plus rapide pour l'hématite. Les éléments minéraux du sol constituent ce qu'on appelle « **des variables lentes** ». Les effets du climat sur ces éléments ne se manifestent qu'au bout d'une échelle de temps beaucoup plus long, voir même au bout de quelques milliers ou millions d'années.

Le développement de la structure du sol est aussi affecté par les variables climatiques. A part les autres facteurs comme les activités biologiques, la teneur en matière organique et la texture du sol, ainsi qu'une disponibilité en eau et une température modérée contribuent à la formation et à la stabilisation des agrégats (Boix *et al.*, 1995 ; Lavee *et al.*, 1996). D'après Sarah (2005), une forte corrélation a été trouvée entre la précipitation moyenne annuelle (représentant les effets de longue durée), la variabilité de la précipitation annuelle (représentant les effets de courte durée) et certaines variables d'agrégation. Le stockage de carbone du sol peut être à son tour influencé par la stabilité des agrégats via la protection contre la décomposition microbienne (Razafimbelo *et al.*, 2008).

Les dynamiques des matières organiques du sol (MOS) sont déterminées par le climat, le type de sol et le mode d'usage (Feller et Beare, 1997). Sachant que ce sont ces matières organiques qui constituent la première source en carbone organique du sol. La température et la pluviosité agissent sur la décomposition des MOS, lesquelles influent sur la croissance végétative (Grace *et al.*, 2006). Les stocks de MOS résultent de la balance entre les entrées (inputs) et les sorties (outputs) du carbone dans le sol (Davidson et Janssens, 2006). Les débris végétaux et les racines constituent les « entrées » alors que les sorties sont dominées par les flux de CO_2 du sol et du méthane (CH_4). La production de CO_2 dans le sol se fait surtout par la respiration des racines et la décomposition microbienne des MOS. Ces 2 processus sont dépendants de la température. On assumait depuis longtemps que le réchauffement du climat (donc du sol) s'accompagne d'une augmentation du taux de flux de carbone sorti vers l'atmosphère (Smith et Fang, 2010).

La température est le facteur dominant connu contrôlant le taux de respiration (Lloyd et Taylor, 1994 ; Flanagan et Johnson, 2005). La sensibilité de la respiration à la température est souvent évaluée par l'indice Q_{10} (Laisne, 2007). Une importante intensité de minéralisation des matières organiques se produit lors d'une augmentation de la température, ce qui diminue la teneur en carbone dans le sol (Kirschbaum, 1995 ; Alvarez et Lavado, 1998). Pourtant, le carbone organique du sol (COS) est essentiel pour le maintien de la fertilité, la rétention en eau et la production des plantes de l'écosystème terrestre (Grace *et al.*, 2006). La dépendance à la température du taux de minéralisation du carbone a été longtemps avancée. Ce point de vue a été vivement contesté ces derniers temps. Par exemple, Liski *et al.* (1999) ont conclu que la décomposition des vieilles MOS est tolérante aux changements de température. Ainsi, certains auteurs affirment à travers leurs modèles, qu'une augmentation de la température globale ne conduit pas forcément à une augmentation de la minéralisation du COS (Agren et Bosatta, 2002).

Les matières organiques font partie des « **variables rapides** » du sol. Leur évolution et les effets du climat sur ces matières peuvent être évalués annuellement par diverses méthodes. Parmi ces méthodes et la plus usitée est l'évaluation du taux de minéralisation des matières organiques.

Les variables climatiques en l'occurrence la pluviosité et la température jouent un rôle important sur la formation et l'évolution du sol. Face à la variabilité actuelle et le changement futur du climat, il est primordial de connaître et d'anticiper les effets de ces changements au niveau des propriétés des sols. La connaissance de leur sensibilité, tant négative que positive, contribue énormément à la recherche des pratiques d'adaptation pour éviter ou atténuer les effets des variabilités climatiques.

2- CLIMAT ET SOL DE MADAGASCAR : REVUE SYNTHETIQUE

Madagascar se trouve en zone intertropicale, entre 12° et 25° de latitude Sud. Cette appartenance géographique lui confère des climats tropicaux chauds et humides en général ainsi que divers types de sol. Le climat et la pédologie de Madagascar ont fait l'objet d'une multitude de recherches durant des décennies. Les chercheurs de l'ORSTOM¹ ont particulièrement effectué des recherches approfondies sur la description, la classification et la cartographie des sols malgaches. Ici, nous allons essayer de décrire de façon synthétique les différents types de climat et les principaux sols de Madagascar tout en tenant compte du système international de classification des sols.

¹ Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre Mer

2.1 LES PRINCIPAUX SOLS DE MADAGASCAR

2.1.1 Les études antérieures

Diverses études des sols malgaches ont été réalisées par les pédologues de l'ORSTOM et ceux de la Recherche Agronomique de Madagascar dès 1946 (Hervieu, 1967) et se sont activement poursuivies dans les années 50, 60, 70 et 80. On peut citer: géographie des sols malgaches (Hervieu, 1967), les sols de Madagascar (Roederer, 1971), carte pédologique de Madagascar (Zebrowski et Ratsimbazafy, 1979), les unités pédomorphologiques à Madagascar (Bourgeat *et al.*, 1995), les principaux groupes de sol du Nord-Ouest de Madagascar (Segalen, 1956). Certaines études s'étaient focalisées sur les sols ferrallitiques, étant donné leurs importances en termes de surface : l'histoire des sols ferrallitiques de Madagascar (Riquier et Bourgeat, 1966), les formations gibbsitiques indurées à Madagascar (Bourgeat, 1969), les sols ferrallitiques à Madagascar (Bourgeat et Aubert, 1972), relations entre le relief, les types de sols et leurs aptitudes culturales sur les Hautes Terres malgaches (Bourgeat *et al.*, 1975).

Toutes ces études se sont essentiellement rapportés sur l'identification, la description et la classification des différents types de sol de Madagascar. Des essais cartographiques ont été effectués par certains pédologues (ex. Riquier, 1968 ; Roederer et Bourgeat, 1971 ; Zebrowski et Ratsimbazafy, 1979 ; Delenne et Pelletier, 1981).

Plus tard, les recherches se sont plutôt orientées vers les analyses et les études des propriétés physico-chimiques des sols, en vue d'une meilleure valorisation en agriculture. Des essais agronomiques ont été faits sur des parcelles cultivées afin d'optimiser les rendements agricoles.

2.1.2 Classification française des sols (CPCS) de Madagascar

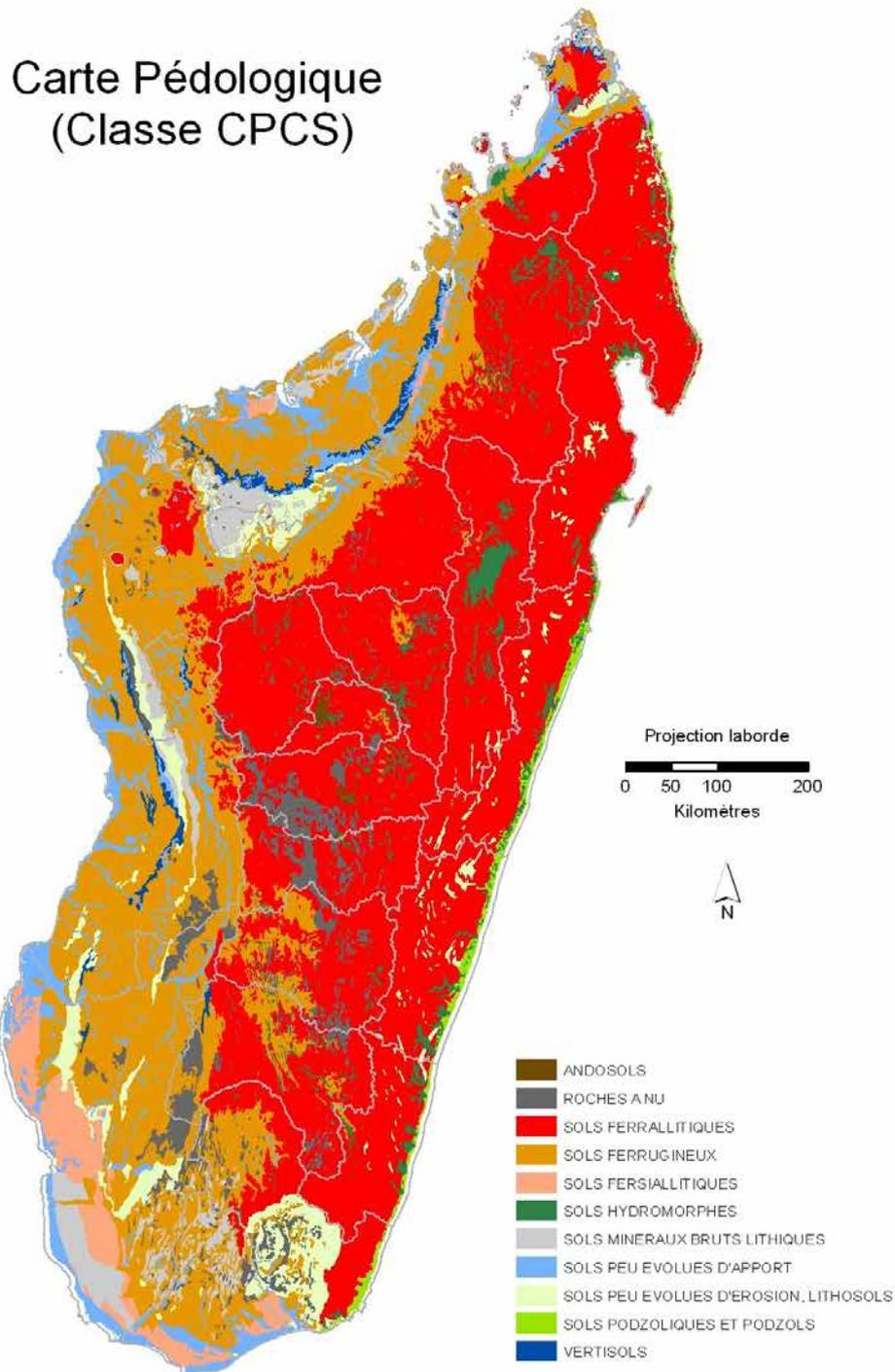
L'ancienne classification française des sols de la Commission de pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS) de 1967 était le système de classification utilisé par les pédologues de l'ORSTOM pour les sols de Madagascar. Ce système comprend 12 classes de sol et est essentiellement basé sur la description minutieuse des processus de pédogenèse et les caractères des profils (Duchaufour, 1998). Cette classification est hiérarchique et génétique. Nous allons essayer de décrire brièvement ces 12 classes de sol de la classification CPCS :

- **Sols minéraux brutes** : ce sont des sols à profil AC, d'origine climatique sous un climat très sec ou très froid pendant l'année empêchant l'évolution du sol, ou d'origine non climatique comprenant les sols minéraux bruts d'érosion ou squelettiques et les sols minéraux bruts d'apport.
- **Sols peu évolués** : à profil AC, ce sont des sols à faible degré d'évolution et d'altération, une faible teneur en matière organique. Ils se divisent en deux sous classes : sols peu évolués d'apport et sols peu évolués d'érosion.

- **Vertisols** : ce sont des sols caractérisés par une teneur élevée (jusqu'à 70%) en argiles gonflantes appelées « montmorillonites ». Ce sont des argiles néoformées ou héritées. Ils comprennent deux sous classes : les vertisols foncés (localisés dans les dépressions mal drainées) et les sols vertiques (localisés sur les pentes offrant un certain drainage externe).
- **Andosols** : ce sont des sols dont l'évolution est conditionnée par la présence d'une roche mère volcanique très altérable produisant des allophanes (produits mal cristallisés).
- **Sols calcimagnésiques** : à profil AC, ce sont des sols riches en calcaire actif. Ils sont caractérisés par la présence en quantité importante (ou ayant une influence dominante) de carbonate de calcium ou de carbonate double de calcium et de magnésium ou de sulfate de calcium. Ils représentent les sous classes de sols calcimagnésiques humifères, sols calcimagnésiques peu humifères et sols calcimagnésiques très humifères.
- **Sols isohumiques** : leur évolution est liée à la présence simultanée d'une forte activité biologique et d'une matière organique humifiée et stable. Sur le profil, on assiste à une teneur régulièrement décroissante en matière organique bien évoluée.
- **Sols podzolisés** : leur évolution est conditionnée par le climat, le profil est profondément différencié, une acidification détruit les minéraux silicatés, éliminant les bases et les silices des silicates et redistribuant le fer et l'aluminium.
- **Sols brunifiés** : ce sont des sols à évolution climatique des régions tempérées humides. Leur évolution est liée à la présence puis à l'éventuelle dégradation du complexe « argile-humus-fer ». La brunification est très souvent associée au processus de lessivage.
- **Sols à sesquioxydes de fer et de manganèse** : cette classe concerne les sols fersiallitiques et les sols ferrugineux tropicaux. Ce sont des sols riches en sesquioxydes. Les sols fersiallitiques sont caractérisés par une distribution de façon similaire des oxydes de fer accompagnant l'argile le long du profil. Durant leur pédogenèse, les sols ferrugineux sont caractérisés par la séparation des sesquioxydes des argiles et leur migration. La migration de l'argile provoque la formation de l'horizon B textural (Bt).
- **Sols ferrallitiques** : ce sont des sols qui représentent la phase terminale de l'évolution des sols de la région équatoriale humide et sans saison sèche. L'altération des minéraux est pratiquement totale excepté le quartz. Dominés par les argiles kaolinitiques, des oxydes libres et bien cristallisés sont abondant (goethite, hématite, gibbsite).
- **Sols hydromorphes** : ce sont des sols liés à un excès d'eau (hydromorphie). Ils sont caractérisés par des phénomènes de réduction du fer, liés à une saturation temporaire ou permanente par l'eau, provoquant un déficit en oxygène. Le processus d'oxydo-réduction est marqué pour cette classe de sol. La sous classe des pseudogley correspond à une

hydromorphie temporaire de surface, les gley à une hydromorphie profonde permanente et les tourbes à une hydromorphie totale et permanente.

- **Sols sodiques** : ils évoluent dans des milieux riches en sels solubles. La formation de ces sols est en relation directe avec la présence de l'ion Na^+ . Les sources de sodium peuvent être une nappe salée, un dépôt sédimentaire salin, ... Une condition climatique permettant la conservation du Na^+ dans le profil est donc nécessaire. Cette classe de sol comprend les sous classes de sols salins et de sols alcalins.



source : Unité Géomorphologique de Madagascar, Delenne et al. ORSTOM, 1981

Figure 1-3 : Carte pédologique de Madagascar-classification CPCS (Delenne et Pelletier, 1981)

Le tableau ci-dessous montre les surfaces occupées par chaque classe de sol de Madagascar suivant la classification CPCS. Les données sont issues de la carte pédologique de Delenne et

Pelletier (1981) (figure 1-3) et publiées dans Grinand *et al.* (2009). Cette carte demeure la plus récente pour ce système de classification. Elle a été élaborée suivant la classification modifiée de la CPCS et adaptée au contexte local (Grinand *et al.* 2009).

Tableau 1-2: Proportion des différentes classes de sol de Madagascar selon la carte de Delenne et Pelletier , 1981 (in Grinand *et al.* 2009)

| Classes | Superficie (km ²) | Aire relative (%) |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Sols ferrallitiques | 274 561 | 46,5 |
| Sols ferrugineux | 164 510 | 27,8 |
| Sols fersiallitiques | 16 375 | 2,8 |
| Sols peu évolués d'apport | 37 752 | 6,4 |
| Sols peu évolués d'érosion | 24 824 | 4,2 |
| Sols minéraux bruts | 20 252 | 3,4 |
| Sols hydromorphes | 15 172 | 2,6 |
| Sols podzolisés | 5 598 | 0,9 |
| Vertisols | 5 341 | 0,9 |
| Andosols | 542 | 0,1 |
| Sols calcimagnésiques | n.c.* | - |
| Sols sodiques | n.c.* | - |
| Roche à nu | 26 097 | 4,4 |

**Non cartographié*

Ces données montrent que près de 75% de la superficie totale est occupée par les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux. Les sols ferrallitiques évoluent essentiellement sur les Hautes Terres et sur la partie orientale. Les sols ferrugineux longent plutôt la côte Ouest et Sud – Ouest de l'île. Les sols hydromorphes, souvent aménagés en rizière de bas fond, très éparpillés et ne représentent que 2,6% de la superficie.

Lié sans doute à l'importance de leur superficie, les sols ferrallitiques et ferrugineux sont très exploités en matière d'agriculture à Madagascar. Sur les zones de *tanety*² des Hautes Terres, outre les formations arbustives, les sols ferrallitiques sont surtout dédiés à des cultures vivrières comme le maïs, le manioc, la patate douce, le riz pluvial,...

² Zones en hauteur ou versants des collines

Les sols ferrallitiques s'appuient sur 2 idées fondamentales : une importance de l'altération aboutissant à des matériaux à minéraux argileux 1/1 et des sesquioxydes de fer et parfois de l'hydroxyde d'aluminium d'une part et une différenciation morphologique d'autre part (Segalen, 1979). Les minéraux argileux ne doivent pas comporter plus de 10% des argiles 2/1. La teneur en oxyde libre du sol (Fe, Al, Ti, Mn...) ne doit pas dépasser 50%. Les caractéristiques allophaniques dues à la présence des produits amorphes doivent être suffisamment faibles. Les sols ferrallitiques sont des sols profonds, pouvant atteindre 30 m ou plus d'épaisseur.

Les sols ferrugineux sont caractérisés par la migration de l'argile et la séparation des oxydes de fer (Segalen, 1994) sous forme de taches, de concrétion et de cuirasse. Ce sont des sols dominés par les argiles kaolinitiques et un peu d'illite. Leur pH se situe autour de 5,5 à 6,5, ce sont aussi des sols poreux et sableux, leur teinte rouge est plus sombre que celle des ferrallitiques et souvent même un peu violacée. Les petites tâches noires dans ces sols sont dues à la présence des bioxydes de manganèse (Riquier, 1966). L'individualisation des sesquioxydes de fer ou de manganèse leur confère une couleur très accusée (rouge, ocre, rouille) qui peut intéresser les horizons A et B (ou B seulement). La richesse en sesquioxydes résulte d'une hydrolyse des minéraux très poussée mais cette hydrolyse reste moins complète que celle des minéraux des sols ferrallitiques (Eschenbrenner, 1988).

Ces deux classes de sol se subdivisent encore en plusieurs sous classes, groupes et sous groupes. Les termes utilisés pour les différentes sous classes peuvent varier d'un auteur à l'autre. Pour Bourgeat et Aubert (1972), les sols ferrallitiques se divisent en sols ferrallitiques pénévulés (ou fortement rajeunis), en sols ferrallitiques rajeunis et en sols ferrallitiques anciens et profonds.

Le rapport $K_i = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est un critère très utilisé pour la séparation des sols ferrallitiques ($K_i < 2$) des sols ferrugineux ($k_i > 2$). Il est aussi employé pour la subdivision des sous classes de sols ferrallitiques.

Basé sur la classification des pédologues de l'ORSTOM, comme Bourgeat et Aubert (1972), Riquier (1966), Hervieu (1967) et Roederer (1971), nous avons pu sortir les sous classes suivantes pour les sols ferrallitiques de Madagascar :

- **Sols faiblement ferrallitiques (ferrallitiques rajeunis et ferrallitiques fortement rajeunis) :** pour les sols ferrallitiques rajeunis, on note une présence à une profondeur supérieure à 60 cm et inférieure à 2 ou 3 m d'un horizon limoneux BC ou C. Il peut y avoir une très faible quantité de gibbsite. Le rapport k_i se situe entre 1,7 et 2. Pour les pénévulés, leur caractéristique principale est la présence en faible profondeur (<60 cm) d'un horizon limoneux où l'on reconnaît les minéraux primaires. Ils se situent sur des zones en pentes très marquées.

- **Sols ferrallitiques typiques (ou anciens et profonds)** : certains auteurs divisent encore cette sous classes en sous classes des sols ferrallitiques gibbsitiques et ferrallitiques kaoliniques (ex. Riquier, 1966). Ces deux sous classes se différencient essentiellement par la présence et dominance ou non de la gibbsite. K_f est inférieur à 1,7. L'horizon argileux est très profond et le passage de l'horizon humifère à l'horizon minéral est très difficile à identifier.
- **Sols ferrallitiques lessivés** : ces sols se caractérisent par la migration de l'argile avec une accumulation de celle-ci dans un horizon Bt.
- **Sols ferrallitiques humifères** : ce sont des sols propres aux zones d'altitude. On assiste à une accumulation des matières organiques dans le profil. Ce sont souvent des sols dérivés des roches basiques et sous des conditions climatiques fraîches.

Les sols ferrugineux tropicaux n'ont pas de gibbsites individualisées. Ils se divisent en deux sous classes :

- **Sols ferrugineux non (ou peu) lessivés** : ce sont des sols qui évoluent sur des roches et matériaux sédimentaires. Ils ne présentent pas de différenciation très poussées.
- **Sols ferrugineux lessivés** : ce sont des sols lessivés en fer et en argile. L'horizon de surface est souvent décoloré tandis que l'horizon Bt est très coloré par les oxydes ferriques.

2.1.3 Classification FAO des sols de Madagascar

La classification FAO constitue une synthèse efficace entre les différents systèmes de classification (Duchaufour, 1991). Ainsi, elle est beaucoup utilisée pour les publications scientifiques internationales. La base de la classification est « génétique » et la majorité des groupes principaux est définie soit par des *horizons* soit par des *propriétés diagnostiques*. La hiérarchie comporte 2 niveaux principaux : les groupements principaux et les unités.

Tableau 1-3 : Proportion des différentes classes de sol de Madagascar selon la carte
FAO, 1974

| Groupes | Superficie (km ²) | Aire relative (%) |
|------------------|-------------------------------|-------------------|
| Luvisols | 60 083 661 | 10,2 |
| Cambisols | 106 317 440 | 18 |
| Regosols | 54 394 709 | 9,2 |
| Arenosols | 57 502 344 | 9,7 |
| Vertisols | 7 146 038 | 1,2 |
| Fluvisols | 25 278 558 | 4,3 |
| Gleysols | 6 480 420 | 1,1 |
| Histosols | 1 620 121 | 0,3 |
| Nitisols | 39 597 850 | 6,7 |
| Acrisols | 223 547 | 0,04 |
| Solonchak | 148 943 | 0,03 |
| Lithosols | 21 558 230 | 3,7 |
| Ferralsols | 209 104 069 | 35,4 |
| Acrisols | 223 547 | 0,04 |
| Non cartographié | 1 274 120 | 0,2 |

Le tableau 1-3 montre qu'en termes de superficie occupée, les ferralsols se trouvent en tête avec 35%, suivis par les cambisols (18%), les luvisols (10,2%), les arenosols (9,7%), les regosols (9,2%), et les nitisols (6,7%).

Sur la figure 1-4, les ferralsols et les cambisols se distribuent essentiellement sur les Hautes Terres et la partie Est de l'île. Les nitisols se trouvent sur les bordures des versants Ouest. Les arenosols et les luvisols se répartissent dans le Sud Ouest, l'Ouest et le Nord de Madagascar, en approchant les côtes. Les ferralsols, les cambisols et les nitisols correspondent aux sols ferrallitiques de la classification CPCS, les arenosols et les luvisols aux sols ferrugineux. Dans certains cas bien définis, les arenosols pourront être classés comme des sols minéraux bruts de la CPCS.

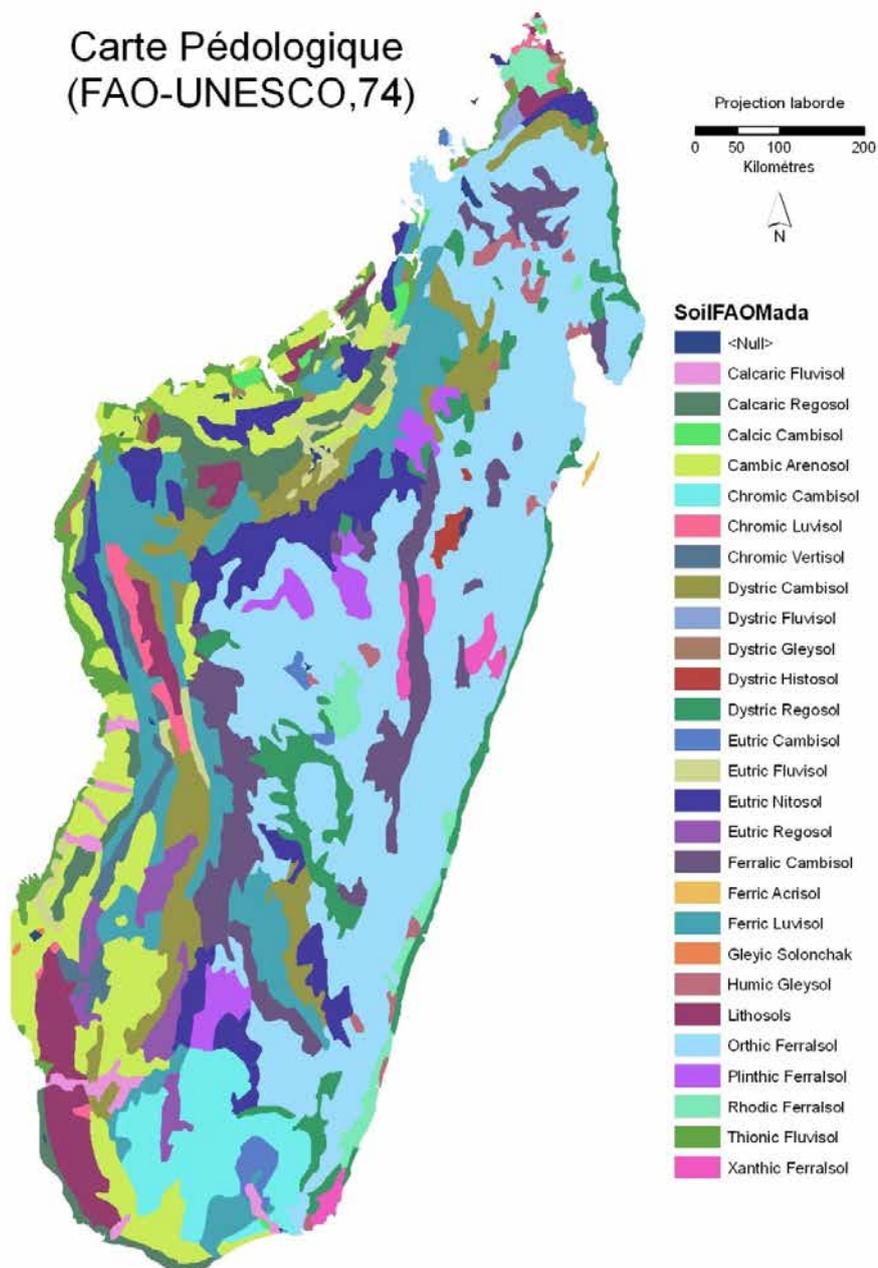


Figure 1-4 : carte pédologique de Madagascar- classification FAO (FAO, 1974)

Ici, nous nous limitons à une description succincte de quelques groupes de sol rencontrés à Madagascar :

- **Vertisols** : ce sont des sols ayant un horizon vertique sur les 100 premiers centimètres et présentant 30% ou plus d'argile sur tous les horizons. Ils sont caractérisés aussi par la présence des fentes de retrait.

- **Ferralsols** : caractérisés par un horizon ferrallique entre 25 et 200 cm, n'ayant pas d'horizon nitique sur les 100 premiers centimètres ni de couche répondant aux exigences des horizons argiques. Ils devront aussi avoir 10% ou plus d'argile dispersable dans l'eau. Sa capacité d'échange cationique est inférieure ou égale à $16 \text{ cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$.
- **Nitisols** : présence d'un horizon nitique sur les 100 premiers centimètres. Les limites entre la surface et les horizons sous jacents sont graduelles à diffuses.
- **Luvisols** : caractérisés par la présence d'un horizon argique dont la capacité d'échange cationique est supérieure ou égale à 24 cmolc kg^{-1} d'argile.
- **Cambisols** : ce sont des sols ayant un horizon cambique ou mollique dont le taux de saturation en bases est en dessous de 50%.
- **Arenosols** : ce sont des sols à texture sableuse au moins jusqu'à 100 cm de profondeur. ils ont aussi moins de 35% de fragments de roches ou autres fragments grossiers sur les 100 premiers centimètres.

2.2 LE CLIMAT ET LES REGIONS CLIMATIQUES DE MADAGASCAR

2.2.1 Température et pluviosité

Madagascar se trouve dans la zone intertropicale, le climat est surtout déterminé d'une part, par l'anticyclone des Mascareignes qui engendre l'alizé du Sud-Est, et d'autre part, par les basses pressions équatoriales généralement situées au Nord de l'île, provoquant la mousson du Nord-Ouest et qui atteint par intermittence Madagascar durant la saison chaude (Cornet, 1973).

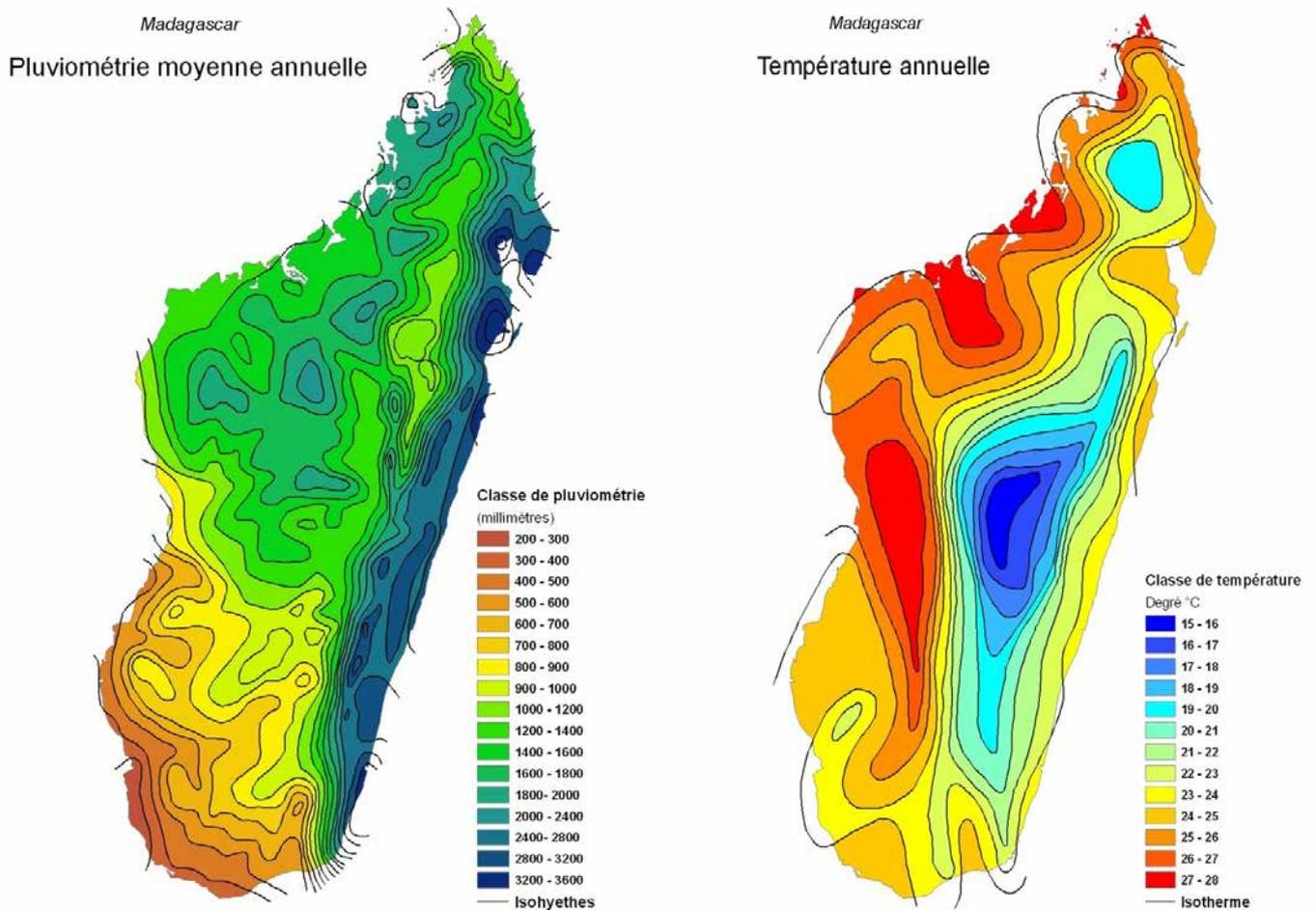


Figure 1-5 : Carte de la pluviométrie et de la température moyenne annuelle de Madagascar (Raunet, 1997)

La partie Est de l'île (allant de Vohemar jusqu'à Fort Dauphin) demeure la zone la plus humide dont la pluviosité annuelle varie de 1800 mm à plus de 3000 mm. Le Sud et le Sud Ouest (Tuléar et l'Androy) sont les plus secs avec une pluviosité moyenne inférieure à 800 mm, pouvant descendre jusqu'à 200 mm par an. Les Hautes Terres ont en général une pluviosité moyenne annuelle entre 1200 mm et 2000 mm. Certaines zones humides du Nord Ouest (zone de Sambirano et de Nosy be) ont une pluviosité supérieure à 2000 mm tandis qu'une grande partie de la côte Ouest présente entre 1200 mm et 1400 mm de pluie par an. Pour la température moyenne annuelle, les Hautes Terres centrales (Antananarivo et Fianarantsoa) restent les plus froides avec une température moyenne variant entre 15°C et 20°C. Les zones les plus chaudes sont celles situées sur la bordure Ouest de Madagascar (Morondava, Mahajanga) ; la température moyenne annuelle y varie de 25°C à 28°C.

2.2.2 Les différentes régions climatiques

Il a toujours été avancé que Madagascar jouit en général d'un climat tropical chaud et humide. Pourtant, la classification des différents types de climat identifié a montré qu'il y a encore différents types de climat selon les régions étudiées. Plusieurs auteurs ont déjà essayé de réaliser une classification du climat de Madagascar, on peut citer : les 4 grandes régions climatiques par Hervieu (1967), essai de cartographie bioclimatique par Cornet (1973), carte agroclimatologique par Oldeman (1988) et la carte des régions climatiques par Raunet (1998).

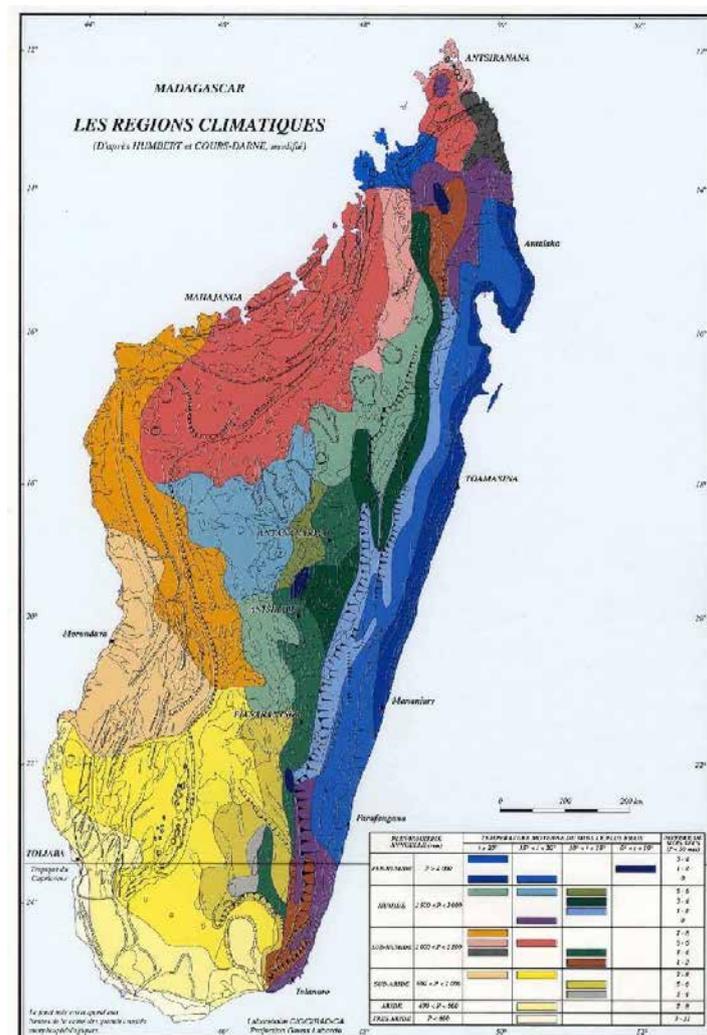


Figure 1-6 : Carte des régions climatiques de Madagascar (Raunet, 1998)

La carte la plus récente, celle de Raunet (1998) montre 6 types de climat. Les critères de classification sont basés au départ sur la pluviosité moyenne annuelle, puis la température moyenne du mois le plus sec et enfin le nombre de mois sec. Un mois est dit sec quand la pluviosité est inférieure à 50 mm.

- **Climat perhumide** : pour une pluviosité moyenne annuelle supérieure à 2000 mm. Le nombre de mois humide est de 12 mois (Hervieu, 1967) donc il n'y a pas de déficit hydrique. Ce type de climat comprend la côte Est de Vohemar à Nosy Varika, de 0 à 700 m d'altitude (Cornet, 1973).
- **Climat humide** : pour une pluviosité entre 1500 et 2000 mm. Il concerne les régions ayant 6 à 10 mois humides. Il occupe le reste du versant oriental, notamment la plaine côtière de Nosy Varika à Fort Dauphin (Cornet, 1973).
- **Climat subhumide** : pour une pluviosité entre 1000 mm et 1500 mm. Il se situe essentiellement sur les Hautes Terres centrales (anciennement appelé plateau central). Il comprend également la dépression du Lac Alaotra et le Sambirano (Ambanja).
- **Climat subaride** : la pluviosité moyenne annuelle y est de 600 mm à 1000 mm. Il concerne certaines zones de l'Ouest de l'île, notamment dans la région de Morondava.
- **Climat aride**: avec une pluviosité de 400 mm à 600 mm. Ce climat sévit dans la partie Sud Ouest de Madagascar.
- **Climat très aride**: pour une pluviosité moyenne annuelle inférieure à 400 mm. C'est un climat spécifique à la partie extrême Sud de Madagascar (région de l'Androy).

3- APPLICATION DE LA SPECTROMETRIE INFRAROUGE EN SCIENCE DU SOL

Trouver une alternative à la méthode d'analyse conventionnelle des sols a été une des préoccupations des scientifiques ces deux dernières décennies. Les procédures standards de mesure des propriétés des sols sont très complexes, nécessitent beaucoup de temps et demeurent très coûteux (Chang *et al.*, 2001). Un grand développement de l'utilisation de la spectrométrie infrarouge a été constaté en tant qu'outil rapide et moins cher pour la caractérisation des sols (Brown *et al.*, 2005). La spectroscopie de réflectance diffuse (SRD) offre une meilleure amélioration ou un remplacement de la méthode conventionnelle (Viscarra Rossel *et al.*, 2006). Auparavant, l'ultraviolet (250-400 nm) et les régions visibles (400-700 nm) ont toujours été utilisés pour l'identification des minéraux comme les oxydes et les hydroxydes de fer (Islam *et al.*, 2003). La technique de spectrométrie proche infrarouge (SPIR) (700-2500 nm) a été beaucoup utilisée ces 20 dernières années comme outil majeur pour des analyses quantitatives alors que la spectrométrie moyen infrarouge (SMIR) (2500-25000 nm) a été essentiellement utilisée pour des analyses qualitatives des sols (Reeves *et al.*, 2001 ; Pirie *et al.*, 2005).

3.1 PRINCIPES DE BASE

La spectrométrie infrarouge (IR) s'utilise principalement pour l'analyse qualitative d'une molécule. Elle permet de mettre en évidence la présence d'une liaison particulière. Elle constitue un sous ensemble de la spectroscopie qui traite la région infrarouge du spectre électromagnétique. Elle couvre diverses techniques mais les plus courantes sont les spectroscopies d'absorption et de réflectance. Un spectre lumineux se divise en plusieurs zones. Une partie comprend l'ultraviolet (UV), le visible (VIS) (incluant les couleurs rouge, vert, bleu, jaune, orange, cyan et violet), le proche infrarouge (PIR), le moyen infrarouge (MIR) et l'infrarouge lointain (LIR).

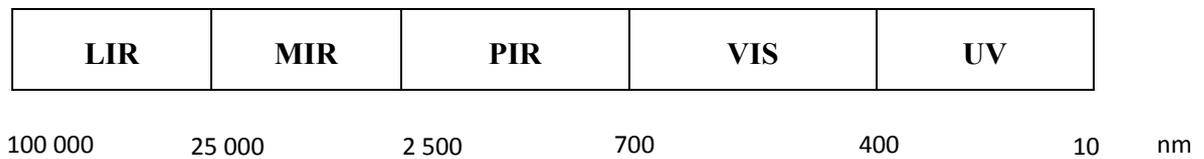


Figure 1-7 : Une portion d'un spectre lumineux

En science du sol, les chercheurs ont réussi à prédire plusieurs propriétés du sol en utilisant l'UV, le VIS, le PIR et le MIR (Pirie *et al.*, 2005). En effet, les signatures spectrales des matériaux sont définies par la réflectance ou l'absorbance, comme une fonction de la longueur d'onde dans le spectre électromagnétique (Mutuo *et al.*, 2006). Selon l'appareil, les signatures peuvent être obtenues soit par réflectance soit par absorbance mais c'est surtout la spectroscopie de réflectance diffuse qui intéresse les chercheurs (McBratney *et al.*, 2006). Les composés organiques et minéraux du sol absorbent la lumière dans l'UV-VIS-PIR et MIR. Cette absorption de lumière dans ces régions peut se produire à travers des transitions électroniques des atomes, mais aussi par la vibration d'élongation et de déformation des molécules et des cristaux (Viscarra Rossel *et al.*, 2006b). Rappelons que les mouvements des atomes d'une molécule peuvent être classés en trois : les translations, les rotations et les vibrations. Le MIR est caractérisé par la présence des vibrations fondamentales des molécules dans cette région.

Les molécules ressemblent à un ensemble de boules qui sont les atomes, liées par des liaisons chimiques. Quand ces molécules sont soumises à une radiation infrarouge, ils se mettent à vibrer en modifiant les distances interatomiques et/ou les angles normaux de liaison.



Figure 1-8a : Vibrations d'élongation (stretching)

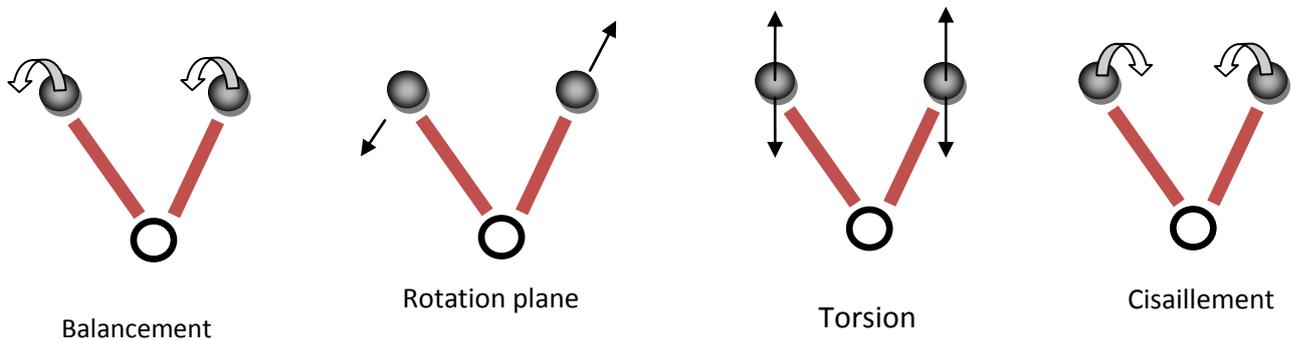


Figure 1-8b : Déformation angulaire (bending)

Les modes de vibration en infrarouge sont représentés par les figures 1-8a et 1-8b. Ces vibrations ont pour caractéristique :

- **Vibrations d'élongation (ou de valence)** : il s'agit d'une vibration dans l'axe du dipôle. Deux atomes se rapprochent ou s'éloignent périodiquement le long de leur axe commun. L'élongation peut être symétrique ou asymétrique.
- **Vibrations de déformation angulaire** : ils correspondent à une modification de l'angle de liaison. Ce sont des vibrations moins intenses mais plus nombreuses. Le cisaillement et la rotation sont dits « des vibrations de déformation angulaire dans le plan », la torsion et le balancement « des vibrations de déformation angulaire hors plan ».

Chaque molécule a donc un très grand nombre de possibilités de vibration donc de bandes d'absorption. C'est ainsi qu'un spectre infrarouge est très complexe. Ce sont ces vibrations moléculaires, sous formes de bandes d'absorption, qui vont constituer les spectres infrarouges dans chaque région utilisée.

Pour le cas du sol, les échantillons préalablement préparés sont passés dans les spectromètres à réflectance ou à absorbance. Les signatures spectrales obtenues sont constituées par les bandes d'absorption des molécules des matériaux organiques et minéraux présents dans le sol. Une fois les spectres collectés, les scientifiques peuvent commencer les traitements des données pour pouvoir soit identifier les éléments qui les composent soit évaluer la quantité des éléments

étudiés dans chaque échantillon. Les analyses quantitatives consistent donc à modéliser les teneurs en élément à partir des données spectrales. Cette technique a été beaucoup utilisée par la discipline de « la chimimétrie ». Cette dernière consiste à appliquer des outils mathématiques, particulièrement la statistique, pour tirer des informations sur des données chimiques, entre autre par le biais des spectres. La spectroscopie de réflectance diffuse s'est développée considérablement durant les 20 dernières années, correspondant ainsi à l'intégration des techniques de chimimétrie et de statistique multivariée dans les chimies analytiques (Viscarra Rossel *et al.*, 2008a).

3.2 INTERETS DE LA SPECTROMETRIE INFRAROUGE EN SCIENCE DU SOL

La spectrométrie infrarouge a été développée pour substituer les techniques d'analyse conventionnelle. L'application de la spectrométrie infrarouge en science du sol a connu une immense évolution durant ces deux dernières décennies (Pirie *et al.*, 2005 ; Viscarra Rossel *et al.*, 2010). En effet, il s'agit d'une technique simple, non destructive, nettement reproductible, rapide et surtout moins coûteuse (Rumpel *et al.*, 2001; McBratney *et al.*, 2006; Viscarra Rossel *et al.*, 2006b). Elle est souvent plus précise que les méthodes traditionnelles d'analyse de sol. La manipulation ne nécessite plus un fractionnement des échantillons (Janik *et al.*, 2007). A part l'acquisition du matériel, cette technique d'analyse a un très faible coût en comparaison aux analyses en laboratoire car les réactifs chimiques ne sont plus nécessaires, un grand nombre d'échantillons peut être scanné en infrarouge en peu de temps. Des logiciels spécifiques ont été développés pour le traitement des spectres. La spectrométrie infrarouge est aussi avantageuse étant donné qu'elle ne demande qu'une petite quantité d'échantillons et un minimum de travail de préparation (Pirie *et al.*, 2005 ; Janik *et al.*, 2007 ; Viscarra Rossel *et al.*, 2010). Elle permet également de réaliser une étude à plus grande échelle (en terme de nombre d'échantillon ou en terme de surface) car un seul spectre permet d'effectuer une prédiction de plusieurs propriétés du sol en même temps (Janik *et al.*, 2007 ; Minasny *et al.*, 2009).

En science du sol, l'UV, la VIS, la SPIR et la SMIR ont été utilisés pour prédire les propriétés des sols comme le pH, la capacité d'échange cationique (CEC), la teneur en carbone organique, la teneur en argile, en limon et en sable, l'azote totale, la conductivité électrique, et d'autres paramètres de la fertilité des sols : le fer, l'aluminium, le cuivre, le manganèse... (Pirie *et al.*, 2005). La spectrométrie infrarouge constitue donc une des techniques pouvant substituer les techniques conventionnelles afin d'évaluer ou prédire les différentes propriétés physico-chimiques des sols. Pour les sols de Madagascar, peu de résultats de recherche sont encore publiés actuellement avec l'utilisation de la spectrométrie infrarouge (ex. Vagen *et al.*, 2005). L'obtention des différentes propriétés des sols permettra après de réaliser des analyses sur leur relation avec le climat.

CHAPITRE II - MATERIELS ET METHODES

1- CADRE CONCEPTUEL

La finalité de cette étude est d'évaluer le degré de sensibilité des sols au climat via leurs propriétés physico-chimiques. La connaissance de la sensibilité de certains constituants du sol est un outil très important pour pouvoir effectuer des recommandations sur le mode de gestion le plus approprié et le type d'adaptation nécessaire pour faire face à la variabilité climatique. Pour y arriver, il faut identifier en premier lieu la démarche méthodologique à suivre puis utiliser les outils à la disposition pour rassembler tous les éléments requis.

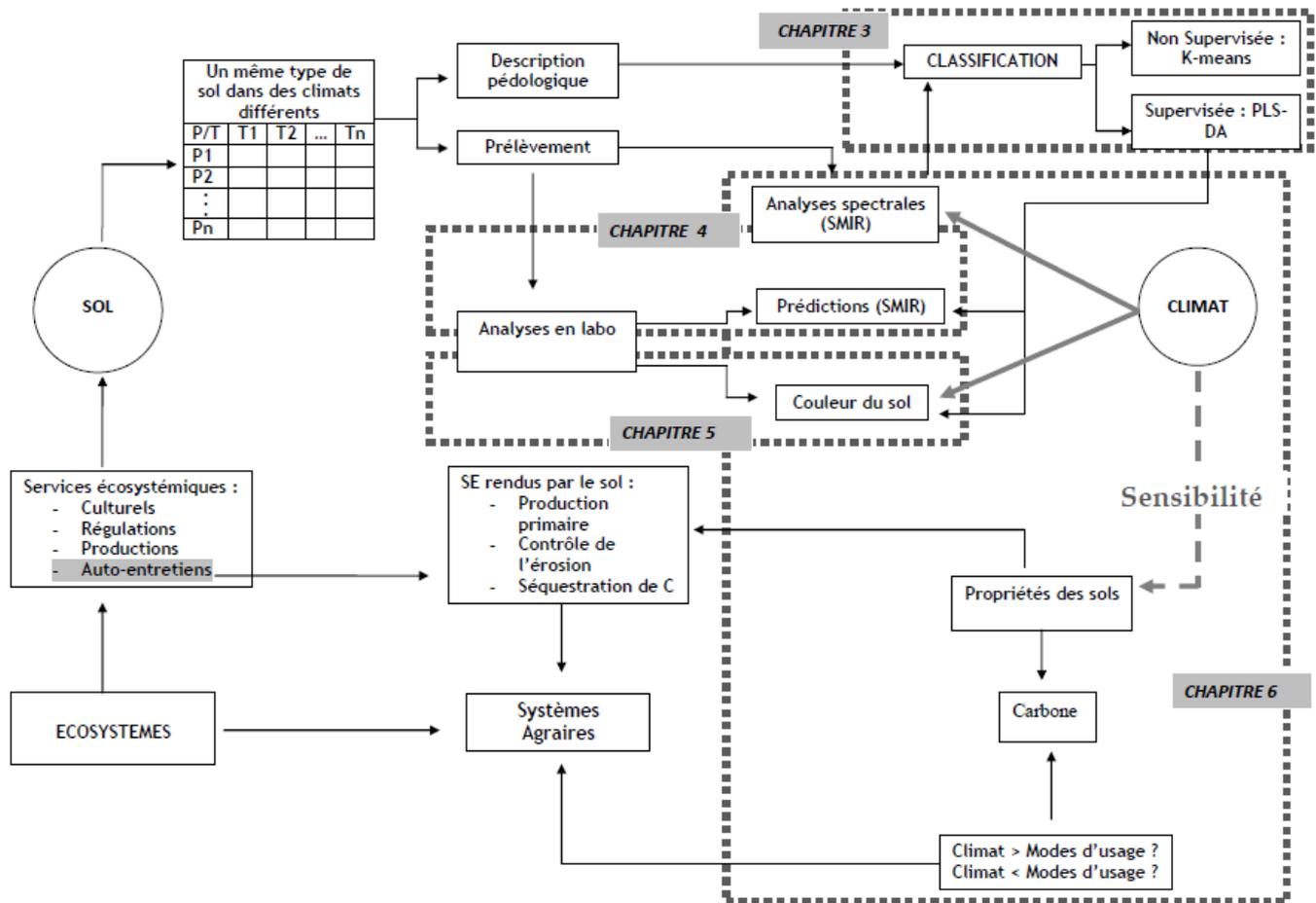


Figure 2-1 : Cadre conceptuel de l'étude

Le sol se trouve au beau milieu de l'écosystème que ce soit naturel ou cultivé. Les hommes tirent profit des services rendus par l'écosystème, et ceci à travers les différents systèmes agraires pour le cas du sol. A Madagascar, un même type de sol peut être soumis à différentes conditions climatiques, on peut ainsi évaluer le degré de sensibilité actuel des propriétés du sol au climat afin de prédire celui du futur. Il faut donc utiliser des nouvelles méthodes ou techniques pour mesurer les propriétés des sols à l'échelle du pays. L'utilisation de la technique de la spectrométrie infrarouge et la modélisation des couleurs du sol en constituent une alternative à

l'analyse conventionnelle. Les signatures spectrales ont été utilisées pour classifier les sols mais surtout pour la prédiction de leurs propriétés physico-chimiques. Le fer et le carbone organique (sous sa forme de matière organique) contribuent essentiellement à l'octroi de la couleur des sols. Cette dernière a été à son tour utilisée pour modéliser et prédire ces deux constituants du sol.

Les changements au niveau des propriétés des sols peuvent être dus non seulement au climat mais aussi au mode d'usage des terres. Ainsi, il faut identifier la variable climatique susceptible d'apporter des modifications au niveau du sol et les constituants les plus sensibles.

2- PRESENTATION DES SITES D'ETUDES ET METHODE D'ECHANTILLONNAGE

2.1 SITES D'ETUDE

La présente étude a été réalisée dans plusieurs sites, répartis dans divers endroits de Madagascar. Etalé sur une superficie totale de 587 040 km², l'île de Madagascar se trouve entre 43° 14' et 50° 27' de longitude Est et entre 11° 57' et 25° 30' de latitude Sud, au Sud Ouest de l'Océan Indien, à 400 km des côtes Est Africains.

Le principal objectif a été de prélever un même type de sol sous des gradients de température et de pluviosité les plus représentatifs de Madagascar. Les prélèvements d'échantillons ont eu lieu dans 119 sites, distancés de 20 km les uns des autres le long des transects « Est-Ouest et Nord – Sud » de l'île. Cette distance a été choisie en tenant compte des distances entre deux isohyètes et deux isothermes qui sont environ 25 km sur le terrain, d'après les cartes de la pluviosité et de la température de Raunet (1997). Pour des raisons pratiques, liées notamment à l'accessibilité, les échantillonnages ont eu lieu dans des endroits non loin des routes nationales. Afin d'éviter toute perturbation éventuelle qu'aurait pu subir les sols dans le passé, les sites choisis se trouvaient à une distance d'au moins 200 m de la route. Le mode d'usage des sols doit être uniforme pour qu'on puisse faire la comparaison entre les situations. Il a été décidé de prélever sur des terrains non encore cultivés (vierge) et sous « *bozaka*³ ». Les parcelles choisies étaient représentatives des paysages locaux.

³ Pseudo-steppe à *aristida* sp

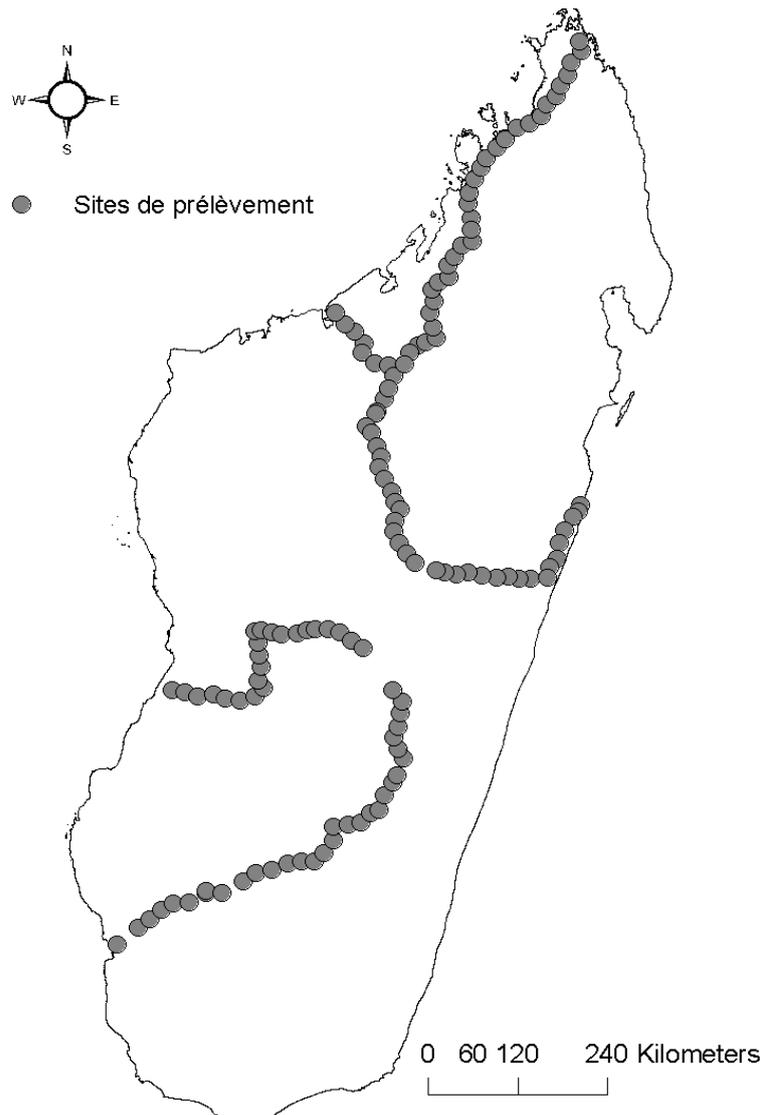


Figure 2-2: Carte de localisation des sites de prélèvement

En travaillant à l'échelle du pays, nous avons considéré les principaux gradients de température et de pluviosité existants. Les gradients en pluviosité concernent essentiellement les transects Est-Ouest (figure 2-2). La partie Est de l'île représente la pluviosité la plus élevée, pouvant aller jusqu'à 3000 mm de pluie par an. Traversant les zones d'altitude des Hautes Terres où la pluviosité se situe entre 1000 mm et 1800 mm par an, ces premiers transects rejoignent la partie Ouest de l'île avec des pluviosités moyennes annuelles de moins de 1000 mm sur la partie de Morondava et de Tuléar et entre 1200 mm et 1600 mm sur la partie de Majunga. Les Hautes Terres centrales restent les zones les plus froides avec une température moyenne de 16°C à 18 °C. Les transects qui représentent les gradients en température les plus significatifs sont ceux traversant les Hautes Terres et qui rejoignent la partie Ouest, Sud Ouest et Nord Ouest de Madagascar.

Quant aux différents types de sol, les ferralsols sont distribués sur une grande partie de la partie Est, sur les Hautes Terres, sur les versants Ouest et dans le Nord de l'île. Les arenosols et les luvisols sont localisés uniquement dans la partie Ouest, Sud et dans certaines zones du Nord. Cette répartition des sols explique ainsi l'existence d'un même type de sol sous des climats différents et a permis de choisir les transects à retenir pour les prélèvements.

Le système de classification des sols de la FAO est beaucoup utilisé pour les publications internationales, nous avons opté pour la carte pédologique de la FAO (FAO, 1974). Cette classification a été la seule utilisée pour cette thèse.

Pour la température et la pluviosité, il est toujours intéressant d'utiliser des données récentes. Pour cela, nous avons utilisé la base de données WORLDCLIM, publié par Hijmans *et al.* (2005). Il s'agit des données d'interpolation du climat de la surface du globe terrestre à partir des données enregistrées entre 1950 et 2000 (excepté l'arctique). Ces données climatiques ont été cartographiées (figure 2-3) et la température et la pluviosité moyenne annuelle ont été extraites de ces cartes.

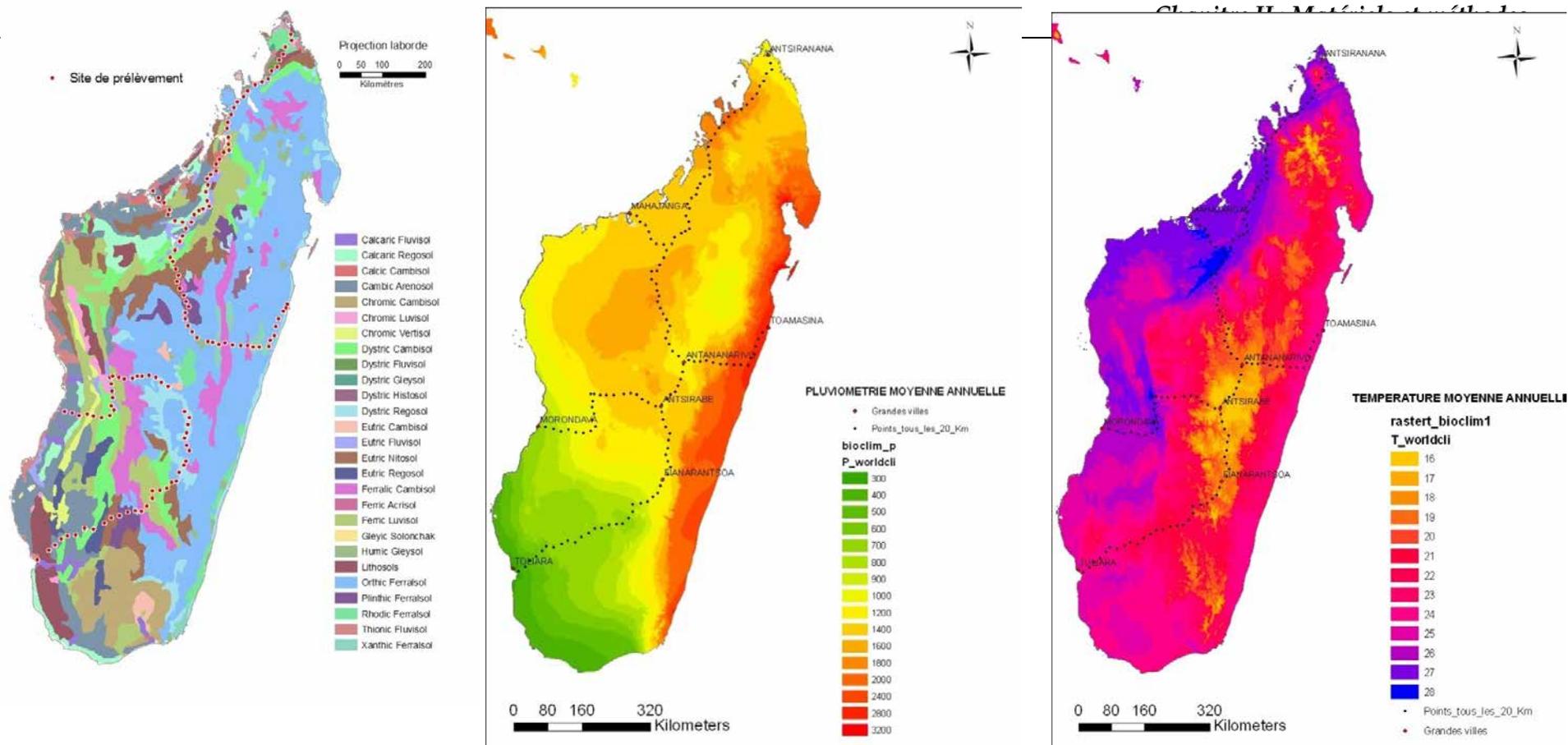


Figure 2-3 : Carte pédologique (FAO, 1974), carte de la pluviosité et de la température moyenne annuelle (Hijmans *et al.*, 2005) et localisation des sites de prélèvement.

Le tableau ci-après montre le nombre de site de prélèvement par groupe de sol selon la classification FAO des sols et leur correspondance avec la classification française des sols CPCS (CPCS, 1967).

Tableau 2-1 : Groupes de sol prélevés

| Groupes de sol (FAO) | Classes de sol CPCS | Nombre de site |
|----------------------|--|----------------|
| Ferralsols | Sols faiblement ferrallitiques, sols ferrallitiques typiques, sols ferrallitiques rajeunis | 36 |
| Cambisols | | 38 |
| Nitisols | | 19 |
| Arenosols | Sols ferrugineux non lessivés, sols ferrugineux lessivés | 11 |
| Luvisols | | 9 |
| Calcaric regosols | Sols calcimagnésiques | 2 |
| Vertisols | Vertisols | 4 |
| Total | | 119 |

Les ferralsols, les cambisols et les nitisols, correspondant aux sols ferrallitiques de la classification CPCS, ont le nombre de site les plus élevés, suivis des arenosols et des luvisols (correspondant aux sols ferrugineux).

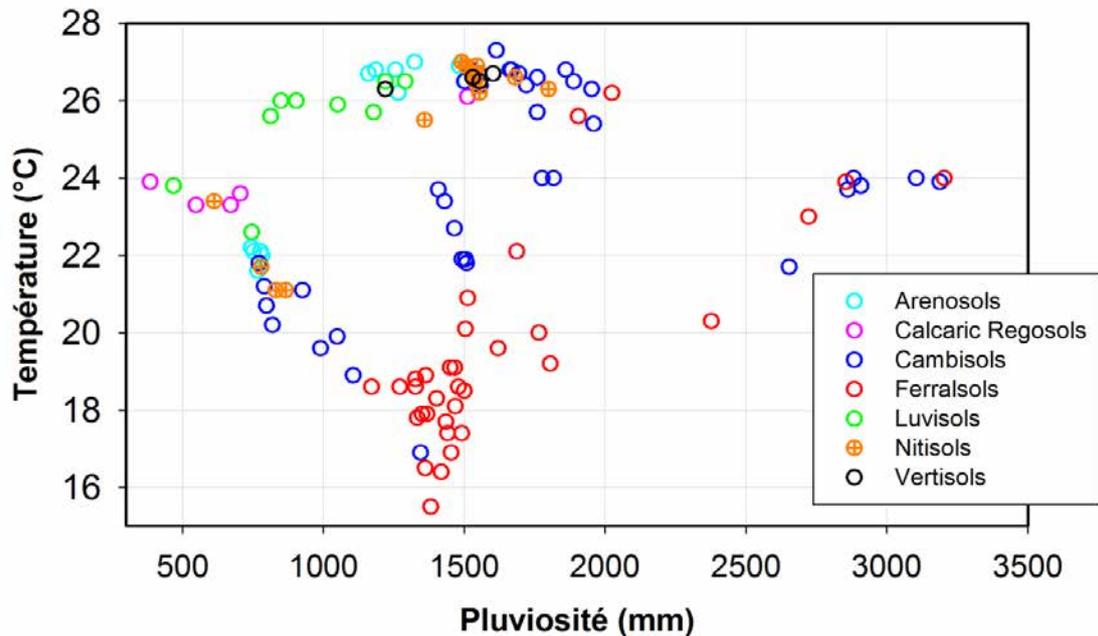


Figure 2-4 : Groupes de sol prélevés en fonction de la température et de la pluviosité moyenne annuelle

Les ferralsols et les cambisols ont été prélevés sur un gradient de température situé entre 16°C et 28°C et sur un gradient de pluviosité variant de 700mm à 3000 mm. Les arenosols, les luvisols

et les calcaric regosols ont été échantillonnés sous une pluviosité inférieure à 1500 mm et sous une température moyenne supérieure à 20°C.

2.2 ECHANTILLONNAGE

Une fois placé sur une parcelle représentative du paysage local, un carré de 100 m² a été installé à l'aide d'une corde. Pour le cas des terrains en pente (flanc des collines), le carré a été dessiné au 1/3 ou 2/3 supérieure, ceci afin d'éviter de prélever sur le sommet ou sur les bas de pente. Ces zones sont souvent soumises à l'influence des eaux de pluies et des actions anthropiques.

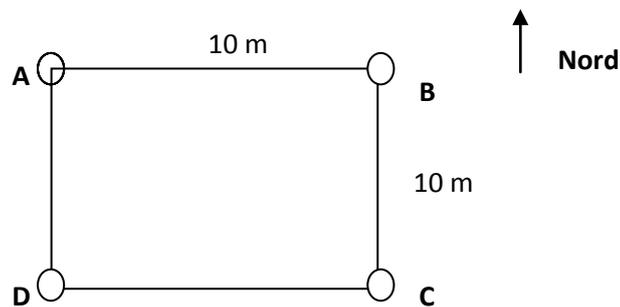


Figure 2-5 : Carré de prélèvement

Les 4 extrémités du carré constituent les points de prélèvement. Sur le point B, toujours orienté vers le Nord, nous avons effectué la description des profils. Pour les 4 répétitions, les prélèvements ont été réalisés jusqu'à 1 m de profondeurs et les 5 horizons prélevés sont 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 50-60 cm et 80-90 cm. Des échantillons composites ont été préparés à partir des répétitions pour chaque profondeur de prélèvement. Les aliquotes, non mélangés, ont été gardés séparément.



Photo 2-1: Prélèvement au carottier sur 1 m de profondeur

Tous les prélèvements de sol ont été effectués à l'aide d'un carottier de marque Cobra TT Hammer. Il s'agit d'un appareil motorisé pouvant descendre jusqu'à 1 mètre ou plus dans le sol suivant la longueur de la carotte utilisée. Cet appareil ne peut travailler que sur des sols non inondés et non tourbeux. Ainsi, les échantillonnages ont eu lieu sur les zones de *tanety*. L'utilisation de cet appareil nous a permis de prélever rapidement, étant donné que le protocole d'échantillonnage stipulait des prélèvements systématiquement tous les 20 km.

3- METHODOLOGIE GENERALE

3.1 EXTRACTION DES DONNEES PEDO-CLIMATIQUES PAR LE SIG

Le système d'information géographique ou SIG a été utilisé pour l'extraction des données sols et climats à partir des cartes. Avec le logiciel ARCGIS 9.0, nous avons projeté les points GPS des sites de prélèvement sur les fonds de carte pédologique de la FAO, sur les cartes de température, de pluviosité et du nombre de mois sec de la base de données WORLDCLIM. Les groupes de sol correspondant à chaque site et les données climatiques ont été extraites de ces

bases de données. Les classes de sol obtenues ont été confrontées avec celles identifiées lors des travaux de description des profils pédologiques sur le terrain.

3.2 DETERMINATION DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS

Les échantillons utilisés sont des échantillons composites issus des 4 répétitions par site de prélèvement. Le nombre d'échantillons analysés ainsi que les profondeurs utilisées n'était pas le même pour chaque propriété du sol à analyser. Il varie suivant les objectifs fixés et le coût des analyses.

3.2.1 Densité apparente et humidité relative

La densité apparente est le rapport entre le poids total sec et le volume de l'échantillon, exprimé en g.cm^{-3} . Le volume du cylindre utilisé durant les prélèvements est connu (500 cm^3), donc celui du sol aussi. Une partie de chaque échantillon a été pesée à l'état humide sur le terrain. Ces échantillons ont été ramenés au laboratoire pour y être étuvés à 105°C pendant 48 heures. Avec le poids sec, on peut calculer l'humidité relative et la densité apparente du sol.

3.2.2 pH eau et pH KCl

Avec un mélange d'échantillon de sol et de l'eau distillée selon le rapport 1/1,25, le pH eau a été mesuré pour les profondeurs 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 50-60 cm et 80-90 cm. Les mêmes solutions ont été utilisées pour les mesures du pH KCl.

3.2.3 Analyse granulométrique

La méthode de « sédimentation et décantation successive » a été adoptée pour l'analyse granulométrique des échantillons composites de la profondeur 20-30 cm. Les matières organiques ont été détruites par un traitement à froid puis à chaud avec de l'eau oxygénée. Après tamisage, 5 fractions différentes ont été récupérées : argile ($0-2 \mu\text{m}$), limon fin ($2-20 \mu\text{m}$), limon grossier ($20-50 \mu\text{m}$), sable fin ($50-200 \mu\text{m}$) et sable grossier ($200-2000 \mu\text{m}$).

3.2.4 Carbone organique :

Le carbone organique (C_{org}) a été analysé avec la méthode de Walkley et Black (1934). Cette méthode est basée sur l'oxydation du carbone organique par le bichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). La réaction se traduit par un virage de couleur permettant le calcul de la quantité de carbone organique présent dans le sol. Les échantillons utilisés sont ceux issus de 0-10, 10-20 et 20-30 cm de profondeur

3.2.5 Forme du fer et de l'aluminium

Les différentes formes du fer ont été extraites à l'aide de réactifs sélectifs : le citrate-bicarbonate-dithionite (CBD) ou encore réactif de Mehra et Jackson (1960a) pour extraire les formes cristallisées et amorphes et l'oxalate d'ammonium pour les formes amorphes et microcristallines du sol. Ces analyses ont été réalisées sur des échantillons de 0-10, 10-20 et 20-30 cm de profondeur.

3.2.6 Bases échangeables

Les bases échangeables (K, Na, Mg, Ca) ont été analysées avec la méthode d'extraction au cobaltihexamine 25meq/l. Le rapport utilisé était de 2g de sol dans 20ml de solution. La lecture de chaque cation a ensuite été réalisée avec un spectromètre d'absorption atomique.

3.3 ANALYSES STATISTIQUES DES DONNEES

L'analyse en composante principale (ACP) a été beaucoup utilisée pour le traitement des données spectrales et des données sur les couleurs du sol. Il s'agit d'une méthode d'analyse des données numériques quantitatives visant à former des groupes homogènes d'unité statistique et d'analyser les liaisons entre les variables (Foucart, 1997). La régression des moindres carrées (PLSR) a été utilisée pour la modélisation des spectres. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées avec les logiciels R-Stat, The Unscrambler et Sigmaplot.

3.4 ANALYSES SPECTRALES ET CLASSIFICATION DES SOLS

L'analyse spectrale des échantillons a été réalisée dans la région moyen infrarouge (MIR), qui se situe entre 400 cm^{-1} et 4000 cm^{-1} . Les analyses ont été réalisées avec un spectromètre à Transformée de Fourier Nicolet 6700 FT-IR (Janik et Skjemstad, 1995; Janik *et al.*, 2007; Reeves, 2009). Les échantillons ont été broyés à 0,2 mm avant l'acquisition des spectres



Photo 2-2: Appareil pour l'analyse spectrale en MIR

Les signatures spectrales ont été utilisées pour la classification des sols. Deux méthodes de classification ont été testées : la méthode non supervisée « K-means clustering » et la méthode supervisée « PLS-DA ».

- *K-means clustering* : elle consiste à partitionner un ensemble de données en K groupes homogènes ou « clusters ». L'objectif est de minimiser les variances intra-cluster (Çeşmeci et Güllü, 2009).
- *Partial Least Squares-Discriminant Analysis ou PLS-DA*: c'est une méthode de classification supervisée. Le principe est de prédire le degré d'appartenance d'un échantillon à chacune des classes de sol préalablement fixée. La comparaison des résultats de la prédiction avec ceux des descriptions sur le terrain nous a donné le pouvoir prédictif de cette méthode à discriminer les groupes de sol. La variable sol a été disjoncté en 0 et 1 pour l'établissement des modèles par type de sol à partir des données spectrales. Ensuite, ces modèles ont été utilisés pour la prédiction des types de sol en prenant chacune des variables disjonctées comme Y référence.

Après avoir classifiés les échantillons avec ces deux méthodes, les spectres moyens par groupe de sol ont été calculés. Une déconvolution a été appliquée sur ces spectres moyens et sur les loadings pour la caractérisation minéralogique de chaque groupe de sol. Par définition, le loading ou axes principaux ou encore vecteurs propres est constituée par les informations sur la contribution de chaque variable dans la construction des composantes principales (axes).

Cette caractérisation minéralogique a été utile pour argumenter les modes de discrimination des échantillons lors de la classification. La déconvolution a été réalisée avec le logiciel PEAKFIT.

3.5 MODELISATION ET PREDICTION DES PROPRIETES DES SOLS

Avant la modélisation, il faut avoir des résultats d'analyse en laboratoire pour les propriétés du sol à prédire. Ces échantillons analysés ont été divisés en 2 lots : 75% des effectifs pour le lot de calibration et 25% pour le lot de validation.

La régression linéaire du moindre carré partiel ou PLSR a été utilisée pour la modélisation des relations entre propriétés du sol et spectres. C'est une méthode très adoptée par les scientifiques car elle explique beaucoup de variable en même temps et elle est facile à interpréter avec un algorithme de calcul beaucoup plus rapide (Stenberg *et al.*, 2010). La modélisation et la validation ont été réalisées avec le logiciel The Unscrambler.

3.6 PREDICTION DE LA TENEUR EN FER ET EN CARBONE A PARTIR DES COULEURS DU SOL

L'objectif est de prédire la teneur en fer et en carbone organique en utilisant les couleurs du sol. Pour cela, il faut mesurer les couleurs et les transformer ensuite en des données quantitatives pour la construction des modèles. Les couleurs ont été mesurées ou identifiées sur des échantillons de sol secs et humides. Deux méthodes ont été utilisées pour les mesures:

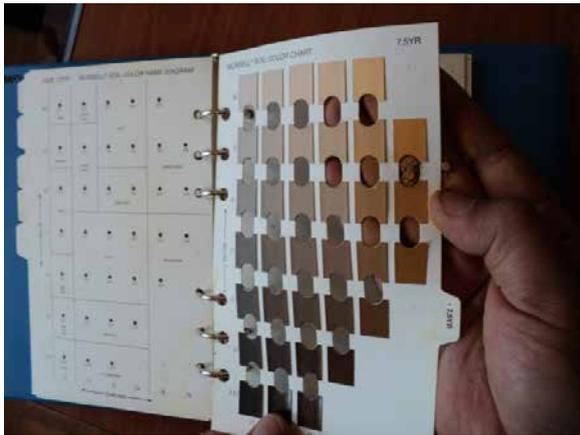


Photo 2-3: Code Munsell, dispositif d'acquisition des photos, vue d'en haut de l'intérieur du dispositif, images issues de la numérisation

- Identification avec le code Munsell :

Les couleurs Munsell ont été obtenues en procédant à l'identification des couleurs sous la lumière du jour. Après avoir identifié la couleur à l'état sec, chaque échantillon a été humecté pour avoir la couleur à l'état humide. Les données obtenues sont des données qualitatives constituées par 3 variables : H (Hue), V (Value) et C (Chroma) (ex. 2,5 YR-3-4).

- Numérisation avec de l'appareil photo numérique:

Il s'agit d'un dispositif pour la prise de photos de chaque échantillon sous une condition homogène. Cette méthode a été inspirée et adaptée de l'installation et des procédés développés par Levin *et al.* (2005) et par Viscarra Rossel *et al.* (2008a). Un appareil photo numérique classique a été placé à 50 cm à la verticale au-dessus de l'échantillon. Deux lampes halogènes faisant chacune un angle de 45° et diffusant des lumières sur les échantillons constituaient les sources de lumière blanche homogène du dispositif, sans autre source de lumière artificielle

provenant de l'appareil photo (figure 2-8). Le tout a été placé dans une boîte opaque de couleur blanche pour éviter l'effet d'interférence des lumières (Viscarra Rossel *et al.*, 2008a). Les photos ont été traitées avec le logiciel PHOTOSHOP pour l'extraction des valeurs RVB (Rouge, Vert, Bleu) qui varient entre 0 et 255.

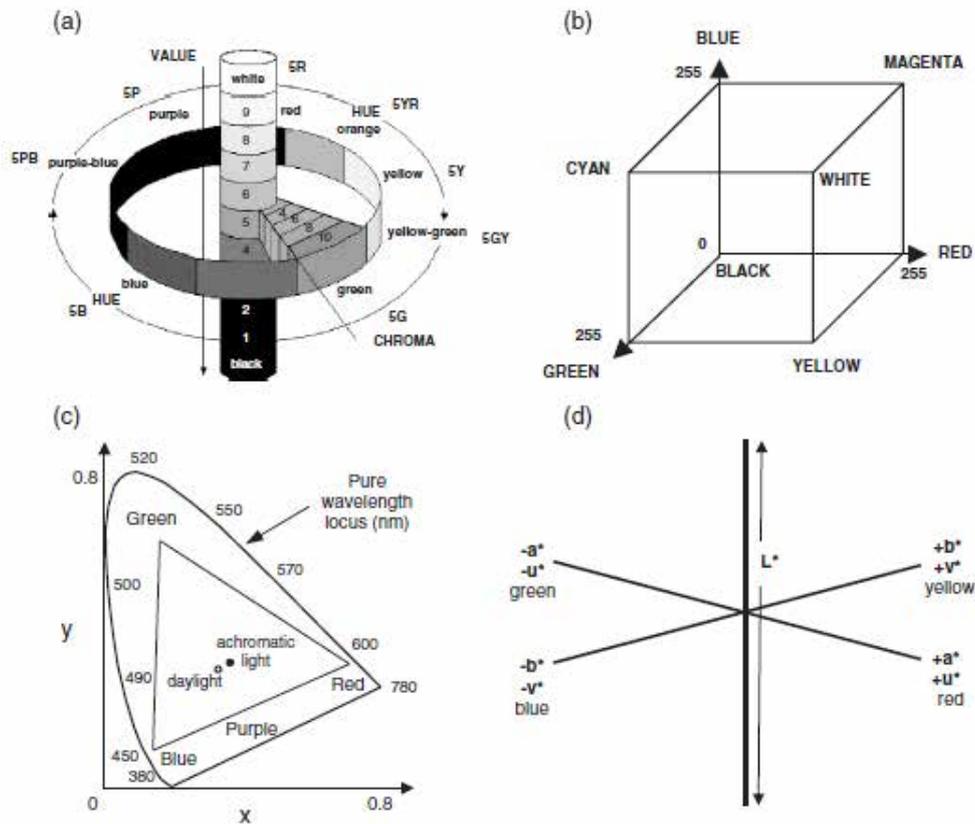


Figure 2-6: (a) Modèle de couleur Munsell représenté par un système de coordonnées cylindriques, (b) Modèle RGB, (c) Diagramme de chromaticité CIE xy, (d) Modèle d'espace de couleur CIEL $u^* v^*$ et CIEL $a^* b^*$, d'après Viscarra Rossel *et al.* (2006a).

Sachant que la couleur est un phénomène psychophysique tridimensionnel, représentée dans un modèle spatial, plusieurs variables transformées de la couleur ont été développées par les scientifiques (ex. Scheinost et Schwertmann, 1999; Viscarra Rossel *et al.*, 2006a). Parmi ces variables (figure 2-9) : le système de couleur XYZ (CIE, 1931) où Y représente la luminosité, X et Z les composantes virtuelles des spectres primaires, l'espace de couleur CIE Yxy où x et y sont les chromaticités indépendants de la luminosité Y et qui spécifient la variation des couleurs du bleu au rouge et du bleu au vert. Afin de contourner les problèmes de non-linéarité des XYZ et Yxy, la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) a proposé les systèmes CIE $L^* u^* v^*$ et CIE $L^* a^* b^*$ où L représente la luminance qui varie de 0 (noir) à 100 (blanc), les a^* et b^* , les u^* et v^* représentent les coordonnées de chromaticité sur des échelles opposant le rouge-vert et le bleu-jaune. Afin de surmonter la difficulté avec les coordonnées de chromaticité xy, les coordonnées de chromaticité Helmholtz ont été développées: λ_d pour les longueurs d'onde dominant, P_e pour

la pureté d'excitation et Y la luminosité. Pour avoir des données quantitatives correspondant à ces variables transformées de couleurs, les couleurs Munsell et les couleurs RVB ont été transformées avec le logiciel COLOSOL (Viscarra Rossel, 2004). La figure ci-après montre les différentes transformations réalisées avec ce logiciel.

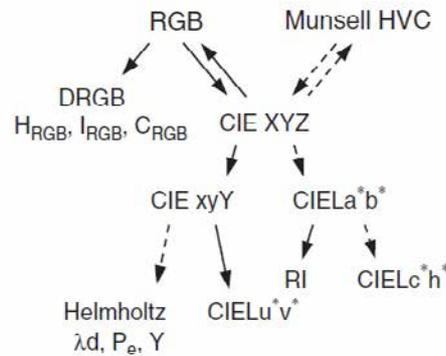


Figure 2-7: Transformation d'espace couleur, d'après Viscarra Rossel *et al.*, (2006a)

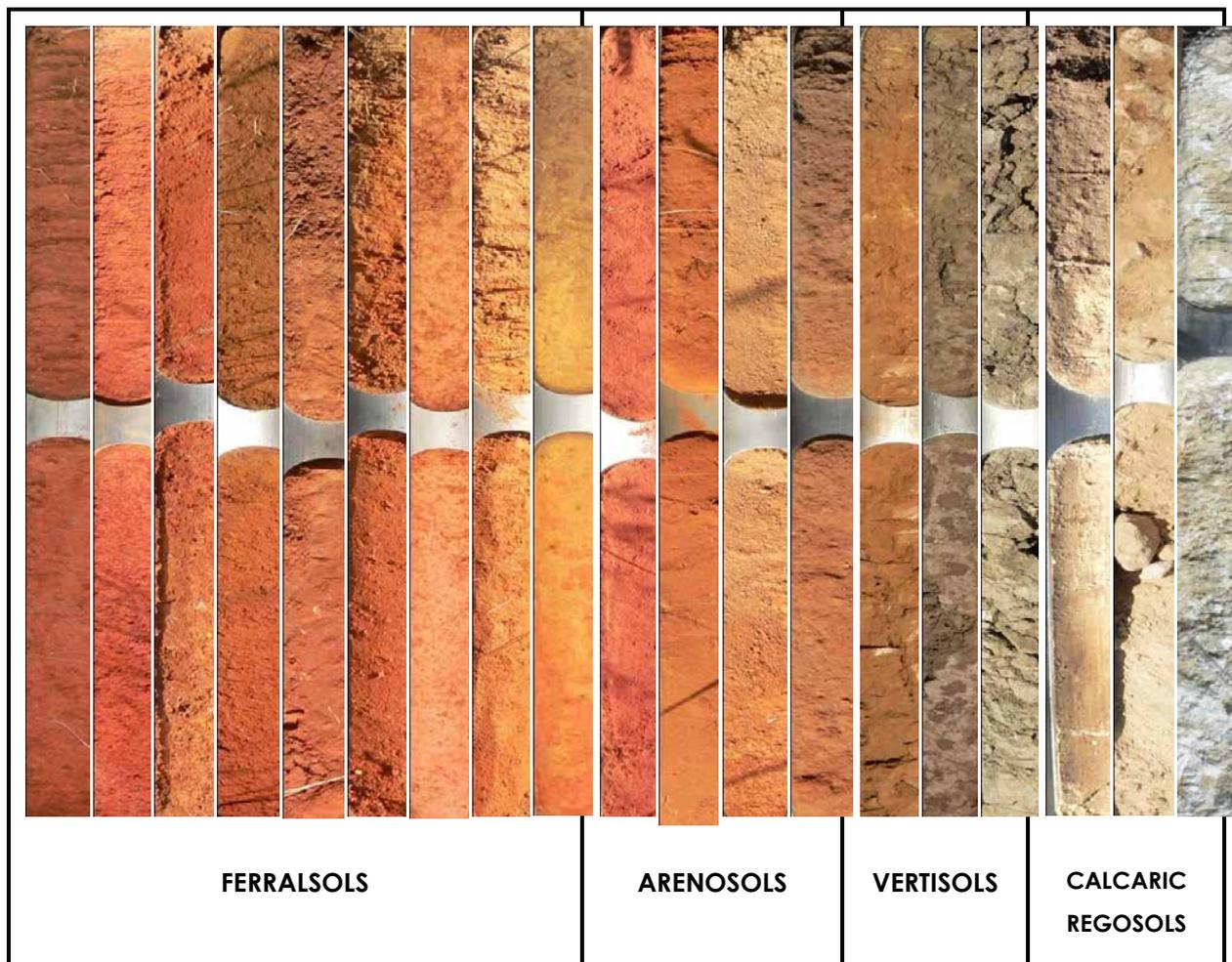


Photo 2-4: Diversité de couleur de quelques groupes de sol de Madagascar

3.7 EVALUATION DE LA SENSIBILITE DU SOL A LA VARIABILITE CLIMATIQUE

La température et la pluviosité moyenne annuelle sont les deux variables climatiques retenues pour cette étude. L'évaluation de la sensibilité des propriétés du sol au climat a été réalisée avec la démarche ci-après:

- **Analyse en Composante Principale (ACP)** : elle a été réalisée avec les propriétés des sols mesurées et les variables climatiques. Cette analyse a permis d'identifier les groupes de variables et leurs corrélations avec la température et la pluviosité.
- **Analyses qualitatives des relations « climat-propriétés des sols »**: il s'agit d'analyser la variation de la teneur des constituants étudiés en fonction de la variation de la température et de la pluviosité.
- **ACP entre les variables transformées de couleur RVB et Munsell et les variables climatiques « température et pluviosité »**: Le principal objectif est d'analyser la présence de groupes homogènes entre les variables de couleur et de climat.
- **Régression linéaire du moindre carré partiel (PLSR) des variables couleurs**: Les régressions ont pour but d'utiliser les couleurs comme variables d'analyse de la sensibilité avec des régressions PLSR. La pluviosité et la température constituent les variables à expliquer Y et les couleurs représentent les variables explicatives X. Chaque modèle a été évalué avec le coefficient de détermination R^2 .
- **PLSR avec les signatures spectrales** : La régression linéaire du moindre carré partiel (PLSR) a été utilisée pour modéliser les impacts de la température et de la pluviosité sur les constituants du sol à travers leurs signatures spectrales. La variable à expliquer Y est représentée soit par la température soit par la pluviosité et la variable explicative X par les spectres moyen infrarouges. Le coefficient de détermination R^2 informe sur l'existence d'une relation entre les spectres et les variables climatiques. L'analyse des loadings ont permis d'identifier les bandes sensibles à la température et à la pluviosité. Ces bandes correspondent à des composés organiques ou minéraux du sol.

Etant donné que le carbone du sol est un déterminant de plusieurs services écosystémiques rendus par le sol à savoir la séquestration du carbone, la production primaire et le contrôle de l'érosion (par le biais de la stabilité structurale), une attention particulière a été portée sur cet élément du sol. Toutes les analyses ont été effectuées par groupe de sol.

3.8 ETUDE DE LA DYNAMIQUE DU CARBONE

La dynamique du C du sol a été analysée avec le modèle Rothamsted carbon ou RothC (Jenkinson et Rayner, 1977). Il s'agit d'un modèle très utilisé pour estimer le changement du carbone organique du sol (COS) en réponse au climat ou au changement d'usage des terres (Xu

et al., 2011). Des simulations ont été réalisées sur 500 ans, entre 2008 et 2508 avec des scénarii de changement d'usage des terres et de changement du climat.

La figure ci-après montre les différents compartiments de la matière organique du sol :

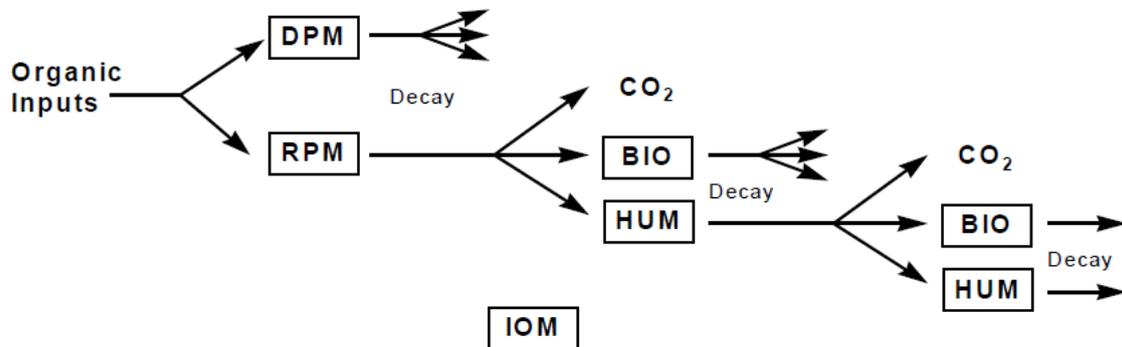


Figure 2-7 : Structure du modèle RothC

- **DPM (Decomposable Plant Material)** : fraction de la matière organique facilement ou rapidement dégradable.
- **RPM (Resistant Plant Material)** : fraction de la matière organique dégradée plus lentement que la DPM.
- **BIO** : biomasse microbienne
- **HUM** : matière organique humifiée
- **CO₂** : dioxyde de carbone produit issu de la minéralisation de la matière organique du sol
- **IOM (Inert Organic Material)** : fraction inerte (non dégradable) de la matière organique du sol.

Les simulations ont été réalisées sur deux sites correspondants à des ferralsols et deux autres correspondants à des arenosols. À l'état initial, les sols demeurent non cultivés et couverts de *bozaka*. Les échantillons issus de 0-10 cm de profondeur ont été utilisés pour la simulation RothC.

**CHAPITRE III – CLASSIFICATION DES PRINCIPAUX
GROUPES DE SOL DE MADAGASCAR EN UTILISANT LA
SPECTROMETRIE MOYEN INFRAROUGE**

RESUME

En science du sol, la spectrométrie a été souvent utilisée pour la prédiction des propriétés du sol. Plus tard, certaines études ont essayé d'appliquer cette technique pour la classification des sols. Avec les spectres dans le moyen infrarouge (MIR), la présente étude a pour objectif de comparer la pertinence de la méthode de classification non supervisée «K-means clustering» avec la méthode supervisée «PLS-DA» pour le cas des sols de Madagascar. Les échantillons ont été prélevés sur 5 horizons jusqu'à 1m de profondeur dans 119 sites traversant l'île de l'Est vers l'Ouest et du Nord vers le Sud. Tous les échantillons ont été scannés dans le MIR. La méthode «k-means» a partitionné les échantillons en 8 clusters. Une analyse qualitative des clusters a été effectuée pour identifier les éléments minéraux caractérisant chaque cluster. L'horizon 20-30 cm (H3) a été choisi comme un horizon diagnostique. Sur les 2317 échantillons prélevés, 474 échantillons correspondant à H3 ont été utilisés pour le lot de calibration (n=355) et de validation (n=119) en PLS-DA. La déconvolution des spectres moyens a été utilisée pour les analyses qualitatives et l'ACP pour étudier la discrimination des groupes de sol. Les résultats ont montré que sur l'ensemble des échantillons, les 88% ont été bien classifiés en calibration et les 87% en validation avec la PLS-DA. En validation, les «cambisols-nitisols» ont été classifiés à 100% tandis que les arenosols ont été à 50% seulement. Les différences entre les clusters ont été identifiées surtout sur les régions spectrales spécifiques aux gibbsite entre 3700-3500cm⁻¹ pour les ferralsols, entre 3000-1700 cm⁻¹ pour les bandes à calcite caractéristiques des calcaric regosols, aux environs de 3620 cm⁻¹ et 1630 cm⁻¹ pour la smectite des vertisols, proche de 2000 cm⁻¹, 1870 cm⁻¹ et 1790 cm⁻¹ pour le quartz sur les clusters correspondant aux arenosols et aux luvisols, des bandes à kaolinite aux environs de 3694 cm⁻¹, 3655 cm⁻¹, 3620 cm⁻¹ et sans gibbsite pour les cambisols et nitisols. Les tests de corrélation entre les spectres moyens de la PLS-DA et du K-means ont donné des coefficients de détermination (R²) variant de 0,97 à 0,99. Ces résultats ont montré que les spectres MIR peuvent être utilisés pour classifier les sols. La méthode non supervisée permet de réaliser une étude sommaire de la distribution des sols. Elle regroupe les sols suivant leur propriété minéralogique sans avoir des modèles prédéfinis. La classification supervisée permet d'avoir directement les groupes de sol à partir des modèles par type de sol. Les deux méthodes sont complémentaires, pourront substituer les travaux de terrain. C'est un outil à la disposition des non spécialistes pour avoir les grands groupes de sol.

Mots clés: sol, Madagascar, classification, spectroscopie moyen infrarouge, PLS-DA, K-means clustering

1- INTRODUCTION

Durant des décennies, un grand nombre de recherches sur le sol a été consacré à l'étude de sa formation, de son évolution et de son fonctionnement. Les caractéristiques d'un sol dépendent des roches mères dont il est issu, mais sont également la résultante des différents facteurs liés aux climats, à la végétation et à l'activité anthropique (Roederer, 1971).

Pour le cas de Madagascar, les 46% et 27% de la superficie totale sont occupées respectivement par les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux de la classification Française des sols CPC (Delenne et Pelletier, 1981; Grinand *et al.*, 2009). Généralement situés sous les tropiques humides, les sols ferrallitiques profonds, rouges et jaunes, sont caractérisés par une altération poussée des minéraux primaires (Segalen, 1994), une forte teneur en sesquioxydes de fer et d'aluminium avec une grande domination des argiles kaolinitiques et la présence de la gibbsite (Riquier, 1966; Roederer, 1971; Aubert et Bourgeat, 1972). Les sols ferrugineux sont connus surtout par la présence d'une différenciation texturale due à la séparation des sesquioxydes des argiles et leur migration. Dans la classification FAO/UNESCO, les sols ferrallitiques sont représentés à Madagascar par les ferralsols, cambisols et nitisols et les sols ferrugineux par les arenosols et les luvisols. Les constituants d'un sol déterminent souvent leur couleur (Viscarra Rossel *et al.*, 2008b). Pour ceux de couleur jaunes et rouges, elles résultent essentiellement de la teneur et la nature des oxydes de fer, en l'occurrence l'hématite et la goethite (Fritsch *et al.*, 2005).

Pour avoir les propriétés des sols, les scientifiques faisaient toujours appel à des analyses physico-chimiques classiques en laboratoire. En complémentarité avec les résultats d'analyse, l'attribution d'une classe à un sol se fait seulement après une expertise et une description des profils pédologiques sur le terrain. Avec les contraintes liées aux coûts d'analyses et au temps dédié à ces travaux, les chercheurs se voient souvent limités dans leurs projets aussi bien dans le temps que dans l'espace. Le recours à d'autres méthodes plus innovantes et moins coûteuses demeure la seule alternative. L'intégration des techniques infrarouges dans les sciences du sol ouvre une nouvelle voie aux scientifiques et leur offre une grande opportunité pour pallier à ces problèmes. La réflectance spectroscopique diffuse a été beaucoup utilisée durant les 20 dernières années, coïncidant ainsi à l'intégration des techniques de chimométrie et de statistique multivarié dans les chimies analytiques (Viscarra Rossel *et al.*, 2008a). La technique de réflectance spectroscopique dans les régions de l'ultraviolet, visibles, proches et moyen infrarouges constituent des alternatives à des méthodes traditionnelles de laboratoire pour mesurer les propriétés des sols (Pirie *et al.*, 2005). Elle est beaucoup plus rapide, moins coûteuse, non destructive, simple et souvent plus précise que les méthodes conventionnelles (Rumpel *et al.*, 2001; McBratney *et al.*, 2006; Viscarra Rossel *et al.*, 2006b). Avec cette nouvelle technique, les réactifs chimiques ne sont plus nécessaires, les échantillons ne seront plus

fractionnés et pourtant, plusieurs composants du sol peuvent être prédits à partir d'un seul spectre de sol (Janik *et al.*, 2007). En science du sol, les proches (SPIR) et moyens infrarouges (SMIR) qui s'étendent respectivement sur la longueur d'onde de 25-400 cm^{-1} et de 400-4000 cm^{-1} ont été beaucoup utilisés pour la prédiction des propriétés des sols. Avec la méthode spectroscopique, certaines études sont axées spécialement sur la fraction organique du sol (ex. Zimmermann *et al.*, 2007), comme sur la fraction minérale (ex. Balan *et al.*, 2006). Différentes références attestent que le SMIR est beaucoup plus pratique que le SPIR pour prédire plusieurs propriétés du sol car les régions dans les moyens infrarouges sont surtout dominées par des intenses vibrations fondamentales (Janik *et al.*, 1998; Pirie *et al.*, 2005; Ludwig *et al.*, 2008; Viscarra Rossel *et al.*, 2008a; Michel *et al.*, 2009; Reeves, 2009). Actuellement, l'utilisation du SMIR continue de s'étendre dans d'autres thèmes. Les recherches tendent depuis quelques années à opter pour l'analyse spectroscopique afin d'identifier et de classifier les différents types de sol. Du *et al.* (2008) ont essayé d'utiliser le FTIR-PAS (fourier transform infrared photoacoustic spectroscopy) pour discriminer les sols agricoles Méditerranéens en utilisant des classes de sol prédéfinies. Il s'agissait des vertisols, des luvisols, des rendzines, des fluvisols et des cambisols. Leurs résultats ont avancé que 96% des 77 échantillons de validation ont été correctement identifiés avec le SMIR. D'autres auteurs ont également utilisé la chimiométrie pour la classification des sols : Linker *et al.* (2005) ont réalisé une identification des sols par le biais de l'analyse en composante principale (ACP) et les réseaux de neurones, la classification des sols brésiliens par Pontes *et al.* (2009), avec le laser-induced breakdown spectroscopy et l'analyse discriminante linéaire (LDA).

La présente étude a pour objectif de classifier les grands groupes de sol de Madagascar par la discrimination des spectres MIR. Les classifications non supervisée et supervisée sont basées exclusivement sur les données spectrales, sans la contribution des résultats d'analyses en laboratoire. L'intérêt principal sera d'avoir des méthodes de classification et surtout des modèles validés qui peuvent être utilisés en remplacement des travaux de description sur le terrain. Ce qui constituera un outil important à la disposition des non spécialistes en expertise pédologique. Il leur suffira d'adopter la méthode et d'utiliser les modèles par groupe de sol pour avoir la classification des sols et ceci pour un grand nombre d'échantillons.

2- MATERIELS ET METHODES

2.1 ZONES D'ETUDES

Étalée sur 578 040 km^2 , Madagascar est située dans l'Océan Indien entre 43° et 50° longitude Est et 12° et 25° latitude Sud. Selon la classification FAO des sols, la majeure partie des sols de Madagascar sur les Hautes Terres et dans la partie Est, est dominée par les ferralsols, les cambisols et les nitisols (correspondant à des sols ferrallitiques de la classification française

CPCS), par les luvisols et les arenosols (correspondant à des sols ferrugineux et sols fersiallitiques de la CPCS) en approchant la côte Ouest. Les fluvisols et les gleysols (correspondant à des sols alluvionnaires et hydromorphes) sur les zones de bas fond.

Une grande diversité de climat se rencontre à Madagascar : un climat perhumide et humide dans la partie orientale avec une pluviométrie moyenne supérieure à 1100 mm, un climat tropical d'altitude sur les Hautes Terres centrales et un climat semi-aride et aride avec une pluviosité moyenne annuelle inférieure à 400 mm dans le Sud Ouest et l'extrême Sud.

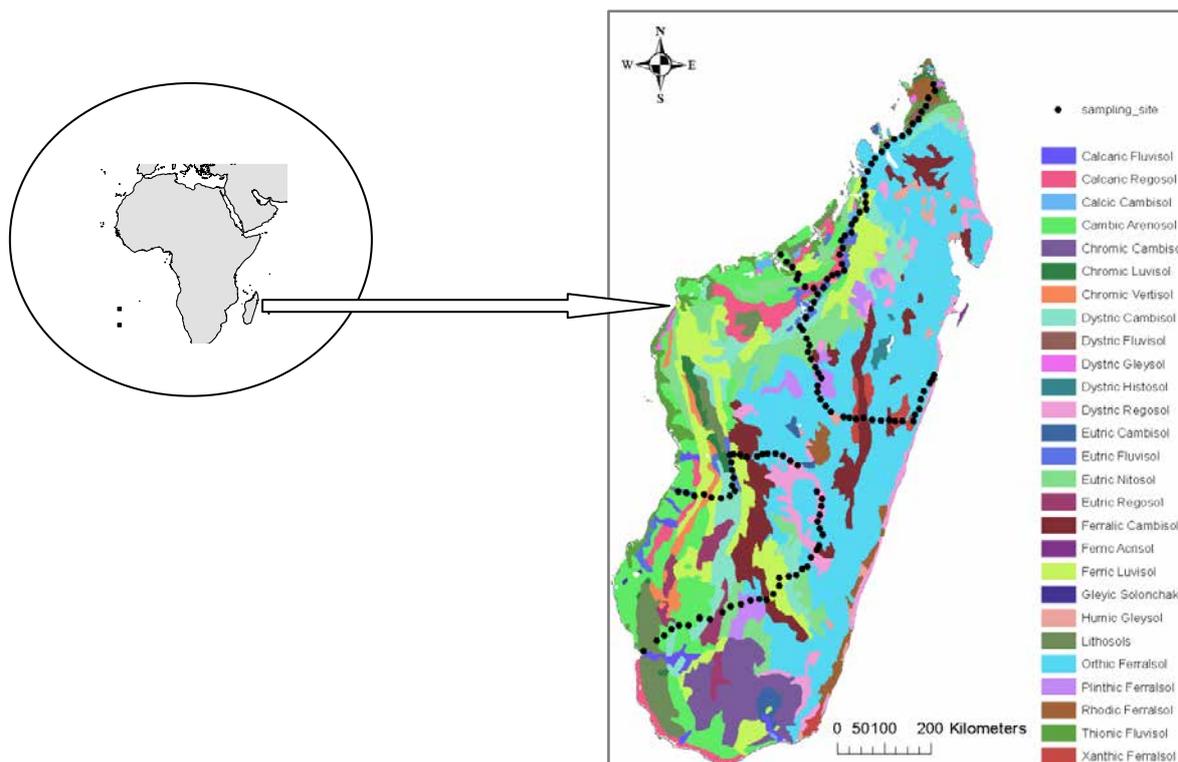


Figure 3-1: Carte pédologique de Madagascar (FAO, 1974) et localisation des sites de prélèvement

2.2 ECHANTILLONNAGE

Les échantillonnages ont eu lieu systématiquement tous les 20 km suivant les transects Est-Ouest et Nord-Sud. L'objectif était de prélever le maximum d'échantillons le long de ces deux axes. Afin d'homogénéiser les situations, chaque site représentait le paysage local. Les prélèvements ont été réalisés uniquement sur des zones de *tanety* non encore cultivées. Pour le cas des flancs de montagne ou des collines, les points ont été installés soit au 1/3 soit au 2/3 supérieur. Ce critère permet d'éviter de prélever sur le sommet ou en bas de pente, largement influencés par les eaux des pluies et des actions anthropiques. Les prélèvements ont été réalisés sur un carré de 10m², avec une répétition pour chaque angle, soient 4 répétitions pour chaque

profil au total. Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'un carottier sur 1m de profondeur et sur 5 horizons: 0-10cm, 10-20cm, 20-30cm, 50-60cm, 80-90cm. Les coordonnées géographiques de chaque site ont été prélevées, utiles pour les travaux de cartographie. Les échantillons ont été séchés à l'air libre dans une serre, fractionnés et tamisés à 2mm puis à 0,2mm.

Tableau 3-1: Nombre d'échantillons de sol et les noms attribués sur le terrain

| Groupe de sol | n total | n calibration (20-30 cm) | n validation (20-30 cm) | Autres horizons* |
|-----------------------|---------|--------------------------|-------------------------|------------------|
| Cambisols- Nitisols** | 989 | 155 | 52 | 782 |
| Ferralsols | 717 | 107 | 36 | 574 |
| Luvissols | 160 | 24 | 8 | 128 |
| Arenosols | 250 | 36 | 12 | 202 |
| Calcaric regosols | 81 | 15 | 5 | 61 |
| Vertisols | 120 | 18 | 6 | 96 |
| Total | 2317 | 355 | 119 | 1843 |

* 0-10, 10-20, 50-60,80-90 cm

** sur les spectres MIR, les cambisols et les nitisols ne présentent pas de différences significatives

2.3 ANALYSE SPECTRALE

Les échantillons broyés à 0,2 mm ont été scannés dans les régions de moyen infrarouge (MIR) entre 400 cm^{-1} et 4000 cm^{-1} (2500nm à 25nm) avec un spectromètre NICOLET 6700 FTIR Thermo Scientific et avec une résolution de 4 cm^{-1} . Les 2317 échantillons scannés provenaient des cinq profondeurs de prélèvement sur 1m.

2.4 PRETRAITEMENT DES DONNEES

Des prétraitements ont été utilisés pour éliminer les effets des facteurs externes au sol durant les analyses spectrales ainsi que les bruits dus à la vibration des molécules d'eau. Trois prétraitements ont été appliqués sur les 2317 spectres de départ. Il s'agit de la standard normal variate (SNV) qui vise à corriger chaque spectre en soustrayant la moyenne et en divisant par l'écart type du même spectre. Ce prétraitement permet aussi de corriger les variations du trajet lumineux, une option importante pour réduire les effets liés à la diffusion. La baseline offset a été utilisée après pour ramener la base à 0. Les spectres ont subi ensuite le « moving average smoothing » avec une taille du segment égal à 5. La moyenne mobile a été appliquée et qui consistait à remplacer la valeur d'une cellule par la moyenne des valeurs d'un segment de cellules voisines.

2.5 DECONVOLUTION DES SPECTRES POUR LES ANALYSES QUALITATIVES

La déconvolution permet de dissocier et d'identifier les bandes constituant chaque spectre. Ces bandes correspondent soit à des composants organiques soit à des composants minéraux. Un

des facteurs clés pour l'identification et la caractérisation d'un sol, les éléments minéraux nous intéressent particulièrement pour effectuer une étude qualitative. Chaque bande dissociée est caractérisée par son centre, son étendu et leur surface respective. La déconvolution a été réalisée avec le logiciel PEAKFIT.

2.6 CLASSIFICATION NON SUPERVISÉE : K-MEANS CLUSTERING

La classification non supervisée cherche à regrouper les spectres dans des classes préalablement définies. L'objectif est d'avoir des informations sommaires sur la distribution des spectres moyens dans chaque classe. La déconvolution de ces spectres moyens permet d'identifier les éléments minéraux les caractérisant. Le K-means fait partie des simples méthodes de classification non supervisée. C'est un algorithme qui permet de partitionner les données en K groupes homogènes. Pour cette méthode, l'algorithme cherche à minimiser la variance totale intra-cluster (Çeşmeci et Güllü, 2009). Dans le cas présent, la distance a été basée sur le coefficient de corrélation de Pearson, calculé à partir des échantillons et leurs écart-types. Le coefficient de corrélation r prend les valeurs entre -1 et +1. La distance de Pearson dp est calculée comme suit :

$$dp = 1 - r$$
$$r = \frac{\sum[(x - \bar{x})(y - \bar{y})]}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$$

Le nombre d'itération qui est le nombre de fois où l'algorithme k-means est répété pour avoir un résultat de partition optimal, a été fixé à 50. Cette méthode a été appliquée sur l'ensemble des échantillons, tout horizon confondu en fixant le nombre de cluster à 8. Les spectres moyens par cluster étaient ensuite calculés. Par définition, un cluster est une partition dans laquelle sont regroupés les spectres similaires.

2.7 CLASSIFICATION SUPERVISEE : PARTIAL LEAST SQUARES- DISCRIMINANT ANALYSIS

La Partial Least Squares- Discriminant Analysis (PLS-DA) est une méthode de classification supervisée. Le principal objectif est de prédire un degré d'appartenance d'un échantillon à chacune des groupes de sol existante. Sur le terrain, la majorité des échantillons a été décrite comme appartenant à 6 groupes de sol (voir tableau 3-1) selon les expertises pédologiques réalisées. La comparaison des résultats de la prédiction avec ceux des descriptions sur le terrain nous offre le pouvoir prédictif de cette méthode à discriminer les groupes de sol. La variable sol est disjonctée en 0 et 1 pour pouvoir établir un modèle par type de sol à partir des spectres. Une fois les modèles établis, ils vont être utilisés pour prédire les types de sol en prenant chacune des variables disjonctées comme Y référence. La valeur prédite pour chaque échantillon

représente son degré d'appartenance à l'une des variables disjonctées. A la fin, le pourcentage des échantillons prédits exprime la robustesse des modèles établis et le pouvoir de la méthode PLS-DA à discriminer les groupes de sol.

Les échantillons de l'horizon 20-30 cm ont été choisis pour l'établissement des modèles. C'est un horizon moins riche en matière organique et facile à prélever. Ces échantillons ont été divisés en deux lots : 75% pour le lot de calibration et 25% pour la validation (voir tableau 3-1). Le groupe de sol prédit pour le lot de validation a été attribuée aux restes des profondeurs prélevés donc au site de prélèvement.

2.8 ANALYSE MULTIVARIEE ET DECONVOLUTION DES BANDES

Après avoir attribué un nom de sol à l'ensemble des horizons, une analyse en composante principale (ACP) des spectres a été réalisée afin d'étudier le mode de regroupement des échantillons. Il s'agit d'une ACP avec des données spectrales centrés, non réduites et non normalisées. L'objectif est d'évaluer et de valider les résultats de la PLS-DA. L'ACP devra arriver à discriminer chaque groupe de sol issu de l'analyse discriminante. L'ACP permet d'identifier le nombre optimal des composantes principales qui discrimine le mieux les individus. Elle permet également d'effectuer une analyse qualitative de la distribution et des regroupements des différents types de sol. Une information importante qui est le « *loading* » est obtenue également avec l'ACP. Les *loadings* ou encore vecteurs propres ou axes principaux représentent ici la contribution des longueurs d'ondes à la construction des composantes principales (PC).

Avec le logiciel peakfit, la déconvolution des *loadings* et des spectres moyens de chaque groupe de sols permettent d'avoir les différentes bandes ou pics qui forment chaque spectre. Chaque bande correspond soit à un élément minéral soit à un élément organique ou la superposition des deux. Le centre de chaque bande est représenté en nombre d'ondes dans la région des moyens infrarouges entre 4000cm^{-1} et 400cm^{-1} . Les pics caractéristiques des *loadings* devront correspondre à ceux caractéristiques de chaque classe de sol. Cette déconvolution des *loadings* et des spectres moyens expliquent ainsi la discrimination entre les différents groupes de sol.

L'importance de l'absorbance pour chaque bande spectrale exprime la présence des éléments minéraux ou organiques présents à cette fréquence. Ces bandes expliquent ainsi la répartition des échantillons suivant les composantes principales.

2.9 TESTS DE CORRELATION

Les deux méthodes de classification permettent d'avoir des groupes de sol à partir des données spectrales MIR. Les résultats issus de la méthode non supervisée k-means vont être comparés avec ceux de la PLS-DA. L'idée est d'identifier le cluster qui correspond le mieux à chaque type

de sol prédit dans la classification supervisée. Pour cela, une régression linéaire entre les absorbances de chaque cluster et de chaque type de sol a été effectuée pour avoir leur corrélation. Les résultats de la corrélation proviennent de la comparaison des absorbances sur chaque fréquence de nombre d'onde entre 4000 cm^{-1} et 400 cm^{-1} . Ceux qui auront des fortes corrélations (R^2 élevé) seront gardés.

2.10 ANALYSES STATISTIQUES

Les analyses statistiques ont été réalisées avec les logiciels R-Stat et The Unscrambler. Certains graphes ont été dessinés avec le logiciel SIGMAPLOT.

3- RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 CLASSIFICATION NON SUPERVISEE

Le k-means clustering a partitionné les données spectrales en 8 clusters. Le tableau 3-2 montre le nombre de spectres qui constitue chaque cluster. Le cluster 6 (F) enregistre le moins d'échantillons avec 78 spectres par rapport aux autres. Les spectres moyens par cluster ont été calculés et représentés sur la figure 3-2.

Tableau 3-2: Nombre de spectres par cluster

| n spectres | | n spectres | |
|------------|-----|------------|-----|
| cluster 1 | 177 | cluster 5 | 443 |
| cluster 2 | 406 | cluster 6 | 78 |
| cluster 3 | 417 | cluster 7 | 375 |
| cluster 4 | 236 | cluster 8 | 205 |

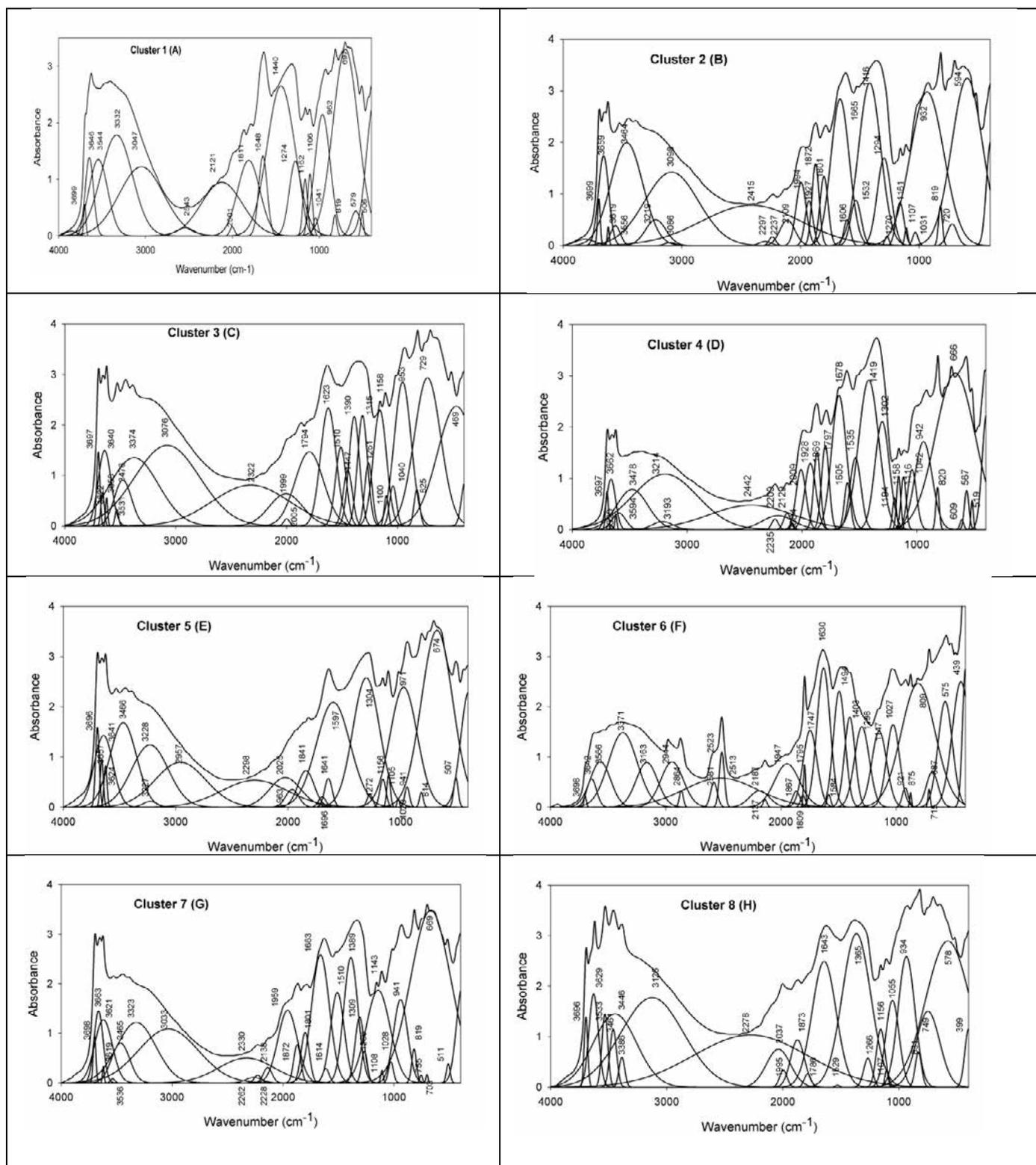


Figure 3-2: Spectres moyens et déconvolution de chaque cluster

A première vue, le cluster 6 (F) se différencie des autres par l'absence des pics entre 4000 cm^{-1} et 3000 cm^{-1} ainsi que la présence des 4 pics très nets entre 3000 cm^{-1} et 2000 cm^{-1} . Le cluster 1 (A) est caractérisé par la présence d'un seul pic dans les régions supérieures à 3000 cm^{-1} et d'un

important pic entre 2000 cm^{-1} et 1000 cm^{-1} . Les autres spectres se distinguent aussi sur ces deux régions: entre 4000 cm^{-1} et 3000 cm^{-1} , les clusters 8 (H) et 3 (C) présentent 3 autres pics après les deux premiers. Ces trois bandes sont absentes ou moins importantes pour les clusters 2 (B), 4 (D) et 7 (H). Entre 2000 cm^{-1} et 1000 cm^{-1} , les clusters 2 (B) et 4 (D) sont caractérisés par la présence des trois petits pics à l'approche de 2000 cm^{-1} et un pic très important tout près du milieu de cette région. Sur l'allure des spectres, les clusters 5 (E) et 7 (G) ont une grande similitude et pourront appartenir à un même groupe de sol.

Tableau 3-3: Centres et surfaces analytiques des bandes correspondant à des éléments minéraux pour chaque cluster

| Bandes (Cm^{-1}) proches de | Éléments | Fonctions | Centre (cm^{-1}) / surface analytique | | | | | | | | Références |
|---|--------------------|-----------------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
| | | | Cluster 1 [A] | Cluster 2 [B] | Cluster 3 [C] | Cluster 4 [D] | Cluster 5 [E] | Cluster 6 [F] | Cluster 7 [G] | Cluster 8 [H] | |
| 3694 | Kaolinite | OH stretching vibration | 3699 17,2 | 3699 26,05 | 3697 53,49 | 3697 22,96 | 3696 67,14 | 3698 5,65 | 3698 29 | 3696 54,2 | Nguyen et al., (1991) - Bardy et al., (2008) |
| 3655 | Kaolinite | OH stretching vibration | | 3659 190,2 | 3640 217,2 | 3662 97,29 | 3657 33,36 | 3642 60,5 | 3663 148 | | Nguyen et al., (1991) - Bardy et al., (2008) |
| 3630 | Smectite | OH stretching vibration | 3646 164 | | | | | | | | Nguyen et al., (1991) |
| 3622 | Kaolinite/Gibbsite | OH stretching vibration | | 3619 7,72 | 3622 13,38 | 3620 6,44 | 3624 27,51 | | 3621 6,48 | 3629 188 | Balan et al., (2006)- Nguyen et al., (1991) |
| 3525 | Gibbsite | OH stretching vibration | | | 3531 12,82 | | | | | 3533 92,3 | Balan et al., (2006)- Nguyen et al., (1991) |
| 3450 | Gibbsite | OH stretching vibration | | | 3476 176,9 | | | | | 3446 678 | Balan et al., (2006)- Nguyen et al., (1991) |
| 3392 | Gibbsite | OH stretching vibration | | | | | | | | 3386 37,1 | Balan et al., (2006)- Nguyen et al., (1991) |
| 3376 | Gibbsite | OH stretching vibration | | | 3374 744,1 | | | | | | Balan et al., (2006)- Nguyen et al., (1991) |
| 2988 | Calcite | carbonate ion vibration | | | | | | 2944 220 | | | Nguyen et al., (1991) |
| 2880 | Calcite | carbonate ion vibration | | | | | | 2864 14 | | | Nguyen et al., (1991) |
| 2517 | Calcite | carbonate ion vibration | | | | | | 2513 60 | | | Nguyen et al., (1991) |
| 2000 | Quartz | Si-OH stretching vibration | 2001 10,8 | 1994 130,4 | 1999 9,41 | 2009 125,2 | | | | 1995 27 | Nguyen et al., (1991) - Viscarra Rossel et al., (2008) |
| 1870 | Quartz | Si-OH stretching vibration | | 1872 118,2 | | 1869 110,5 | | 1867 25,7 | 1872 60,2 | 1873 141 | Nguyen et al., (1991) - Viscarra Rossel et al., (2008) |
| 1800 | Calcite | carbonate ion vibration | | | | | | 1795 20,2 | | | Nguyen et al., (1991) |
| 1790 | Quartz | Si-OH stretching vibration | | 1801 116,3 | 1794 471 | 1797 135,9 | | 1795 20,2 | 1801 95,4 | 1786 19,1 | Nguyen et al., (1991) - Viscarra Rossel et al., (2008) |
| 1670 | Quartz | Si-OH stretching vibration | | 1665 546,8 | | 1678 417,8 | | | | | |
| 1630 | Smectite | | 1648 173 | | | | | 1630 395 | | | Janik et al., (2005) |
| 1160 | Quartz | Si-OH stretching vibration | 1162 67,4 | 1161 69,68 | 1158 344,7 | 1158 46,31 | 1156 37,38 | | 1143 503 | 1156 107 | |
| 1116 | Kaolinite | Al-OH deformation vibration | | | | 1116 57,17 | | | | | Ip et al., (2008) |
| 1105 | Kaolinite | Al-OH deformation vibration | 1106 72,2 | 1107 11,49 | 1100 28,1 | | 1105 25,06 | | 1108 7,21 | 1107 12 | Ip et al., (2008) |
| 1020 | Kaolinite | Al-O-Si lattice vibration | 1041 20,9 | 1031 14,38 | 1040 61,51 | 1042 115,4 | 1020 4,15 | 1027 232 | 1028 23,9 | | Nguyen et al., (1991) - Viscarra Rossel et al., (2008) |
| 875 | Calcite | carbonate ion vibration | | | | | | 875 5,66 | | | Nguyen et al., (1991) |
| 800 | Quartz | Si-OH stretching vibration | 819 19,4 | 819 31,53 | 825 45,68 | 820 30,94 | 814 11,98 | | 819 36,8 | 831 47,8 | Nguyen et al., (1991) - Viscarra Rossel et al., (2008) |
| 720 | Calcite | carbonate ion vibration | | | | | | 715 8,45 | | | Nguyen et al., (1991) |

Les résultats de la déconvolution des spectres moyens par cluster sont représentés dans le tableau 3-3. Les pics correspondant à des éléments minéraux ont été identifiés et comparés à ceux trouvés dans la littérature. Le centre et la surface respective de chaque bande ont été retenus. Notons que ces surfaces expriment l'importance de chaque bande dans la construction des spectres. 5 principaux constituants minéraux ont été identifiés : l'argile kaolinitique, la gibbsite, le quartz, la calcite et la smectite.

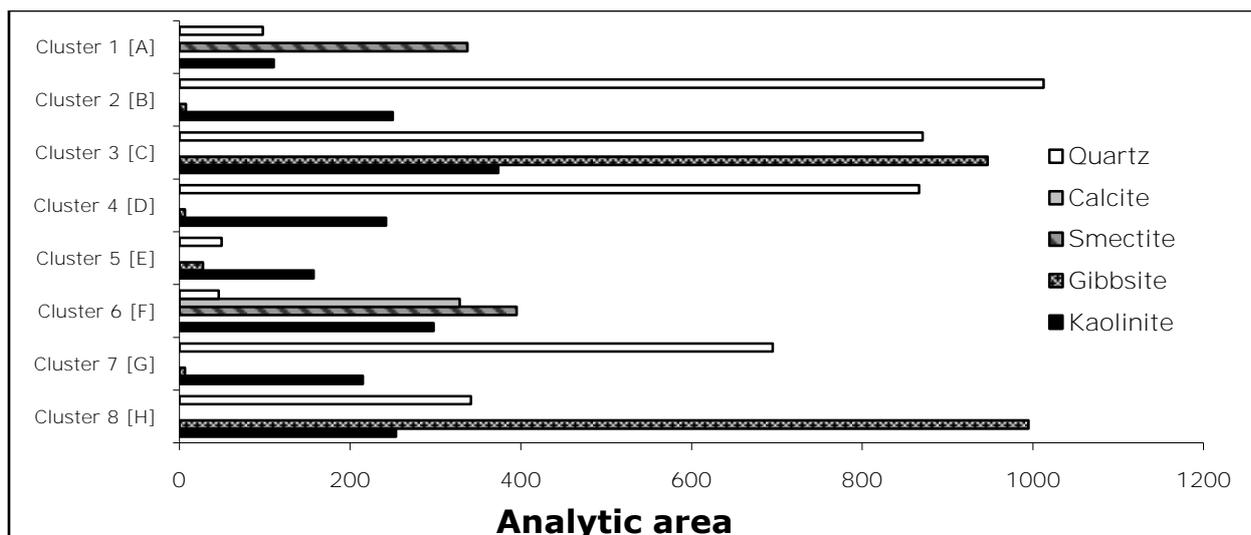


Figure 3-3: Surface cumulée des constituants minéraux

Pour chacun des éléments minéraux identifiés dans le tableau 3-3, les surfaces cumulées sont représentées sur la figure 3-3. Outre la kaolinite, on peut noter l'importance de la smectite aux environs de 3630 cm^{-1} et de 1630 cm^{-1} pour les clusters 1 et 6. Le cluster 6 est caractérisé aussi par la présence notable des calcites entre 2500 cm^{-1} et 3000 cm^{-1} , proche de 1800 cm^{-1} et de 875 cm^{-1} . Les clusters 2, 4 et 7 sont respectivement dominés par le quartz aux environs et en dessous de 2000 cm^{-1} . Moins importante que le quartz, la kaolinite est également présente dans les spectres moyens de ces 3 clusters. Il est à noter également l'importance de la gibbsite pour les clusters 3 et 8. Les gibbsites sont représentées par les bandes proches de 3622 cm^{-1} , 3525 cm^{-1} , 3450 cm^{-1} , 3392 cm^{-1} et 3376 cm^{-1} . La kaolinite et le quartz sont importants aussi pour ces 2 clusters. Le cluster 5 est dominé par les argiles kaolinitiques et le quartz.

3.2 CLASSIFICATION SUPERVISEE

Le tableau 3-4 montre les résultats de la PLS-DA sur les échantillons en calibration et en validation de l'horizon diagnostic 20-30 cm. Cette méthode arrive à classer 88% des 474 échantillons en calibration et 87% des 119 échantillons en validation. Les pourcentages les plus élevés des échantillons bien classés s'obtiennent avec les calcaric regosols, les ferralsols et les cambisols-nitisols, avec respectivement 100%, 95%, 95% en calibration et 80%, 89% et 100% en validation.

Tableau 3-4: Résultats de la PLS-DA en calibration et en validation

| Groupes de sol | n total H3 | n calibration | classifiés | % | n validation | classifiés | % |
|---------------------|------------|---------------|------------|------|--------------|------------|------|
| Cambisols- Nitisols | 207 | 155 | 148 | 95% | 52 | 52 | 100% |
| Ferralsols | 143 | 107 | 102 | 95% | 36 | 32 | 89% |
| Luvisols | 32 | 24 | 15 | 63% | 8 | 6 | 75% |
| Arenosols | 48 | 36 | 19 | 53% | 12 | 6 | 50% |
| Calcaric Regosols | 20 | 15 | 15 | 100% | 5 | 4 | 80% |
| Vertisols | 24 | 18 | 13 | 72% | 6 | 4 | 67% |
| Total | 474 | 355 | 312 | 88% | 119 | 104 | 87% |

Les arenosols sont les moins prédits avec seulement un pourcentage de 53% pour les biens classés en calibration et de 50% en validation. Du point de vue minéralogie des sols, les absorbances lors des analyses spectrales pour chaque élément minéral présent constituent les principaux éléments de différenciation pour chaque modèle. Les sols sont regroupés en fonction de leur richesse en chacun de ces éléments : gibbsite, smectite, kaolinite, quartz et les minéraux carbonatés.

Les calcaric regosols sont caractérisés par la présence des carbonates de calcium (CaCO_3), des pures calcites, de la dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ainsi que d'autres minéraux carbonatés comme les carbonates de magnésium (MgCO_3), carbonate de sodium (Na_2CO_3), carbonate de baryum (BaCO_3). Ce sont ces éléments minéraux carbonatés qui vont s'exprimer dans les régions spectrales des moyens infrarouges, surtout entre 3000 cm^{-1} et 2000 cm^{-1}

Les vertisols se démarqueront des autres types de sol par la présence des smectites. Ce sont des argiles 2/1 qui s'expriment autant que les argiles kaoliniques 1/1 dans les régions des moyens infrarouges. Outre l'importance de l'argile kaolinique dans les ferralsols, les gibbsites (Al_2OH_3) sont présentes aussi en quantité importante dans ce groupe de sol. Les kaolinites apparaissent entre 3700 cm^{-1} et 3500 cm^{-1} et dans les régions inférieures à 1000 cm^{-1} (Du *et al.*, 2008). Les gibbsites s'expriment aussi dans les moyens infrarouges entre 3700 cm^{-1} et 3200 cm^{-1} (Balan *et al.*, 2006; Madari *et al.*, 2006). Avec les ferralsols, les cambisols et les nitisols font partie aussi des sols argileux. Par rapport aux ferralsols, les gibbsites sont soit absents soit en faibles quantités dans ces deux types de sol. Les arenosols et les luvisols ont en général une texture sableuse avec une migration de l'argile de l'horizon supérieur vers l'horizon en profondeur pour les luvisols. Les absorbances liés à la présence de quartz sont beaucoup plus importantes pour ces deux types de sol. La région spectrale entre 2000 cm^{-1} et 1650 cm^{-1} est caractéristique au quartz (Nguyen *et al.*, 1991; Viscarra Rossel *et al.*, 2008b).

3.3 ANALYSES QUALITATIVES

Après avoir obtenu les résultats de la PLS-DA, les noms des sols prédits en validation ont été attribués directement aux 4 autres horizons du profil. Une analyse en composante principale était ensuite réalisée sur l'ensemble des échantillons reclassés. Les 6 premières composantes principales représentent 92% des informations. La figure 3-4 et la figure 3-5 montrent que les différents groupes de sol sont bien discriminés suivant les différentes composantes principales.

Sur PC1 qui exprime 55% de la contribution des axes, les ferralsols sont regroupés dans la partie négative. Les cambisols-nitisols sont groupés sur la partie positive. L'axe 2 explique 19% des informations de l'ACP. Les arenosols et les luvisols se trouvent dans la moitié négative de la PC2 et une partie des ferralsols et des cambisols-nitisols se regroupent sur l'autre moitié positive.

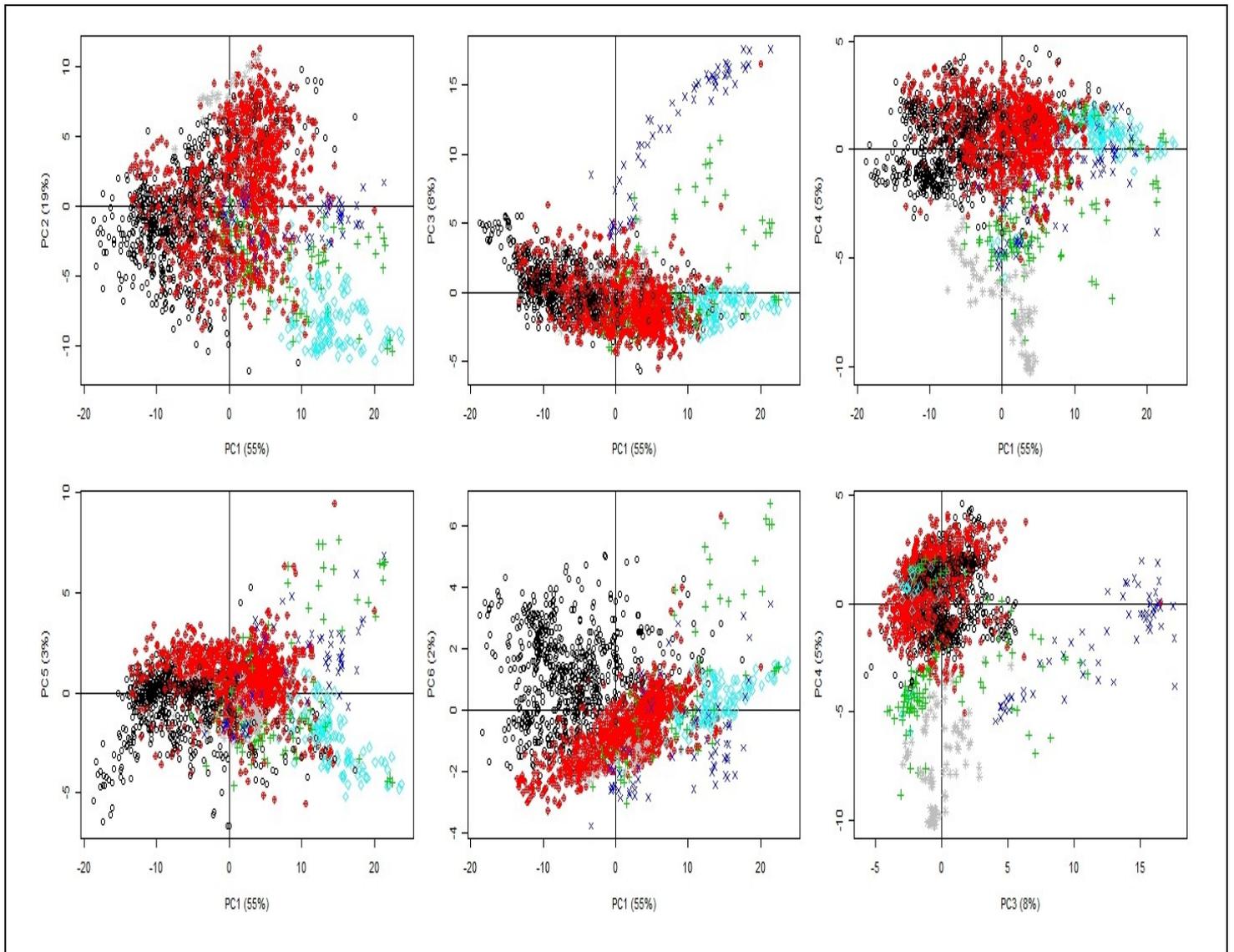


Figure 3-4: ACP des 5 horizons reclassés avec la méthode PLS-DA (noir: ferralsols, rouge : cambisols-nitisols, bleu: calcareic regosols, gris: vertisols, vert: Luvisols, magenta: arenosols)

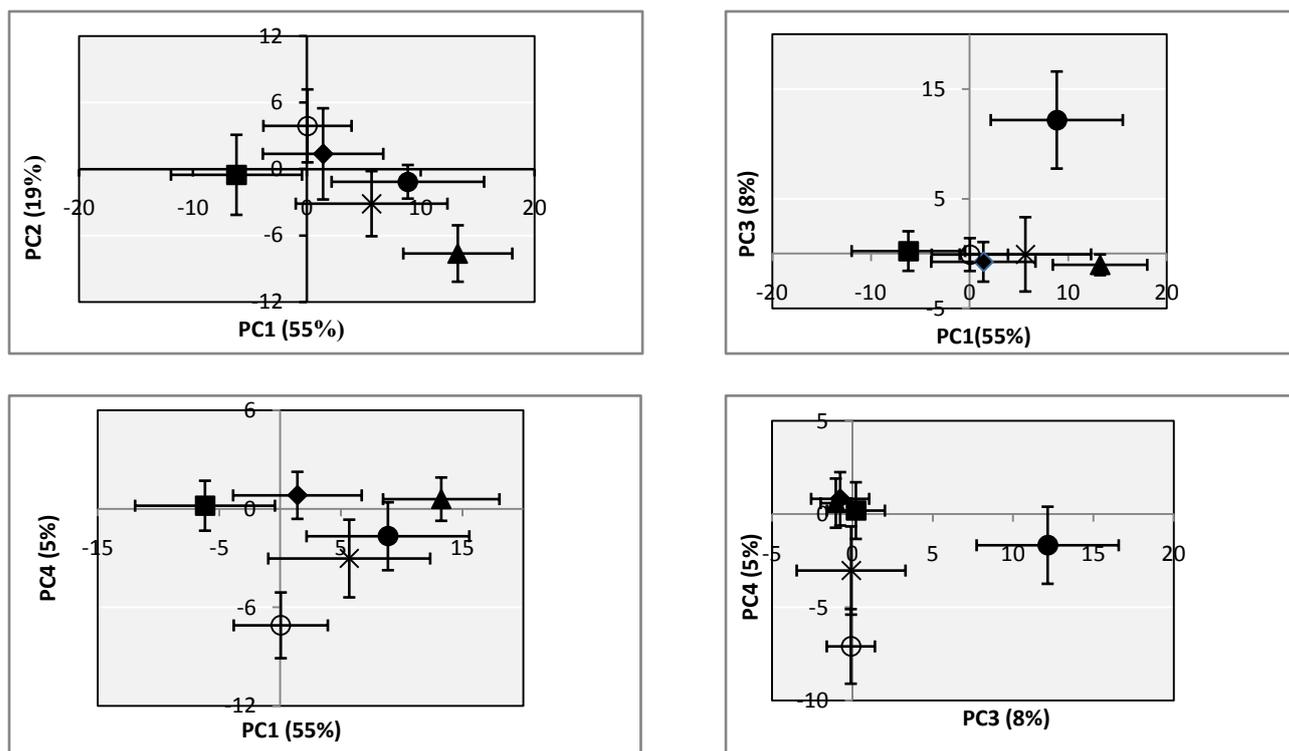


Figure 3-5: ACP de la moyenne des scores et leurs écarts types (■ Ferralsols, ◆ Cambisols-Nitisols, ▲ Arenosols, × Luvisols, ○ Vertisols, ● Calcaric Regosols)

La PC3 explique les 8% des informations sur l'ACP. Ce sont les échantillons de calcaric regosols qui se démarquent le long de cet axe en positif et les arenosols en négatif. Deux groupes de sol sont représentés également par la PC4 qui exprime 5% des informations : les vertisols et les luvisols. Les PC5 et PC6 n'expriment respectivement que 3% et 2% des informations dans leur axe positif avec certains échantillons de luvisols pour PC5 et une partie des ferralsols pour PC6.

La déconvolution des spectres moyens pour chaque type de sol offre les différentes bandes qui les caractérisent. Ces bandes vont être confrontées avec celles trouvées sur la déconvolution des loadings pour expliquer la discrimination des spectres lors de l'ACP. Sur la figure 3-6, le loading PC1 est surtout influencé par les bandes entre 3700 cm^{-1} et 3000 cm^{-1} . Cette région spectrale est connue par la présence des gibbsites et des argiles kaolinitiques. La gibbsite fait partie des principaux constituants minéraux des ferralsols, tandis qu'elle est très rare, le plus souvent absente pour les arenosols et les luvisols (Segalen, 1994). Les bandes à gibbsites se trouvent aux environs de 3622 cm^{-1} , 3525 cm^{-1} , 3450 cm^{-1} , 3392 cm^{-1} , 3376 cm^{-1} et qui sont dues aux élongations des liaisons $-\text{OH}$ (Nguyen *et al.*, 1991; Balan *et al.*, 2006; Madari *et al.*, 2006; Bardy *et al.*, 2008). Sur la déconvolution du loading PC1, les pics à 3613 cm^{-1} , 3528 cm^{-1} , 3463 cm^{-1} et 3397 cm^{-1} peuvent être attribués aux gibbsites des ferralsols, qui expliquent ainsi le regroupement de ce type de sol sur l'axe négatif. Malgré la différence en nombre d'onde, la déconvolution du spectre moyen des ferralsols fait sortir des bandes très proches de celles trouvées avec le

loading : 3621 cm^{-1} , 3451 cm^{-1} , 3466 cm^{-1} , 3423 cm^{-1} . A part la gibbsite, les deux premiers pics correspondent à des argiles kaolinitiques. Les kaolinites sont présents entre 3700 cm^{-1} et 3500 cm^{-1} (Du *et al.*, 2008), dont les signatures spectrales sont dues à la vibration d'élongation des liaisons -OH (Nguyen *et al.*, 1991). Ils sont aussi présents en dessous de 1100 cm^{-1} (Nguyen *et al.*, 1991; Madari *et al.*, 2006; Ip *et al.*, 2008) grâce à la vibration de déformation angulaire des Al-OH . Les kaolinites sont essentiellement caractérisés par trois pics proches de 3694 cm^{-1} , 3655 cm^{-1} , 3620 cm^{-1} (Nguyen *et al.*, 1991; Bardy *et al.*, 2008). La bande proche de 3620 cm^{-1} est commune à la kaolinite et à la gibbsite. Ces trois pics spécifiques sont apparus sur la déconvolution des ferralsols avec 3698 cm^{-1} , 3684 cm^{-1} et 3621 cm^{-1} tandis qu'il n'y a que 2 pics à 3696 cm^{-1} et 3613 cm^{-1} dans le loading. PC1 est aussi influencé par 2 pics 960 cm^{-1} et 845 cm^{-1} . Le premier qui est similaire à celui à 974 cm^{-1} sur le spectre moyen des ferralsols, exprime une kaolinite standard suite à la vibration d'élongation des liaisons Si-O (Ip *et al.*, 2008). Le second correspond à la vibration d'élongation et de déformation angulaire des liaisons O-Si-O des quartz (Nguyen *et al.*, 1991).

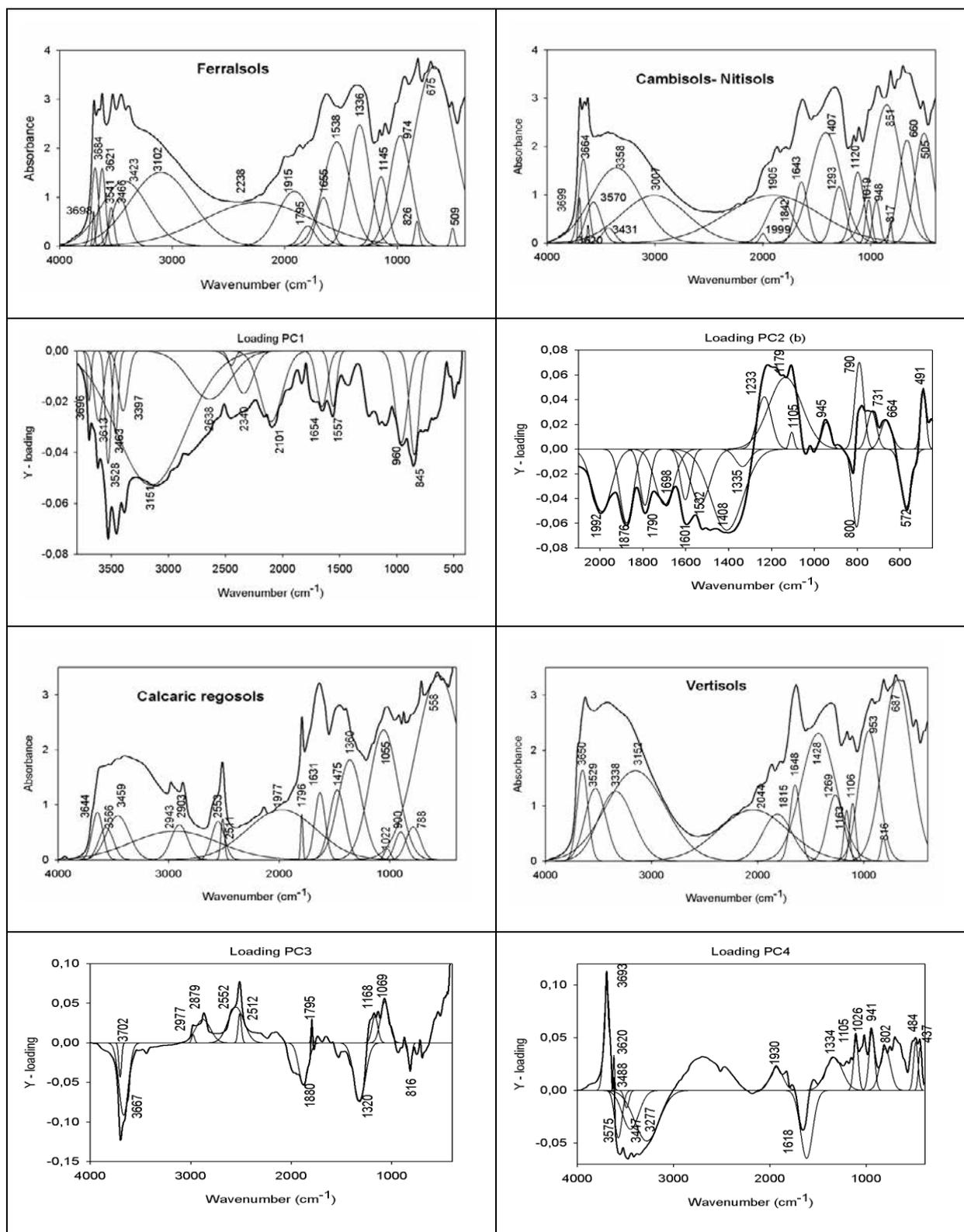


Figure 3-6: Déconvolution des spectres moyens de ferralsols, cambisols-nitisols, calcaric regosols, vertisols et déconvolution des loadings PC1, PC2, PC3, PC4

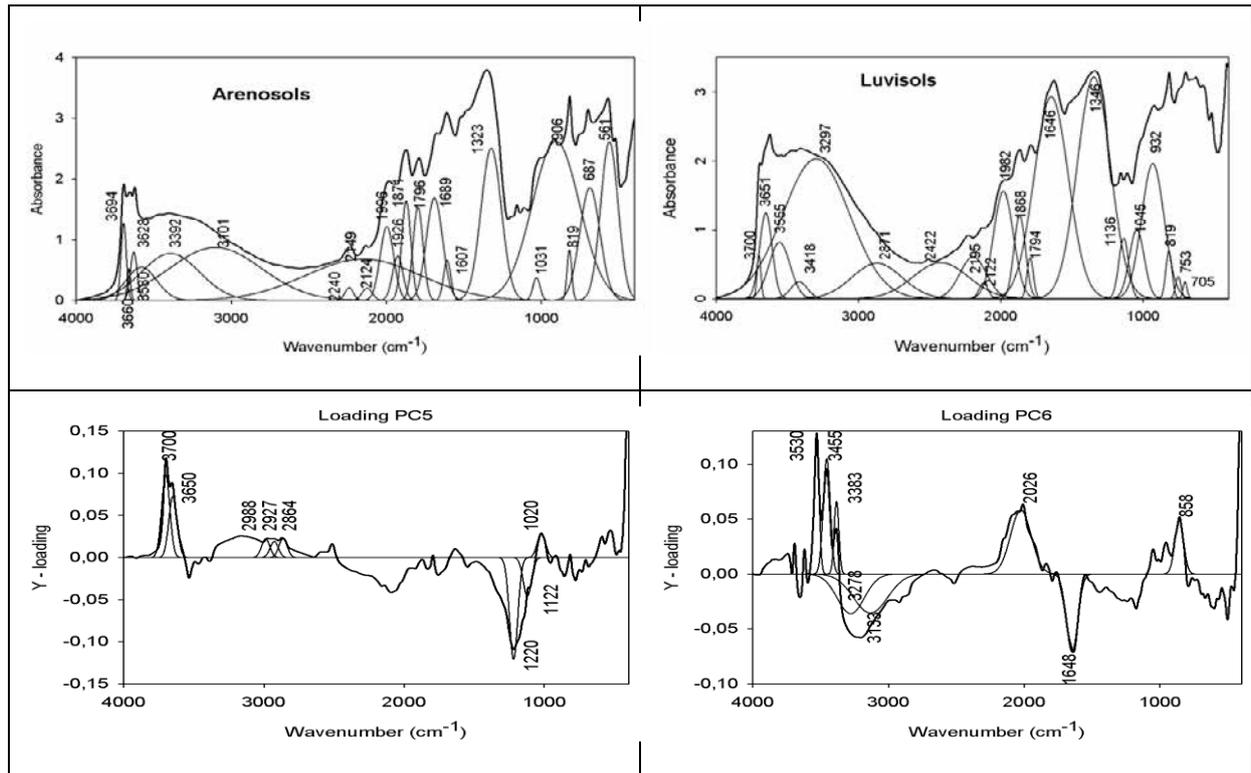


Figure 3-7: Déconvolution des spectres moyens des arenosols et des luvisols, et déconvolution des loadings PC5, PC6

Les arenosols, les luvisols et les cambisols-nitisols ne présentent pas de bandes à gibbsite. Ils se trouvent regroupés le long de la PC1 en positif (figure 3-6) et sont caractérisés par les bandes à kaolinites : 3699 cm^{-1} , 3664 cm^{-1} , 3620 cm^{-1} pour les cambisols-nitisols, 3694 cm^{-1} , 3660 cm^{-1} , 3628 cm^{-1} pour les arenosols. Les luvisols ne présentent que deux pics à kaolinite à 3700 cm^{-1} et à 3651 cm^{-1} . La déconvolution du loading PC2 (figure 3-6) montre l'existence des 3 bandes très nettes à 1992 cm^{-1} , 1876 cm^{-1} et 1790 cm^{-1} en négatif. Ces bandes sont attribuables au quartz. D'après Viscarra Rossel *et al.* (2008b) ; Nguyen *et al.* (1991), la vibration d'élongation des Si-OH provoque l'apparition des bandes à quartz à 2000 cm^{-1} , 1870 cm^{-1} et 1790 cm^{-1} . Le pic à 800 cm^{-1} sur PC2 est dû à la vibration de déformation angulaire des liaisons O-Si-O. Ces bandes caractéristiques du quartz sont présentes dans les spectres des arenosols et des luvisols, qui sont des sols à texture sableuse. Rappelons que la PC2 en négatif (figure 3-6) représente ces deux types de sol. Elles sont présentes à 1996 cm^{-1} , 1874 cm^{-1} , 1796 cm^{-1} , 819 cm^{-1} pour les arenosols, tandis qu'à 1982 cm^{-1} , 1868 cm^{-1} et 819 cm^{-1} pour les luvisols. Ces deux types de sol se rencontrent en général dans des zones où la pluviosité reste inférieure à celle des zones des ferrallsols. Les arenosols se développent souvent sur des roches sédimentaires. Ils sont caractérisés par l'absence des gibbsite. Lors de l'altération de la roche mère, l'insuffisance des eaux de pluie limite le drainage des silices et empêche l'individualisation des aluminiums pour former de la gibbsite. Les silices non évacués se combinent ainsi avec les aluminiums pour la formation des argiles, d'où l'absence des gibbsite. Durant la ferrallitisation, l'altération des

minéraux primaires est complète sauf celle du quartz (Duchaufour *et al.*, 1991). C'est ce qui explique ainsi la présence des bandes à quartz dans les sols argileux : à 1795 cm^{-1} et à 826 cm^{-1} pour les ferralsols et à 1999 cm^{-1} , à 1842 cm^{-1} et à 817 cm^{-1} pour les cambisols-nitisols. Les pics à 945 cm^{-1} , 790 cm^{-1} et 491 cm^{-1} sont attribués aussi au quartz.

Les arenosols et les luvisols sont caractérisés aussi par l'importance particulière des 2 pics : à 1607 cm^{-1} et 1323 cm^{-1} pour les arenosols et à 1646 cm^{-1} et 1335 cm^{-1} pour les luvisols. Ces bandes sont attribuées à des groupes organiques. Les bandes proches de 1610 cm^{-1} et de 1394 cm^{-1} résultent des carboxylates (vibration d'élongation des liaisons C=O et C-O) qui sont souvent liés à des métaux (Do Nascimento *et al.*, 2004; Bardy *et al.*, 2008). Sur le loading PC2 (figure 3-6), ces pics sont à 1601 cm^{-1} et à 1408 cm^{-1} . Le pic à 1364 cm^{-1} est dû à la vibration d'élongation et de déformation des liaisons C-H des produits aliphatiques. Les bandes à 1335 cm^{-1} pour PC2 et dans les luvisols, 1323 cm^{-1} pour les arenosols pourront être attribuées à ces composés aliphatiques. Les bandes plus proches de 1655 cm^{-1} , 1660 cm^{-1} ou encore 1640 cm^{-1} sont attribuées à des groupes amides (Skjemstad et Dalal, 1987; Do Nascimento *et al.*, 2004; Bardy *et al.*, 2008).

La PC3 (figure 3-6) discrimine les calcaric regosols sur la partie positive. La déconvolution du spectre moyen et du loading PC3 montre l'existence des 5 bandes spécifiques à ce type de sol par rapport aux autres. Elles sont à 2934 cm^{-1} , 2903 cm^{-1} , 2553 cm^{-1} , 2511 cm^{-1} et 1796 cm^{-1} sur le spectre moyen. Sur le loading PC3, ces bandes ont été identifiées à 2977 cm^{-1} , 2879 cm^{-1} , 2552 cm^{-1} , 2512 cm^{-1} et 1795 cm^{-1} . Ces bandes sont très proches et il convient ainsi d'avancer qu'elles correspondent sur ces deux types de déconvolution. Les régions spectrales entre $2600\text{-}2300\text{ cm}^{-1}$ et entre $1600\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ représentent souvent les bandes aux calcites (Nguyen *et al.*, 1991; Du *et al.*, 2008). De même, dans les régions entre $3000\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$ s'exprime aussi les pics des carbonates de calcium (Poulenard *et al.*, 2009). D'après Nguyen *et al.* (1991), les calcites pures s'expriment aux environs de 2988 cm^{-1} , 2880 cm^{-1} , 2517 cm^{-1} , 1800 cm^{-1} , 1470 cm^{-1} , 875 cm^{-1} et 720 cm^{-1} . Une partie des arenosols est expliquée par PC3 en négatif. Ils sont caractérisés sur ce loading par le pic de kaolinite à 3667 cm^{-1} , un pic de quartz à 1880 cm^{-1} , et le pic dû à des composés aliphatiques à 1320 cm^{-1} .

Les vertisols se regroupent sur la PC4 (figure 3-6) en négatif. Ils sont caractérisés sur ce loading par les 4 bandes entre 3700 cm^{-1} et 3000 cm^{-1} et celle à 1618 cm^{-1} . Les kaolinites et les smectites sont présents tous les deux dans les régions spectrales entre 3700 cm^{-1} et 3000 cm^{-1} (Churchman *et al.*, 1994). La bande à smectite identifiée dans cette zone, plus particulièrement à 3630 cm^{-1} est due à la vibration d'élongation des liaisons -OH (Russell et Fraser, 1971; Nguyen *et al.*, 1991; Janik et Skjemstad, 1995; Petit *et al.*, 2003; Klopprogge *et al.*, 2006). La bande proche de 1630 cm^{-1} correspond aussi aux argiles smectites (Janik *et al.*, 2009). Sur le spectre moyen des vertisols,

les bandes à smectite se trouvent à 3650 cm^{-1} et 1648 cm^{-1} . Sur PC4, le pic à 1618 cm^{-1} contribue fortement à la discrimination des vertisols.

La PC5 (figure 3-7) qui explique les 3% des informations discriminent une partie des luvisols et des calcaric regosols. Les kaolinites à 3700 cm^{-1} et 3650 cm^{-1} sont présents à la fois dans le spectre moyen et dans le loading et ceci à la même fréquence. Autre pic à kaolinite également à 1045 cm^{-1} sur le spectre et à 1020 cm^{-1} sur PC5 qui est le résultat de la vibration de réseau des liaisons Al-O-Si (Nguyen *et al.*, 1991).

Les 3 bandes à 2988 cm^{-1} , 2927 cm^{-1} et 2864 cm^{-1} sont des bandes à calcite qui contribuent à la présence des calcaric regosols sur la PC5 (figure 3-7). La sixième composante principale contribue seulement à l'explication des 2% des informations. Il est à noter sur la déconvolution du loading PC6 la présence des bandes à gibbsites : 3530 cm^{-1} , 3455 cm^{-1} , 3383 cm^{-1} . Ainsi, la PC6 discrimine donc les ferralsols dans son axe positif.

3.4 CORRELATION ENTRE LES METHODES K-MEANS ET PLS-DA

L'idée principale de l'étude des corrélations consiste à identifier la similitude entre les spectres moyens issus des 2 méthodes de classification.

Tableau 3-5: Coefficient de détermination R^2 entre les spectres moyens des résultants du K-means clustering et de la PLS-DA

| | Cluster 1 | Cluster 2 | Cluster 3 | Cluster 4 | Cluster 5 | Cluster 6 | Cluster 7 | Cluster 8 |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Cambisols-Nitisols | 0,95 | 0,96 | 0,98 | 0,85 | 0,98 | 0,73 | 0,99 | 0,93 |
| Ferralsols | 0,96 | 0,95 | 0,99 | 0,81 | 0,95 | 0,72 | 0,96 | 0,97 |
| Arenosols | 0,74 | 0,9 | 0,76 | 0,99 | 0,74 | 0,72 | 0,86 | 0,73 |
| Luvisols | 0,93 | 0,98 | 0,92 | 0,93 | 0,89 | 0,92 | 0,93 | 0,89 |
| Calcaric Regosols | 0,75 | 0,78 | 0,77 | 0,75 | 0,75 | 0,99 | 0,78 | 0,75 |
| Vertisols | 0,99 | 0,87 | 0,95 | 0,7 | 0,92 | 0,64 | 0,9 | 0,94 |

Le tableau 3-5 montre les coefficients de détermination des tests deux à deux de chaque spectre moyen. Sur les régions spectrales dédiées à la gibbsite et à la kaolinite entre 4000 cm^{-1} et 3000 cm^{-1} , les clusters 3 et 8 se démarquent des autres par la présence des pics à gibbsite (voir figure 3-2). Ces clusters présentent beaucoup de similitude avec le spectre moyen des ferralsols avec des R^2 respectivement égaux à 0,99 et 0,97. Le test de corrélation entre cluster 6 et le calcaric regosols ont donné une R^2 de 0,99. Le cluster 6 est surtout caractérisé par les bandes à calcites entre 3000 cm^{-1} et 1700 cm^{-1} . Il va être comparé avec le spectre des calcaric regosols. Les clusters 2 et 4 se différencient des autres par des faibles absorbances pour les pics de kaolinite entre 3700 cm^{-1} et 3500 cm^{-1} . Ces deux clusters représentent également des pics de quartz très

important entre 2000 cm^{-1} et 1700 cm^{-1} . Ils sont très proches des spectres moyens des luvisols ($R^2 = 0,98$) et des arenosols ($R^2 = 0,99$). Les vertisols sont facilement identifiables par les deux pics de smectite aux environs de 3620 cm^{-1} et de 1630 cm^{-1} . Ces pics sont présents sur le cluster 1 ($R^2 = 0,99$). Les clusters 5 et 7 se ressemblent beaucoup par l'absence des pics à gibbsite et de ceux liés à la présence importante de quartz. Qualitativement, ils pourront être assimilés à des spectres des cambisols-nitisols ($R^2 = 0,98$ et $R^2 = 0,99$).

4- CONCLUSION

Les spectres MIR constituent un outil à la disposition pour identifier et classifier les grands groupes de sol de Madagascar. Avec l'utilisation de la méthode k-means clustering qui est une méthode de classification non supervisée, les clusters obtenus correspondent parfaitement aux spectres moyens des différents groupes de sol étudiés. Les fortes corrélations entre les deux spectres prouvent que les résultats du K-means sont très pertinents. Ainsi, cette méthode arrive très bien à regrouper les différents groupes de sol. Pourtant, elle demeure très simple et plus rapide pour une étude sommaire des données spectrales dans les moyens infrarouges. La PLS-DA qui est une méthode de classification supervisée arrive à classifier les 87% des échantillons en validation. Les spectres moyens issus de cette classification supervisée ont montré que les résultats sont beaucoup plus précis. La comparaison de ces spectres avec les clusters du K-means clustering ont montré que malgré la forte corrélation entre les deux, les spectres moyens de la PLS-DA décrivent mieux chaque type de sol sur certaines régions spectrales. Les résultats de l'ACP ont montré également que chaque type de sols a été discriminé avec la méthode PLS-DA. Le pourcentage des ferralsols et des cambisols-nitisols bien classés sont les plus élevés avec cette méthode. Ces résultats restent intéressants étant donné que presque la moitié des sols malgaches sont occupés par ces trois types de sol. Ainsi, ces deux méthodes de classification à partir des spectres MIR constituent un outil d'aide à la décision pour l'étude d'un nombre très élevé d'échantillons en vue d'une mise en valeur éventuelle de ces groupes de sol.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aubert, G. and Bourgeat, F., 1972. Les sols ferrallitiques à Madagascar. *Revue de Géographie de Madagascar*, 20: 1-23.
- Balan, E., Lazzeri, M., Morin, G. and Mauri, F., 2006. First-principles study of the OH-stretching modes of gibbsite. *American Mineralogist*, 91: 115-119.
- Bardy, M., Fritsch, E., Derenne, S., Allard, T., do Nascimento, N.R. and Bueno, G.T., 2008. Micromorphology and spectroscopic characteristics of organic matter in waterlogged podzols of the upper Amazon basin. *Geoderma*, 145(3-4): 222-230.
- Çeşmeci, D. and Güllü, M.K., 2009. Phase-correlation-based hyperspectral image classification using multiple class representatives obtained with k-means clustering. *International Journal of Remote Sensing*, 30(14): 3827-3834.
- Churchman, G.J., Slade, P.G., Self, P.G. and Janik, L.J., 1994. Nature of Interstratified Kaolin-smectites in Some Australian Soils. *Australian Journal of Soil Research*, 32: 805-822.
- Delenne, M.F. and Pelletier, F., 1981. Carte du potentiel des unités Physiques, au 1:1 000 000. ORSTOM. Bondy, France.
- Do Nascimento, N.R., Bueno, G.T., Fritsch, E., Herbillon, A.J., Allard, T., Melfi, A.J., Astolfo, R., Boucher, H. and Li, Y., 2004. Podzolization as a deferralitization process: a study of an Acrisol-Podzol sequence derived from palaeozoic sandstones in the northern upper Amazon Basin. *European Journal of Soil Science*, 55: 523-538.
- Du, C., Linker, R. and Shaviv, A., 2008. Identification of agricultural Mediterranean soils using mid-infrared photoacoustic spectroscopy. *Geoderma*, 143(1-2): 85-90.
- Duchaufour, P., Souchier, B. and Bonneau, M., 1991. *Pédologie. Tome 2 : Constituants et propriétés du sol.* Edition Masson (Paris-FRA): 459p.
- Fritsch, E., Morin, G., Bedidi, A., Bonnin, A., Balan, E., Caquineau, S. and Calas, G., 2005. Transformation of hematite and Al-poor goethite to Al-rich goethite and associated yellowing in a ferralitic clay soil profil of the middle Amazon Basin (Manaus, Brazil). *European Journal of Soil Science*, 56: 575-588.
- Grinand, C., Rajaonarivo, A., Bernoux, M., Pajot, V., Brossard, M., Razafimbelo, T.M., Albrecht, A. and Le Martret, H., 2009. Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols*, 16(1): 23-33.
- Ip, K.H., Stuart, B.H., Ray, A.S. and Thomas, P.S., 2008. A spectroscopic investigation of the weathering of a heritage Sydney sandstone. *Spectrochimica Acta Part A*, 71: 1032-1035.

Janik, L.J., Forrester, S.T. and Rawson, A., 2009. The prediction of soil chemical and physical properties from mid-infrared spectroscopy and combined partial least-squares regression and neural networks (PLS-NN) analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 97: 179-188.

Janik, L.J., Merry, R.H. and Skjemstad, J.O., 1998. Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions? *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38: 681-696.

Janik, L.J. and Skjemstad, J.O., 1995. Characterization and Analysis of Soils Using Mid-infrared Partial Least-Squares. II.* Correlations with Some Laboratory Data. *Australian Journal of Soil Research*, 33: 637-650.

Janik, L.J., Skjemstad, J.O., Shepherd, K.D. and Spouncer, L.R., 2007. The prediction of soil carbon fractions using mid-infrared-partial least square analysis. *Australian Journal of Soil Research*, 45: 73-81.

Klopprogge, J.T., Mahmutagic, E. and Frost, R.L., 2006. Mid-infrared and infrared emission spectroscopy of Cu-exchanged montmorillonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 296: 640-646.

Linker, R., Shmulevich, I., Kenny, A. and Shaviv, A., 2005. Soil identification and chemometrics for direct determination of nitrate in soils using FTIR-ATR mid-infrared spectroscopy. *Chemosphere*, 61: 652-658.

Ludwig, B., Nitschke, R., Terhoeven-Urselmans, T., Michel, K. and Flessa, H., 2008. Use of mid-infrared spectroscopy in the diffuse-reflectance mode for the prediction of the composition of organic matter in soil and litter. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 171: 384-391.

Madari, B.E., Reeves, J.B., Machado, P.L.O.A., Guimarães, C.M., Torres, E. and McCarty, G.W., 2006. Mid- and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferralsols. *Geoderma*, 136(1-2): 245-259.

McBratney, A.B., Minasny, B. and Viscarra Rossel, R., 2006. Spectral soil analysis and inference systems: A powerful combination for solving the soil data crisis. *Geoderma*, 136(1-2): 272-278.

Michel, K., Terhoeven-Urselmans, T., Nitschke, R., Steffan, P. and Ludwig, B., 2009. Use of near- and mid-infrared spectroscopy to distinguish carbon and nitrogen originating from char and forest-floor material in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 172: 63-70.

Nguyen, T., Janik, L.J. and Raupach, M., 1991. Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform (DRIFT) Spectroscopy in Soil Studies. *Australian Journal of Soil Research*, 29: 49-67.

Petit, S., Decarreau, A. and Righi, D., 2003. Utilisation de dépôts d'argile sur lame de verre pour leur étude en spectroscopie infrarouge. *C. R. Geoscience*, 335: 735-741.

Pirie, A., Singht, B. and Islam, K., 2005. Ultraviolet, visible, near-infrared and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopic techniques to predict several soil properties. *Australian Journal of Soil Research*, 43: 713-721.

Pontes, M.J.C., Cortez, J., Galvão, R.K.H., Pasquini, C., Araújo, M.C.U., Coelho, R.M., Chiba, M.K., Ferreira de Abreu, M. and Madari, B.E., 2009. Classification of Brazilian soils by using LIBS and variable selection in the wavelet domain. *Analytica Chimica Acta* 642: 12-18.

Poulenard, J., Perrette, Y., Fanget, B., Quetin, P., Trevisan, D. and Dorioz, J.M., 2009. Infrared spectroscopy tracing of sediment sources in a small rural watershed (French Alps). *Science of The Total Environment*, 407(8): 2808-2819.

Reeves, J.B., 2009. Near- versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: Where are we and what needs to be done? *Geoderma*, doi:10.1016/j.geoderma.2009.04.005.

Riquier, J., 1966. Les sols ferrallitiques. *Cahier ORSTOM, Série Pédologique*, 4(4): 33-37.

Roederer, P., 1971. Les sols de Madagascar, ORSTOM.

Rumpel, C., Janik, L.J., Skjemstad, J.O. and Kögel-Knabner, I., 2001. Quantification of carbon derived from lignite in soils using mid-infrared spectroscopy and partial least squares. *Organic Geochemistry*, 32: 831-839.

Russell, J.D. and Fraser, A.R., 1971. I.R. spectroscopic evidence for interaction between hydronium ions and lattice OH groups in montmorillonite. *Clays and Clay Minerals*, 19: 55-59.

Segalen, P., 1994. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique: Tome I,II,III. 579.

Skjemstad, J.O. and Dalal, R.C., 1987. Spectroscopic and Chemical Differences in Organic Matter of Two Vertisols Subjected to Long Periods of Cultivation. *Australian Journal of Soil Research*, 25: 323-335.

Viscarra Rossel, R.A., Fouad, Y. and Walter, C., 2008a. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. *Biosystems Engineering*, 100(2): 149-159.

Viscarra Rossel, R.A., Jeon, Y.S., Odeh, I.O.A. and McBratney, A.B., 2008b. Using a legacy soil sample to develop a mid-IR spectral library. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46: 1-16.

Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J. and 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.

Zimmermann, M., Leifeld, J. and Fuhrer, J., 2007. Quantifying soil organic carbon fractions by infrared-spectroscopy. *Soil Biology & Biochemistry*, 39: 224-231.

**CHAPITRE IV - PREDICTION DES PROPRIETES PHYSICO-
CHIMIQUES DES DIFFERENTS GROUPEES DE SOL DE
MADAGASCAR PAR LA TECHNIQUE DE SPECTROMETRIE
MOYEN INFRAROUGE (SMIR)**

RESUME

Une grande partie des recherches sur l'application de la technique de spectrométrie moyen infrarouge en science du sol se focalise essentiellement sur la prédiction des diverses propriétés des sols. Actuellement, les travaux s'orientent progressivement vers la recherche des outils et des méthodes pouvant améliorer les résultats des prédictions. Après avoir analysé les caractéristiques des groupes de sol, l'objectif principal de cette étude est de prédire les constituants physico-chimiques des grands groupes de sol de Madagascar par le biais de leurs signatures spectrales dans le moyen infrarouge. Les échantillons utilisés ont été prélevés dans plusieurs sites à travers Madagascar, suivant les transects Nord-Sud et Est-Ouest. Les échantillons sur 0-10, 10-20, 20-30, 50-60, 80-90 cm ont été scannés dans le MIR. Pour la modélisation de certains constituants, les spectres ont subi des prétraitements : « SNV et lissage ». La régression PLS a été utilisée pour la construction des modèles de prédiction. Le coefficient de détermination R^2 , le ratio RPD et la RMSEP sont les principaux critères adoptés pour l'évaluation des résultats. Pour les constituants minéraux du sol, les meilleurs résultats ont été obtenus avec la teneur en argile ($R^2 = 0,80$ et RPD= 2,23), en sable ($R^2 = 0,80$ et RPD= 2,26), en « argile+ limon fin » ($R^2 = 0,88$ et RPD= 2,89) et en Al_{CBD} ($R^2 = 0,85$ et RPD= 2,48). Ces éléments sont directement liés à la présence des kaolinites, des gibbsites et du quartz dans le sol. Les bandes relatives à ces derniers sont très bien exprimées tant sur les spectres que sur les loadings des modèles. Avec les arenosols uniquement, nous avons trouvé une excellente prédiction pour la teneur en Al_{CBD} avec un R^2 de 0,71 et un RPD de 2,48. Le carbone organique a été bien prédit avec le SMIR : un R^2 de 0,79 et un RPD égal à 2,14 sur l'ensemble des échantillons, un $R^2 = 0,83$ et un RPD= 2,33 avec les ferralsols seuls et avec l'association entre ferralsols-nitisol-cambisols, les résultats ont montré un R^2 de 0,81 et un RPD égal à 2,23. Des bandes attribuées à des composées organiques ont été identifiées sur les loadings des modèles de C_{org} , plus particulièrement celles correspondant à des alkyles $-CH_2$ proches de 2922 cm^{-1} et 2853 cm^{-1} . Une bonne prédiction a été obtenue avec le pH_{KCl} ($R^2 = 0,76$, RPD= 2,05). Les plus mauvais résultats ont été constatés avec les bases échangeables, les RPD ont été inférieurs au seuil acceptable de 1,4. Les autres constituants ont chacun un RPD situé à l'intérieur de l'intervalle d'une prédiction acceptable ($1,4 < RPD < 2$). L'obtention de ces résultats constitue une étape importante sur la conception d'une application future de cette technique dans des projets de développement agricole et environnemental à Madagascar.

Mots clés : sol, spectrométrie moyen infrarouge, propriétés des sols, prédiction

1- INTRODUCTION

Suite à l'accroissement démographique dans le monde, une augmentation impressionnante de la pression anthropique exercée sur les ressources naturelles a été constatée ces dernières années. Ces ressources sont de plus en plus menacées et pourraient même disparaître dans divers endroits. L'écosystème contribue à l'octroi des biens être humains par le biais des services qu'il rend à la population, connus sous le nom de « services écosystémiques ». La majorité des écosystèmes naturels et écosystèmes gérés ont le sol comme centre de régulation (Barrios, 2007). Sachant que l'agriculture représente la forme la plus dominante dans l'utilisation des terres, elle a des impacts sur les services écosystémiques qui en retour affectent la productivité agricole (Dale et Polasky, 2007). L'un des principaux défis actuels est la sécurité alimentaire pour soutenir cette augmentation de la population (Droogers, 2004). Depuis quelques années, il a été constaté l'intérêt que suscite le développement des systèmes agricoles productifs ayant une efficacité élevée sur l'utilisation des ressources internes (Barrios, 2007). Un tel système sera moins coûteux car il nécessitera moins d'intrants agricoles. Parmi ces ressources internes, la ressource en sol se trouve au premier plan. Toute activité agricole devra toujours tenir compte de l'état de fertilité des sols avant toute intervention à travers les apports de fertilisants. La gestion de la fertilité permet non seulement le maintien du niveau de productivité mais également la conservation des sols. Pour pouvoir évaluer et anticiper les changements futurs au niveau du sol dus à divers facteurs (ex. changement du climat, changement d'usage...), il faut développer une base de données et une connaissance de base de l'état initial des sols exploités. L'évaluation de la fertilité consiste à mesurer la teneur des divers éléments minéraux et organiques du sol à travers des analyses physico-chimiques. Les techniques d'analyses traditionnelles en laboratoire ont leurs limites dès qu'on travaille à grande échelle. Ces analyses conventionnelles nécessitent à la fois un temps considérable, divers traitements et manipulations ainsi qu'une quantité importante de produits chimiques. Ces contraintes limitent l'évaluation de la fertilité des sols, notamment pour les pays en développement comme Madagascar. Ainsi, la recherche d'une alternative à la méthode conventionnelle s'avérait une priorité pour les scientifiques. L'utilisation de la technique de la réflectance spectroscopique diffuse constitue une alternative à ces méthodes conventionnelles d'analyse de sol (Viscarra Rossel *et al.*, 2006b). L'application de la spectrométrie infrarouge en science du sol a connu un immense essor durant ces deux dernières décennies (Pirie *et al.*, 2005; Guerrero *et al.*, 2010). La technique de la spectrométrie infrarouge affiche de nombreux avantages : il s'agit d'une technique non destructive, nettement reproductible, rapide, moins coûteuse, relativement facile à utiliser, ne demandant plus un fractionnement, nécessitant seulement une petite quantité d'échantillons et un minimum de travail de préparation (Pirie *et al.*, 2005; Janik *et al.*, 2007; Guerrero *et al.*, 2010). Une seule acquisition spectrale permet de réaliser une prédiction de plusieurs propriétés du sol (Minasny *et al.*, 2009). En science du sol, les régions spectrales les

plus usités sont les visibles (400 – 700 nm), le proche infrarouge (PIR) (700- 2500 nm) et le moyen infrarouge (MIR) (2500- 25000 nm). La SMIR a été utilisée pour la présente étude. Au début, SMIR a surtout été utilisé pour des analyses qualitatives des sols (Reeves III, 2010). C'était le cas par exemple pour les études de Nguyen *et al.* (1991) qui consistaient à identifier la nature des différentes bandes minérales de diverses signatures spectrales des sols et les éléments les correspondants. Plus tard, l'utilisation de la SMIR s'est focalisée essentiellement sur la prédiction des propriétés physico-chimiques des sols.

Les sols tropicaux, comme c'est le cas pour Madagascar, sont caractérisés et se différencient entre eux par leur minéralogie. A Madagascar, les ferralsols, les nitisols et les cambisols (correspondant aux sols ferrallitiques de la classification CPC) occupent près de 2/3 de la surface de l'île, notamment sur les Hautes Terres. Ce sont des sols caractérisés par une altération très poussées des minéraux primaires, une forte teneur en sesquioxydes de fer et d'aluminium, des argiles dominées par les kaolinites et une faible capacité d'échange cationique (Bourgeat et Aubert, 1972). En quittant les Hautes Terres, ce sont les arenosols et les luvisols (sols ferrugineux tropicaux et sols fersiallitiques) qui prédominent. Les conditions de la pédogenèse favorisent la séparation des sesquioxydes des argiles et leur migration (Segalen, 1994). Ces deux types de sols sont surtout connus par leur texture sableuse.

Dans la littérature, plusieurs études sur la prédiction des propriétés des sols avec la SMIR ont été réalisées sur des sols tropicaux : prédiction de plusieurs constituants des sols de l'Australie par divers auteurs (ex. Janik et Skjemstad, 1995; Viscarra Rossel *et al.*, 2006b; Viscarra Rossel *et al.*, 2008b; Janik *et al.*, 2009; Minasny *et al.*, 2009), prédiction du carbone organique et de l'azote sur les sols tropicaux de Brésil par Madari *et al.* (2006), prédiction de diverses propriétés des sols de Zimbabwe par Combo *et al.* (2010)... Ces études ont montré la capacité de la SMIR à prédire les propriétés des sols tropicaux (carbone organique, texture, pH...).

Les objectifs de ce travail sont de : (i) analyser et interpréter les propriétés physico-chimiques des différents groupes de sol identifiés, (ii) modéliser les données spectrales MIR afin de prédire les propriétés des sols.

2- MATERIELS ET METHODES

2.1 ZONE D'ETUDE ET PRINCIPAUX GROUPES DE SOL

Les échantillons de sol utilisés ont été prélevés sur 119 sites répartis dans divers endroits de Madagascar. Dans un objectif de couvrir à la fois les différentes gammes de climat et les principaux groupes de sol, les sites de prélèvements ont été fixés suivant le transect Est-Ouest et Nord-Sud de l'île. La distance entre deux points de prélèvement est de 20 km. Les sols prélevés étaient ceux qui occupaient les zones de *tanety*. Selon la classification FAO des sols, 7 groupes de

sol ont été identifiées : les ferralsols et les cambisols qui dominent les Hautes Terres et la partie orientale, les nitisols sur les versants occidentaux, les arenosols et les luvisols en quittant les Hautes Terres centrales et en s'approchant les côtes Ouest, les calcaric regosols dans la partie Ouest et Sud (Majunga et Tuléar), et enfin les vertisols dans quelques sites sur la partie Nord de l'île.

2.2 DESCRIPTION DES PROFILS PEDOLOGIQUES

Pour chaque site de prélèvement, des descriptions des profils pédologiques ont été réalisées de manière systématique. Les descriptions ont été effectuées sur 1m de profondeur par le biais d'un carottier.

2.3 ECHANTILLONNAGE ET PREPARATION DES ECHANTILLONS

Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'un carottier sur 4 répétitions par site. Les répétitions ont été réalisées sur les extrémités d'un carré de 100 m², situé sur un endroit représentatif du paysage local. Pour chaque profil, 5 profondeurs faisaient l'objet d'un échantillonnage : 0-10, 10-20, 20-30, 50-60, 80-90 cm. Des échantillons composites des répétitions ont été préparés pour chaque profondeur prélevée. Pour la présente étude, les échantillons composites utilisés pour certaines analyses sont limités seulement à ceux issus des horizons 0-10, 10-20 et 20-30 cm. Les échantillons ont été séchés à l'air libre durant quelques jours. Ensuite, ils ont été broyés et tamisés à 2 mm puis à 0,2 mm. Une partie de ceux broyés à 0,2 mm a été utilisée pour les analyses spectrales dans le moyen infrarouge.

2.4 ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES EN LABORATOIRE

Pour pouvoir construire des modèles par constituants du sol, des analyses conventionnelles en laboratoire sont nécessaires. Ces analyses se portent sur une partie des échantillons que l'on divisera plus tard en lot de calibration et de validation. Les échantillons non analysés serviront de lot de prédiction.

2.4.1 Texture

L'analyse granulométrique a été réalisée sur des échantillons composites sur 20-30 cm, suivant la méthode de « sédimentation et décantation successive ». Un traitement à froid et à chaud par de l'eau oxygénée a été adopté pour la destruction de la matière organique. Après tamisage, 5 fractions différentes ont été obtenues : argile (0-2 µm), limon fin (2-20 µm), limon grossier (20-50 µm), sable fin (50-200 µm) et sable grossier (200-2000 µm).

2.4.2 Carbone organique

Les échantillons utilisés sont ceux issus des couches 0-10, 10-20 et 20-30 cm de profondeur. Le carbone organique (C_{org}) a été analysé avec la méthode de Walkley et Black (1934). Cette méthode repose sur le principe selon lequel le bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) oxyde le C contenu dans le sol. La réaction se traduit par un virage de couleur permettant le calcul de la quantité de C_{org} présent dans le sol.

2.4.3 pH eau et pH KCl

Les pH eau et pH KCl du sol ont été mesurés sur un mélange d'échantillon de sol et d'une solution (eau distillée) selon le rapport 1/2,5. La mesure du pH a été réalisée sur les 5 profondeurs des échantillons composites.

2.4.4 Extraction des formes du fer et de l'aluminium

Les différentes formes du fer ont été extraites à l'aide de réactifs sélectifs :

- Les formes cristallisées et amorphes avec le citrate-bicarbonate-dithionite (CBD) ou encore réactif de Mehra et Jackson.
- Les formes amorphes et microcristallines avec de l'oxalate d'ammonium.

Ces analyses ont été réalisées sur des échantillons de 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm de profondeur.

2.4.5 Humidité relative

Durant les prélèvements sur le terrain, un échantillon de sol a été préparé pour la mesure de l'humidité relative. Ces échantillons ont été étuvés à 105°C pendant 48 heures.

2.4.6 Densité apparente

La densité apparente a été mesurée sur le terrain. Sur des sols non perturbés, des prélèvements ont été effectués avec le carottier faisant un volume de 500 cm³ sur 10 cm de profondeur.

2.4.7 Bases échangeables

Les bases échangeables (Ca, Na, K, Mg) ont été analysées avec la méthode d'extraction au cobaltihexamine.

2.5 ANALYSES SPECTRALES

Une partie des échantillons broyés à 0,2 mm a été utilisée pour les analyses spectrales. Ces échantillons ont été scannés dans le moyen infrarouge (MIR), couvrant la région spectrale entre

400 cm^{-1} et 4000 cm^{-1} . Les analyses ont été réalisées avec un spectromètre à Transformée de Fourier Nicolet 6700 FT-IR (Janik et Skjemstad, 1995; Janik *et al.*, 2007).

2.6 PRETRAITEMENT DES DONNEES

Les prétraitements des données spectrales choisis sont spécifiques à chaque élément à prédire. Dans certains cas, des modèles plus pertinents ont été obtenus avec des spectres bruts non traités. D'une manière générale, les prétraitements utilisés consistaient à lisser les spectres avec la méthode de soustraction des moyennes (moving average) et le SNV (standard normal variate) qui corrige les spectres en enlevant la moyenne et en divisant par l'écart type du même spectre.

Pour la teneur en C_{org} , une transformation en logarithme décimale (logC) a été réalisée afin d'éviter le problème lié à la non normalité de la distribution, qui est due probablement au mode d'échantillonnage lors des analyses.

2.7 MODELISATION PAR DES ANALYSES STATISTIQUES

2.7.1 Sélection des lots de calibration et de validation

Pour chaque propriété du sol à prédire, les échantillons analysés en laboratoire ont été divisés aléatoirement en deux lots : lot de calibration qui représente les 75% de l'effectif total et le lot de validation pour les 25% restant.

2.7.2 Régression PLS

La régression linéaire du moindre carré partiel ou PLSR peut être utilisée pour modéliser les relations entre les intensités infrarouges caractéristiques des constituants du sol et les propriétés du sol (Janik *et al.*, 2009). Elle est facile à interpréter et l'algorithme de calcul est beaucoup plus rapide (Stenberg *et al.*, 2010). Dans la présente recherche, nous avons utilisé la PLSR pour la modélisation de tous les constituants du sol étudiés. La modélisation et la validation ont été réalisées avec le logiciel The Unscrambler (CAMO Software SA, 1986-2007).

2.7.3 Critères d'évaluation de la qualité de la prédiction

Des critères sont nécessaires pour évaluer la robustesse des modèles et la pertinence des résultats de prédiction. Les paramètres statistiques les plus adoptés en spectrométrie sont les suivants :

- Le coefficient de détermination R^2 est le plus usité : il représente la proportion de variation représentée par le modèle.

- La racine des erreurs quadratiques moyennes (Root Mean Squared Error) en calibration (RMSEC), en cross validation (RMSECV) et en prédiction (RMSEP). En général, on sélectionne les modèles ayant des valeurs de RMSE les plus faibles.
- Le RPD est le rapport entre l'écart-type (s.d.) de la valeur mesurée de la propriété du sol dans le lot de calibration ou de validation ou encore de prédiction à la SEC ou SECV ou SEP (Standard Error). D'après Chang *et al.* (2001), un RPD supérieur à 2 peut être considéré comme « excellent », un RPD entre 1,4 et 2 est classé comme « acceptable » et un RPD inférieur à 1,4 qualifie une mauvaise prédiction et nécessite encore des améliorations.

3- RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 CARACTERISATION DES SOLS

La caractérisation a été divisée en deux étapes: les descriptions morphologiques des profils par site d'étude et les analyses physico-chimiques des échantillons de sols prélevés.

3.1.1 Caractéristiques morphologiques des profils pédologiques

Etant donné que le nombre de site faisant l'objet des descriptions s'élève à 119, nous essayerons de présenter uniquement ici des profils types pour chacun des 5 groupes de sol : ferralsols, cambisols, nitisols, luvisols et arenosols. Les profils pédologiques choisis sont considérés comme les plus représentatifs des groupes de sol étudiés.

D'après le tableau 4-1, chaque groupe de sol est caractérisé par la présence des horizons A et B. L'horizon A, riche en matière organique est situé entre 0 et 15 cm sauf pour les arenosols avec 30 cm d'épaisseur. L'horizon minéral B se subdivise encore en B1 et B2 (éventuellement en B3). Les ferralsols et les cambisols affichent des couleurs à base du « brun » (brun jaunâtre, brun foncé...). La couleur rouge apparaît sur les horizons des nitisols, luvisols et arenosols. Les vertisols présente des couleurs sombres (gris) tandis que les calcaric regosols ont une couleur blanche. Les ferralsols se différencient essentiellement des autres par leur texture argileuse pour tous les horizons, avec une structure grumeleuse en surface et massive en profondeur. Il est important également de noter la présence d'une différenciation texturale pour les luvisols : la texture est devenue sablo-argileuse vers 60 cm de profondeur. Les arenosols ont des textures sableuses sur tout le profil. A l'exception des arenosols qui présentent des structures particulières, les restent ont des structures massives, quelques fois très friables. Les porosités sont élevées pour les sols ayant une teneur importante en sable en l'occurrence des luvisols et des arenosols. Les vertisols sont caractérisés par l'existence des fentes des retraits en période sèche. Les calcaric regosols présentent une teneur très importante en calcaire actif, qui réagit avec de l'acide chloridrique.

Tableau 4-1: Descriptions des profils types (+++ : très abondant, ++ : abondant, + : faible)

| Groupes | Horizon | Profondeur (cm) | Couleur | Texture | Structure | Racines | Porosité | Particularités |
|-------------------------|---------|-----------------|---|------------------------|--------------------------------------|---------|----------|--|
| FERRALSOLS | A | 0 à 15 | 10YR 5-6 (brun jaunâtre) | Argileuse | Grumeleuse | +++ | +++ | Transition nette avec B1 Très peu d'éléments grossiers |
| | B1 | 15 à 55 | 7,5YR 5-8 (brun foncé) | Argileuse | Massive | ++ | ++ | Transition peu nette avec B2 Très peu d'éléments grossiers |
| | B2 | 55 à 100 | 7,5YR 5-8 (brun foncé) | Argileuse | Massive | ++ | + | |
| CAMBISOLS | A | 0 à 15 | 10YR 5-4 (brun jaunâtre) | Argilo-sableuse | Massive | ++ | ++ | Transition graduelle avec B1 Eléments grossiers nombreux |
| | B1 | 15 à 40 | 10YR 5-4 (brun jaunâtre) | Argilo-sableuse | Massive à débit polyédrique, friable | + | ++ | Transition graduelle avec B2 Eléments grossiers nombreux |
| | B2 | 40 à 90 | 10YR 6-8 (jaune brun) | Argilo-sableuse | Massive à débit polyédrique, friable | - | + | Transition graduelle avec B3 Eléments grossiers nombreux |
| | B3 | 90 à 100 | 10YR 6-8 (jaune brun) | Argilo-sableuse | Massive | - | + | |
| NITISOLS | A | 0 à 10 | 7,5 YR 5-6 (brun rouge) | Limono-argilo-sableuse | Massive et friable | ++ | +++ | Transition peu nette avec B1 |
| | B1 | 10 à 50 | 2,5YR 3-6 (rouge foncé) | Limono-argilo-sableuse | Massive et friable | + | ++ | Transition nette avec B2 |
| | B2 | 50 à 100 | 2,5YR 3-6 rouge foncé) | Limono-argilo-sableuse | Massive à débit subanguleuse | - | ++ | |
| LUVISOLS | A | 0 à 10 | 10YR 5-6 (brun jaunâtre) | Argilo-sableuse | Massive | +++ | +++ | Transition distincte avec B1 |
| | B1 | 10 à 60 | 5YR 5-8 (rouge jaunâtre) | Argilo-sableuse | Massive, friable | ++ | +++ | Transition distincte avec B2 |
| | B2 | 60 à 100 | 10YR 5-8 (brun jaunâtre) | Sablo-argileuse | Particulaire | - | +++ | Présence d'une panaché de couleur très diffuse dans la matrice |
| ARENOSOLS | A | 0 à 30 | 10YR 5-1 (gris) | Sableuse | Particulaire | ++ | +++ | Transition graduelle avec B Eléments grossiers nombreux |
| | B | 30 à 100 | 2,5Y 6-4 (brun clair jaunâtre) | Sableuse | Particulaire | - | +++ | Eléments grossiers nombreux |
| VERTISOLS | B1 | 0 à 50 | 10YR 5-2 (brun grisâtre) | Argileuse | Polyédrique à face oblique, anguleux | ++ | +++ | Transition graduelle avec B2 |
| | B2 | 50 à 80 | 10YR 5-2 (brun grisâtre) (jaune brunâtre) | Argileuse | Polyédrique à face oblique, anguleux | + | ++ | |
| | B3 | 80 à 100 | 10YR 5-2 (brun grisâtre) | Argileuse | Massive | - | + | |
| CALCARIC REGOSOL | A | 0 à 10 | 2,5Y 7-2 (gris clair) | Argileuse | Particulaire | ++ | +++ | Effervescence avec de l'HCl |
| | BC | 10 à 60 | 2,5Y 8-4 | Argileuse | Particulaire | - | +++ | Quelques traces d'oxydation |
| | C | 60 à 100 | 2,5Y 8-4 | - | - | - | - | Roche en voie d'altération |

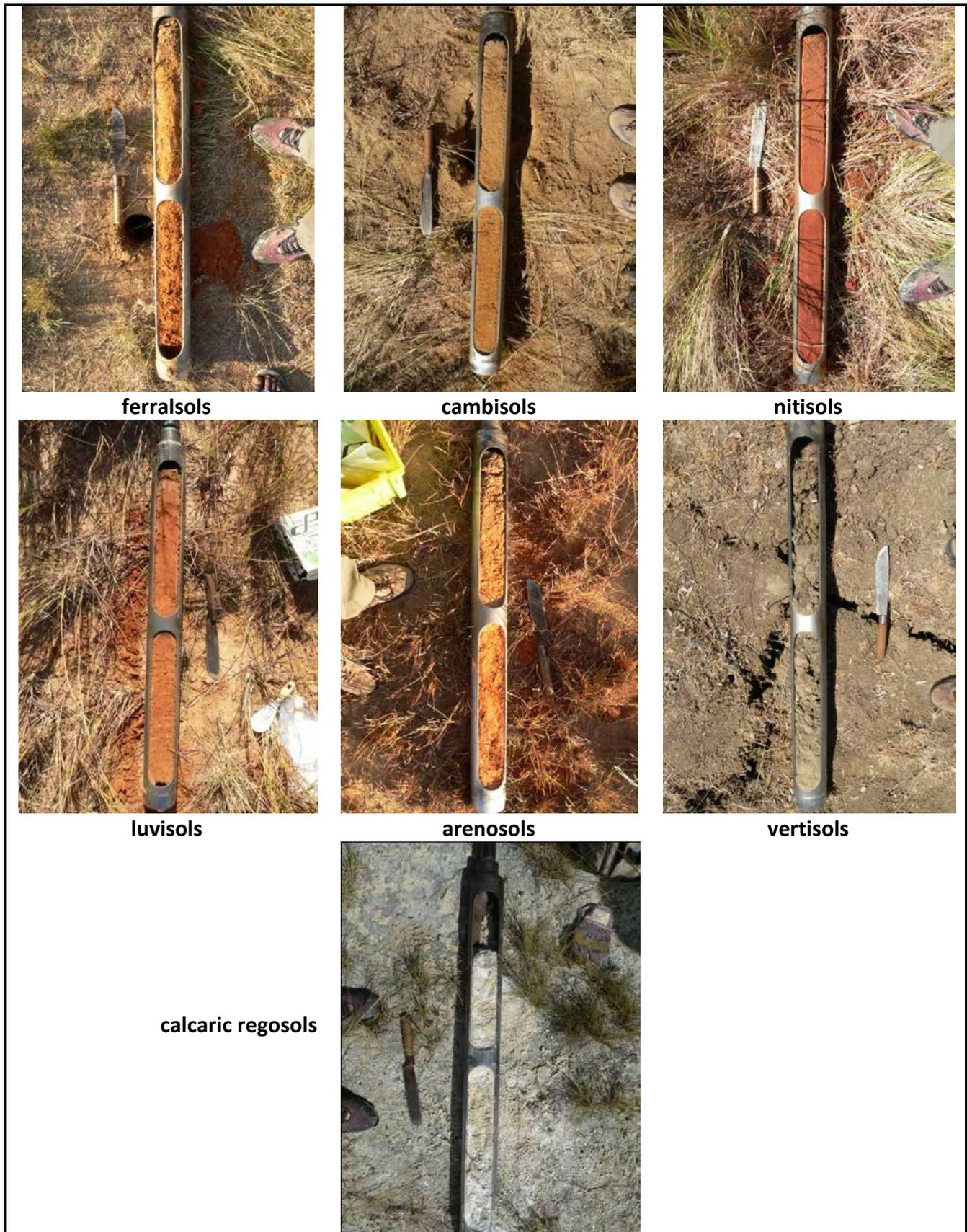


Photo 4-1: Prélèvement au carottier sur 1m de profondeur

3.1.2 Propriétés physico-chimiques des groupes de sol

Les résultats des analyses granulométriques ont confirmé ceux obtenus lors des travaux de terrain. Les vertisols, les ferralsols, les cambisols et les nitisols ont la teneur les plus élevées en argile (figure 4-1). La médiane est de 47,4% pour les vertisols. Les moyennes et les médianes sont très proches pour les 3 autres groupes de sol. La majorité des échantillons ont respectivement une teneur en argile proche de 38 % pour les ferralsols, 34 % pour les cambisols et 35 % pour les nitisols. Ces médianes se situent aux alentours de 18% pour les luvisols et 10% pour les arenosols. Ces deux groupes de sol représentent une faible variation de cette teneur en argile par rapport aux autres. Pour la teneur en sable, la médiane des arenosols se situe à 85% et à 70% pour les luvisols. Les moyennes et les médianes varient entre 10% et 20% pour la teneur en limon pour chaque groupe de sol.

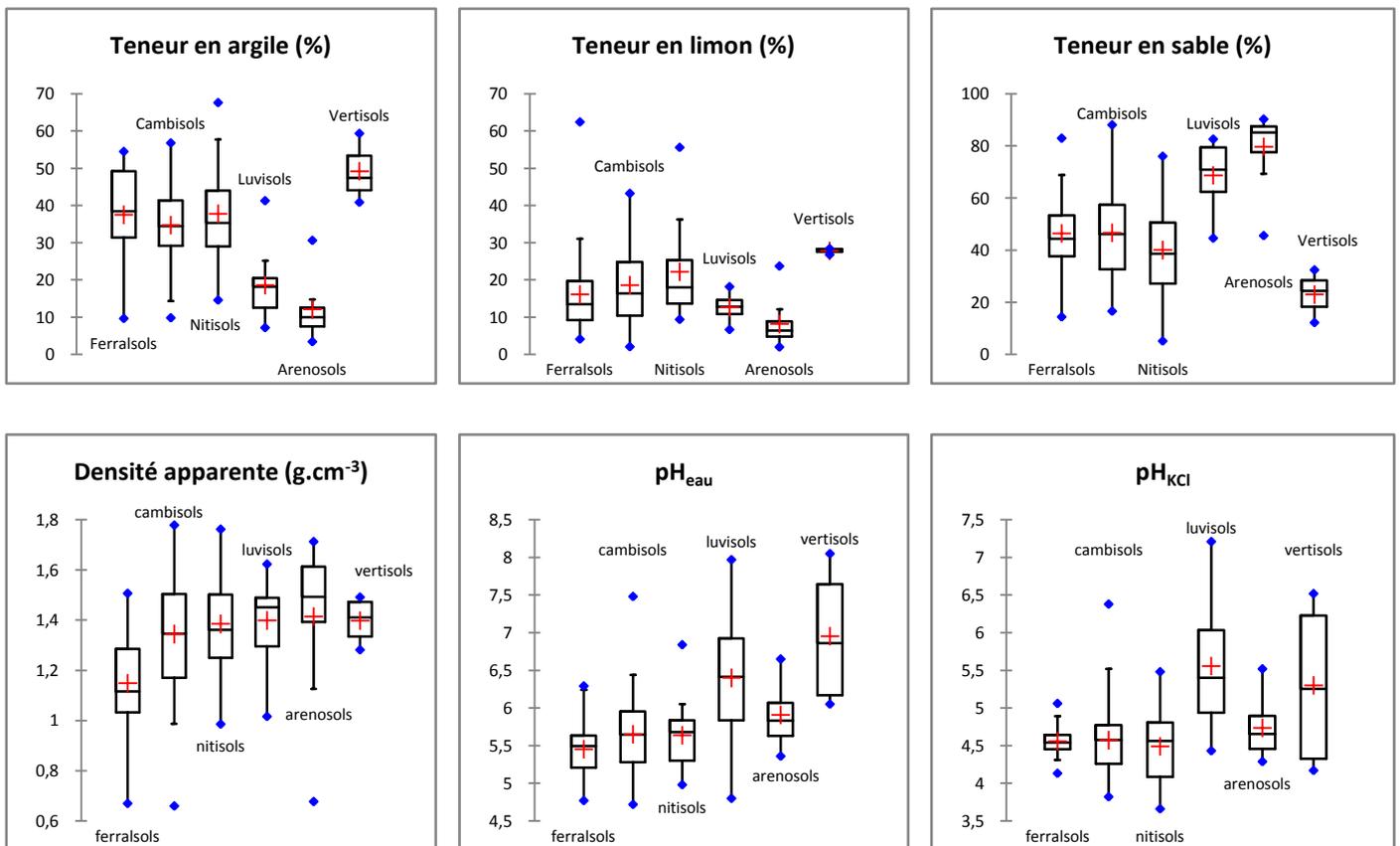


Figure 4-1: Variation de la densité apparente, des pH_{eau} et pH_{KCl}, de la teneur en argile, en limon et en sable sur 0-10 cm

Excepté les vertisols qui présentent un pH_{eau} proche de 7, les sols à texture argileuse affichent les pH_{eau} les plus acides. Un grand nombre d'échantillon de ferralsols, cambisols et nitisols ont un pH_{eau} entre 5,4 et 5,7. Des valeurs atypiques ont été identifiées avec les cambisols, montrant un pH_{eau} à 7,5. Le minimum se situe à 4,7 pour ces 3 groupes de sol. Les vertisols et les luvisols sont

moins acides que les autres. La médiane se trouve à 6,4 pour les luvisols mais celle-ci est amplement influencée par la présence d'une grande variation entre les valeurs minimales et maximales enregistrées. Pour le pH_{KCl} , les ferralsols, les cambisols, les nitisols et les arenosols ont une médiane de 4,5 à 4,6. Seule la majorité des luvisols et des vertisols ont un pH_{KCl} supérieure à 5. Similaire au pH_{eau} , les luvisols présentent une grande variation entre les minima et les maxima. La densité apparente est une fonction exponentielle de la teneur en argile kaolinitique. En effet, les ferralsols ont la valeur la plus faible avec 1,12 pour la médiane et 1,15 pour la moyenne. Des valeurs atypiques qui correspondent à des minima ont été obtenues pour le cas des cambisols et des nitisols. Les arenosols présentent les valeurs de densité apparente les plus élevées : 1,41 pour la moyenne et 1,49 pour la médiane.

Les graphes sur la figure 4-1 montrent pour une grande partie des propriétés des sols, l'existence d'une meilleure distribution par rapport au premier et au troisième quartile.

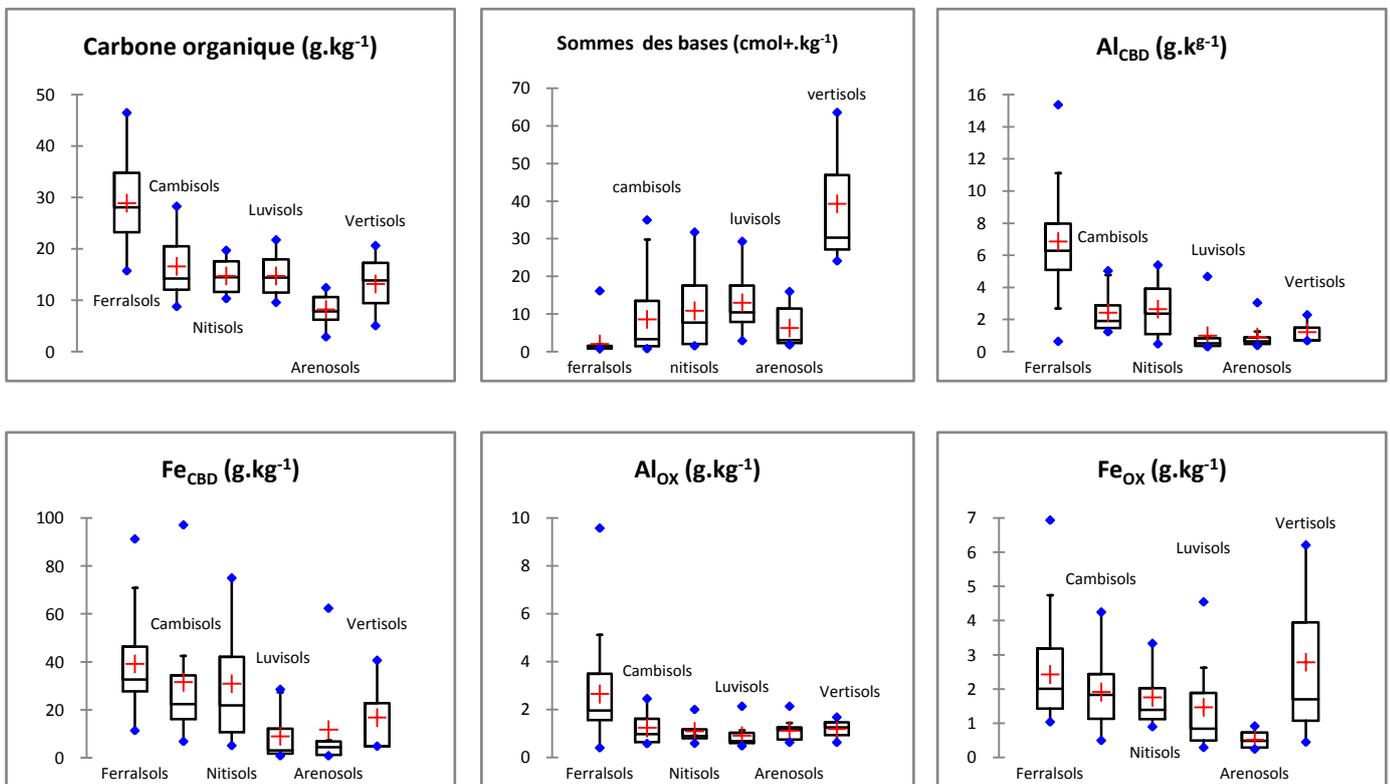


Figure 4-2: Variation des différents constituants chimiques des sols sur 0-10 cm

A l'exception des cambisols, les moyennes et les médianes de la teneur en C_{org} sont très proches pour tous les groupes de sol. De plus, les échantillons sont bien distribués par rapport au premier et au troisième quartile. Les ferralsols ont les teneurs les plus élevées avec une médiane de 28 g.kg^{-1} de C_{org} . Les cambisols, les nitisols, les luvisols et les vertisols ont une teneur moyenne aux environs de 14 g.kg^{-1} . Les arenosols ont la valeur la plus faible, une médiane de

7,8g.kg⁻¹. Contrairement au carbone, la somme des bases échangeables la plus faible a été obtenue avec les ferralsols (moyenne= 2,05 cmol+.kg⁻¹, médiane= 1,04 cmol+.kg⁻¹). Les vertisols présentent une somme de base la plus élevée avec une médiane de 30,3 cmol+.kg⁻¹ et une moyenne de 39,32 cmol+.kg⁻¹. Ensuite, les nitisols (moyenne= 10,86 cmol+.kg⁻¹, médiane= 7,74 cmol+.kg⁻¹) et les luvisols (moyenne= 13,01 cmol+.kg⁻¹, médiane= 10,47 cmol+.kg⁻¹) se trouvent en seconde position. Les valeurs maximales atypiques ont été constatées sur les 4 premiers groupes de sol. Les ferralsols affichent également les valeurs les plus élevées à la fois pour l'Al_{CBD} (moyenne = 6,87 g.kg⁻¹, médiane = 6,28 g.kg⁻¹) et le Fe_{CBD} (moyenne = 39,23 g.kg⁻¹, médiane = 32,68 g.kg⁻¹). Les luvisols et les arenosols ont des teneurs très faibles en Al_{CBD}. Les médianes et les moyennes sont inférieures à 1 g.kg⁻¹ pour ces deux groupes de sol. Cette situation a été également constatée pour le Fe_{CBD} : seulement 3,16 g.kg⁻¹ pour les luvisols et 4,4 g.kg⁻¹ pour les arenosols (médiane). Les échantillons ne sont pas toujours bien distribués pour ces 2 constituants du sol.

Pour le cas de l'Al_{OX}, excepté les ferralsols, une faible teneur et une faible variation des teneurs enregistrées a été obtenue pour les autres groupes de sol. Les médianes restent inférieures à 1 g.kg⁻¹ pour les cambisols, les nitisols et les luvisols. Elles sont de l'ordre de 1,96 g.kg⁻¹ pour les ferralsols et 1,14 g.kg⁻¹ pour les arenosols. La teneur la plus élevée pour le Fe_{OX} a été obtenue avec les ferralsols (moyenne = 2,42 g.kg⁻¹, médiane= 2,01 g.kg⁻¹). Les arenosols ont la teneur la plus faible (moyenne= 0,52 g.kg⁻¹, médiane= 0,49 g.kg⁻¹). Les ferralsols et les luvisols présentent des valeurs atypiques et les échantillons sont bien distribués par rapport au premier et au troisième quartile sauf pour les nitisols et les luvisols.

Les ferralsols et les cambisols se développent souvent sur des roches quartzieuses acides (comme les granites, les schistes quartzueux...) (Dabin, 1985), d'où leurs pH très acides. Les teneurs en Al, en Fer et en Si extractibles à l'oxalate d'ammonium sont très faibles pour ces 2 groupes de sol (FAO, 2006). Géographiquement, ils évoluent sur les Hautes Terres sous un climat humide. La production de biomasse, la première source en matière organique du sol, y est importante par rapport à d'autres zones climatiques. La teneur élevée en C_{org} des ferralsols est liée à leur texture. D'après Feller *et al.* (1991), il y a une corrélation positive entre stock de carbone organique et la teneur en argile et limon fin du sol. C'est ce qui explique par conséquent la faible teneur en C_{org} des arenosols. Ces derniers ont plus de 70% de sable. Les argiles des ferralsols et des cambisols sont constituées en grande partie par des kaolinites, expliquant ainsi les faibles sommes des bases échangeables pour ces 2 groupes de sol. Par contre, les argiles des vertisols sont formées par des smectites (argile 2 /1). Ces types d'argile ont une capacité d'échange cationique élevée d'où une somme des bases très importantes pour les vertisols.

Les nitisols se trouvent sur le versant occidental de Madagascar. Ils constituent une transition entre les ferralsols-cambisols (domaine des sols ferrallitiques) et les luvisols-arenosols (domaine

des sols ferrugineux). Ils ont plus de 30% d'argile et ont une valeur et un chroma faible, souvent proche de 2,5YR (FAO, 2006). Ces données correspondent parfaitement à nos résultats sur le tableau 4-1 et sur la figure 4-2.

Les arenosols et les luvisols évoluent sur des roches basiques (comme les basaltes, les gabbros...) (Dabin, 1984-1985) et sur des roches sédimentaires. Ce sont des sols à texture argilo-sableuse à sableuse. Les argiles des luvisols sont constitués à la fois par des argiles 1/1 et 2/1, d'où une somme des bases assez élevée pour ce groupe de sol.

3.2 PREDICTIONS DES PROPRIETES DES SOLS

3.2.1 Statistiques descriptives des propriétés des sols analysées

Le tableau ci-dessous montre les résultats des analyses effectuées en laboratoire sur une partie des échantillons prélevés. Rappelons que les analyses granulométriques ont été réalisées sur des échantillons de 20-30 cm de profondeur, le C_{org} et les formes du fer et de l'aluminium sur 0-10, 10-20, 20-30 cm et la mesure de la densité apparente, le pH_{eau} et le pH_{KCl} ainsi que l'humidité relative sur les 5 profondeurs de prélèvement.

Tableau 4-2 : Statistique sur les résultats des analyses physico-chimiques en laboratoire

| Propriétés des sols | Unités | n | Moyenne | Médiane | Min | Max | Ecart-type |
|---------------------|-----------------|-----|---------|---------|-------|-------|------------|
| pH_{eau} | | 659 | 5,95 | 5,75 | 4,43 | 8,7 | 0,85 |
| pH_{KCl} | | 659 | 4,88 | 4,73 | 3,61 | 7,6 | 0,76 |
| Argile + limon fin | $g.100g^{-1}$ | 107 | 45,26 | 48,86 | 8,24 | 81,65 | 18,81 |
| Argile | $g.100g^{-1}$ | 106 | 32,89 | 32,87 | 3,39 | 57,74 | 14,06 |
| Limon | $g.100g^{-1}$ | 117 | 17,39 | 14,57 | 1,94 | 76,02 | 11,14 |
| Sable | $g.100g^{-1}$ | 110 | 50,53 | 47,46 | 14,42 | 88,16 | 19,06 |
| C_{org} | $g.kg^{-1}$ | 244 | 12,46 | 10,09 | 0,85 | 46,46 | 8,98 |
| Humidité | % | 589 | 13,39 | 12,62 | 0,19 | 51,16 | 8,06 |
| Densité apparente | $g.cm^{-1}$ | 590 | 1,41 | 1,45 | 0,66 | 2,05 | 0,22 |
| Al_{OX} | $g.kg^{-1}$ | 231 | 1,49 | 1,28 | 0,06 | 5,12 | 0,88 |
| Fe_{OX} | $g.kg^{-1}$ | 232 | 1,54 | 1,75 | 0,03 | 7,9 | 1,32 |
| Al_{CBD} | $g.kg^{-1}$ | 244 | 3,59 | 2,4 | 2,03 | 21,55 | 3,6 |
| Fe_{CBD} | $g.kg^{-1}$ | 222 | 24,18 | 20,35 | 0,04 | 77,65 | 19,36 |
| K | $cmol+.kg^{-1}$ | 118 | 1,11 | 0,38 | 0,07 | 11,72 | 2,02 |
| Na | $cmol+.kg^{-1}$ | 118 | 0,42 | 0,28 | 0,03 | 3,15 | 0,5 |
| Ca | $cmol+.kg^{-1}$ | 118 | 0,66 | 0,36 | 0,06 | 6,52 | 1,1 |
| Mn | $cmol+.kg^{-1}$ | 118 | 6,75 | 0,82 | 0,02 | 54,45 | 9,9 |

Ces échantillons correspondent aux 5 groupes de sol : ferralsols, cambisols, nitisols, luvisols et arenosols. L'effectif total par propriété de sol à prédire a été divisé systématiquement en lot de calibration (75%) et en lot de validation (25%).

3.2.2 Propriétés des spectres moyens par groupes de sol

En complémentarité aux résultats des analyses physico-chimiques des sols, les analyses qualitatives des signatures spectrales permettent également d'identifier certains constituants organiques et minéraux du sol.

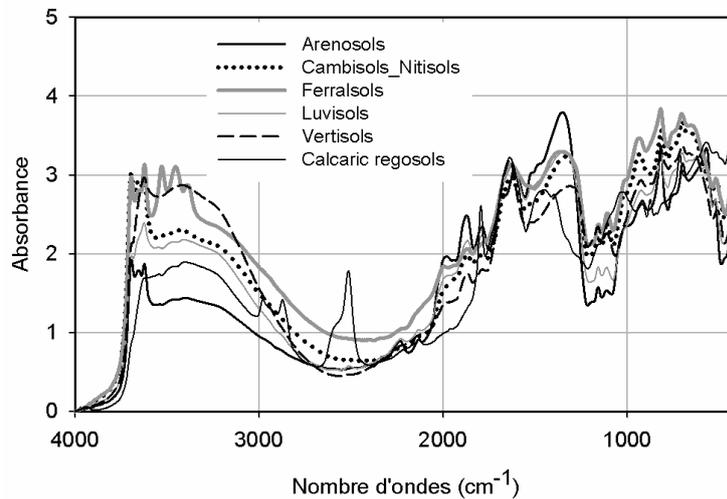


Figure 4-3 : Spectres moyens des groupes de sols étudiés

Qualitativement, les spectres moyens montrent que les trois groupes de sol à texture argileuse (ferralsols, cambisols, nitisols) ont une absorbance beaucoup plus importante entre 3700 cm^{-1} et 3500 cm^{-1} par rapport aux deux autres sols à texture sableuse. Cette région spectrale est spécifique à l'argile kaolinitique, aux environs de 3694 cm^{-1} , 3654 cm^{-1} , 3620 cm^{-1} (Nguyen *et al.*, 1991; Du *et al.*, 2008). D'ailleurs, les Luvisols sont surtout caractérisés par le lessivage de l'argile, d'où l'absence de certaines bandes à kaolinite sur le spectre de ce groupe de sol. La présence des gibbsites, de formule chimique $\text{Al}(\text{OH})_3$, différencie les ferralsols des autres groupes de sol. Les gibbsites se trouvent aux environs de 3620 cm^{-1} , 3525 cm^{-1} , 3450 cm^{-1} , 3392 cm^{-1} et 3376 cm^{-1} (Nguyen *et al.*, 1991; Balan *et al.*, 2006). Classés parmi les sols à texture sableuse, les arenosols et les luvisols sont surtout caractérisés par les 3 bandes à quartz proches de 2000 cm^{-1} , 1870 cm^{-1} et 1790 cm^{-1} (Viscarra Rossel *et al.*, 2006b; Viscarra Rossel *et al.*, 2008b). Les arenosols se distinguent également des autres par l'importance de la bande aux environs de 1365 cm^{-1} , qui peut être attribuée aux anions carboxylates (COO^-) (Janik *et al.*, 2007). La bande proche de 1660 cm^{-1} peut être attribuée aussi à des constituants organiques en l'occurrence des amides I et II. Les vertisols sont caractérisés par les deux bandes à smectite proches de 3630 cm^{-1} et 1630 cm^{-1} . Les bandes attribuées aux calcites aux environs de 2988 cm^{-1} , 2880 cm^{-1} et 2517 cm^{-1} ont été identifiées sur le spectre moyen des calcaric regosols.

3.2.3 Résultats des prédictions

Par le biais de leurs signatures spectrales, quelques propriétés des sols ont été modélisées dans le moyen infrarouge. La modélisation et la prédiction ont été réalisées dans un premier temps avec l'ensemble des échantillons, puis des essais ont été menés par groupes ou par une association de quelques groupes de sol. Les résultats les plus pertinents ont été retenus et présentés sur le tableau 4-3.

Tableau 4-3 : Résultats des modèles en calibration et des prédictions en validation

| Propriétés | Prétraitement | Unités | Calibration | | | | | Validation | | | | |
|--|---------------|------------------------|-------------|-------|----------------|-------|------|------------|-------|----------------|-------|------|
| | | | n | Sd | R ² | RMSEC | RPD | n | Sd | R ² | RMSEP | RPD |
| pH eau | - | | 494 | 0,84 | 0,49 | 0,46 | 1,83 | 165 | 0,88 | 0,67 | 0,51 | 1,74 |
| pH KCl | - | | 494 | 0,77 | 0,77 | 0,37 | 2,07 | 165 | 0,76 | 0,76 | 0,37 | 2,05 |
| Argile | SNV, smooth7 | g.100g ⁻¹ | 80 | 13,62 | 0,62 | 8,10 | 1,68 | 26 | 15,78 | 0,80 | 7,07 | 2,23 |
| Limon | SNV, smooth7 | g.100g ⁻¹ | 88 | 10,08 | 0,62 | 7,21 | 1,40 | 29 | 8,92 | 0,67 | 6,16 | 1,45 |
| Sable | SNV, smooth7 | g.100g ⁻¹ | 80 | 18,06 | 0,74 | 9,23 | 1,96 | 30 | 22,13 | 0,80 | 9,79 | 2,26 |
| Argile + limon fin | - | g.100g ⁻¹ | 80 | 18,43 | 0,73 | 9,56 | 1,93 | 27 | 19,95 | 0,88 | 2,89 | 2,89 |
| C _{org} | Smooth7 | g.kg ⁻¹ | 182 | 0,34 | 0,76 | 0,16 | 2,11 | 62 | 0,31 | 0,79 | 0,15 | 2,14 |
| Humidité | SNV, smooth7 | % | 441 | 7,98 | 0,66 | 4,63 | 1,72 | 148 | 7,71 | 0,67 | 4,40 | 1,75 |
| Densité apparente | - | g.cm ⁻¹ | 444 | 0,22 | 0,50 | 0,15 | 1,44 | 146 | 0,22 | 0,52 | 0,15 | 1,45 |
| Al _{ox} | SNV, smooth7 | g.kg ⁻¹ | 173 | 0,91 | 0,41 | 0,59 | 1,55 | 58 | 0,77 | 0,55 | 0,53 | 1,45 |
| Fe _{ox} | SNV, smooth7 | g.kg ⁻¹ | 174 | 1,39 | 0,66 | 0,82 | 1,70 | 58 | 1,10 | 0,55 | 0,78 | 1,41 |
| Al _{cbd} | SNV, smooth7 | g.kg ⁻¹ | 182 | 3,69 | 0,76 | 1,83 | 2,02 | 62 | 3,46 | 0,85 | 1,39 | 2,48 |
| Fe _{cbd} | - | g.kg ⁻¹ | 171 | 19,94 | 0,46 | 14,52 | 1,37 | 51 | 16,79 | 0,55 | 10,83 | 1,55 |
| Ca échangeable | - | Cmol+.kg ⁻¹ | 78 | 9,99 | 0,61 | 6,26 | 1,6 | 40 | 9,98 | 0,59 | 6,57 | 1,52 |
| Na échangeable | - | Cmol+.kg ⁻¹ | 72 | 0,22 | 0,05 | 0,19 | 1,16 | 37 | 0,29 | 0,07 | 0,29 | 1,00 |
| K échangeable | - | Cmol+.kg ⁻¹ | 75 | 0,43 | 0,09 | 0,36 | 1,19 | 38 | 0,32 | 0,50 | 0,24 | 1,33 |
| Mg échangeable | - | Cmol+.kg ⁻¹ | 78 | 2,27 | 0,45 | 1,67 | 1,36 | 40 | 1,44 | 0,31 | 1,33 | 1,08 |
| Par groupe de sol | | | | | | | | | | | | |
| C _{org} (Ferralsols) | Smooth 7 | g.kg ⁻¹ | 51 | 0,25 | 0,85 | 0,08 | 3,13 | 24 | 0,21 | 0,83 | 0,09 | 2,33 |
| C _{org} (Cambisols) | Smooth 7 | g.kg ⁻¹ | 37 | 0,27 | 0,86 | 0,09 | 3,00 | 21 | 0,31 | 0,79 | 0,15 | 2,08 |
| C _{org} (Ferralsols, Cambisols, Nitisols) | Smooth 7 | g.kg ⁻¹ | 104 | 0,31 | 0,90 | 0,09 | 3,44 | 54 | 0,29 | 0,81 | 0,13 | 2,23 |
| Al _{CBD} (Arenosols) | SNV, smooth7 | g.kg ⁻¹ | 42 | 3,29 | 0,76 | 1,42 | 2,32 | 24 | 3,15 | 0,71 | 1,27 | 2,48 |
| Al _{CBD} (Cambisols) | SNV, smooth7 | g.kg ⁻¹ | 42 | 1,47 | 0,98 | 0,25 | 5,88 | 20 | 1,65 | 0,81 | 0,79 | 2,09 |
| Fe _{CBD} (Ferralsols) | - | g.kg ⁻¹ | 47 | 21,09 | 0,86 | 6,86 | 3,07 | 25 | 18,68 | 0,79 | 12,3 | 1,52 |

En calibration, les valeurs de R² les plus faibles ont été obtenues avec les bases (0,19 pour le Na et 0,36 pour le K) et avec la teneur en Al_{ox} (R² = 0,41), et ceci pour les 5 groupes de sol tous confondus. Le pH_{KCl} (R² = 0,77), la teneur en C_{org} (R² = 0,76) et la teneur en Al_{CBD} (R² = 0,76) affichent les valeurs de R² les plus élevées. Par groupe de sol, les R² sont tous supérieurs à 0,8 excepté la teneur en Al_{CBD} pour les arenosols (R² = 0,76). Outre les bases échangeables qui ont un RPD < 1,4, seul le Fe_{CBD} a une valeur de 1,37. Les restes ont des valeurs supérieures ou égales à 1,4. Le modèle avec la teneur en Al_{CBD} des cambisols affichent la valeur la plus élevée (RPD = 5,88). La teneur en Fe_{CBD} représente également la RMSEC la plus élevée (14,52), suivi de celle en sable (RMSEC = 9,23) et en argile (RMSEC = 8,10). En validation, les R² se situent entre 0,52 et

0,85 pour toutes les propriétés du sol étudiées. La teneur en Al_{CBD} représente la valeur la plus élevée ($R^2 = 0,85$). Les RPD sont tous supérieurs à 1,4 et les valeurs les plus élevées (RPD = 2,89) ont été obtenues avec la teneur en argile + limon fin.

3.2.3.1 Texture (argile, sable, limon)

En validation, les teneurs en argile + limon fin, en argile seule et en sable sont les mieux prédites avec un $R^2 \geq 0,80$ chacun tandis qu'il est de 0,67 seulement pour la teneur en limon. Les valeurs des RPD sont respectivement 2,23 pour la teneur en argile, 2,26 pour la teneur en sable et 2,89 pour la teneur en argile + limon fin, ce qui leur qualifie d'une excellente prédiction (quand $RPD > 2$) d'après les critères de Chang *et al.* (2001; 2011) et d'une prédiction acceptable (quand $1,4 < RPD < 2$) pour la teneur en limon (RPD = 1,45). Pourtant, la prédiction de la teneur en argile est encore meilleure par rapport à celle en sable car la RMSE est seulement de 7,07% alors qu'elle est de 9,79 pour le sable (voir tableau 4-3 et figure 4-4).

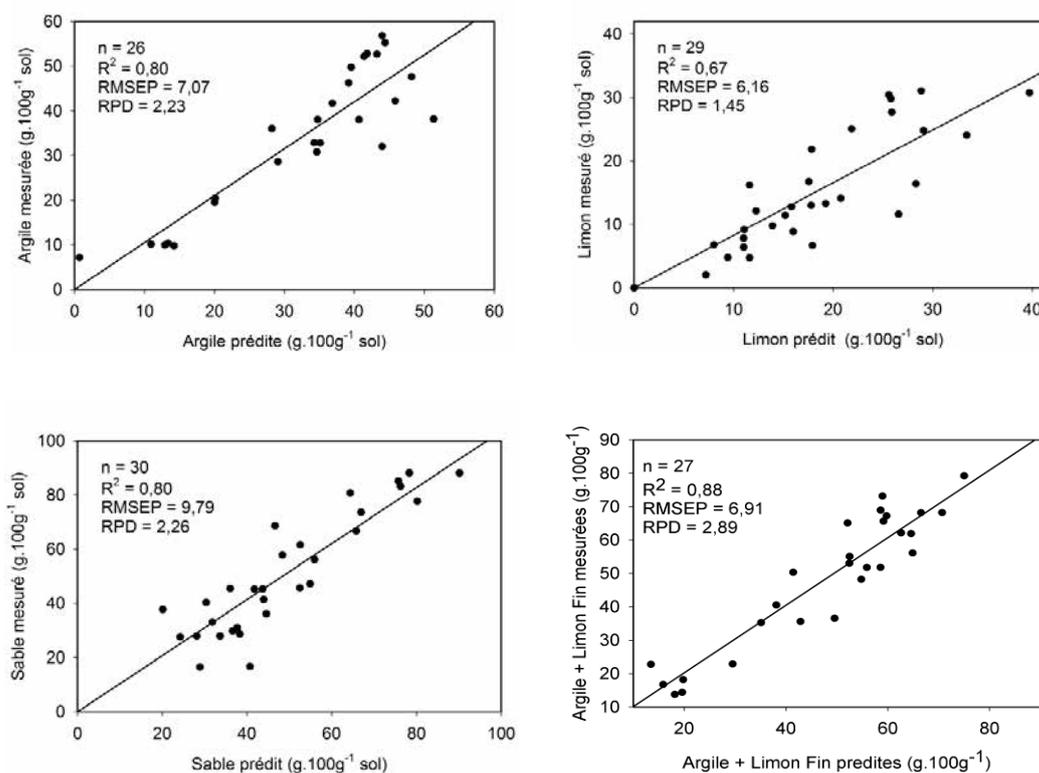


Figure 4-4 : Teneur en argile, en limon et en sable mesurées vs prédites en validation

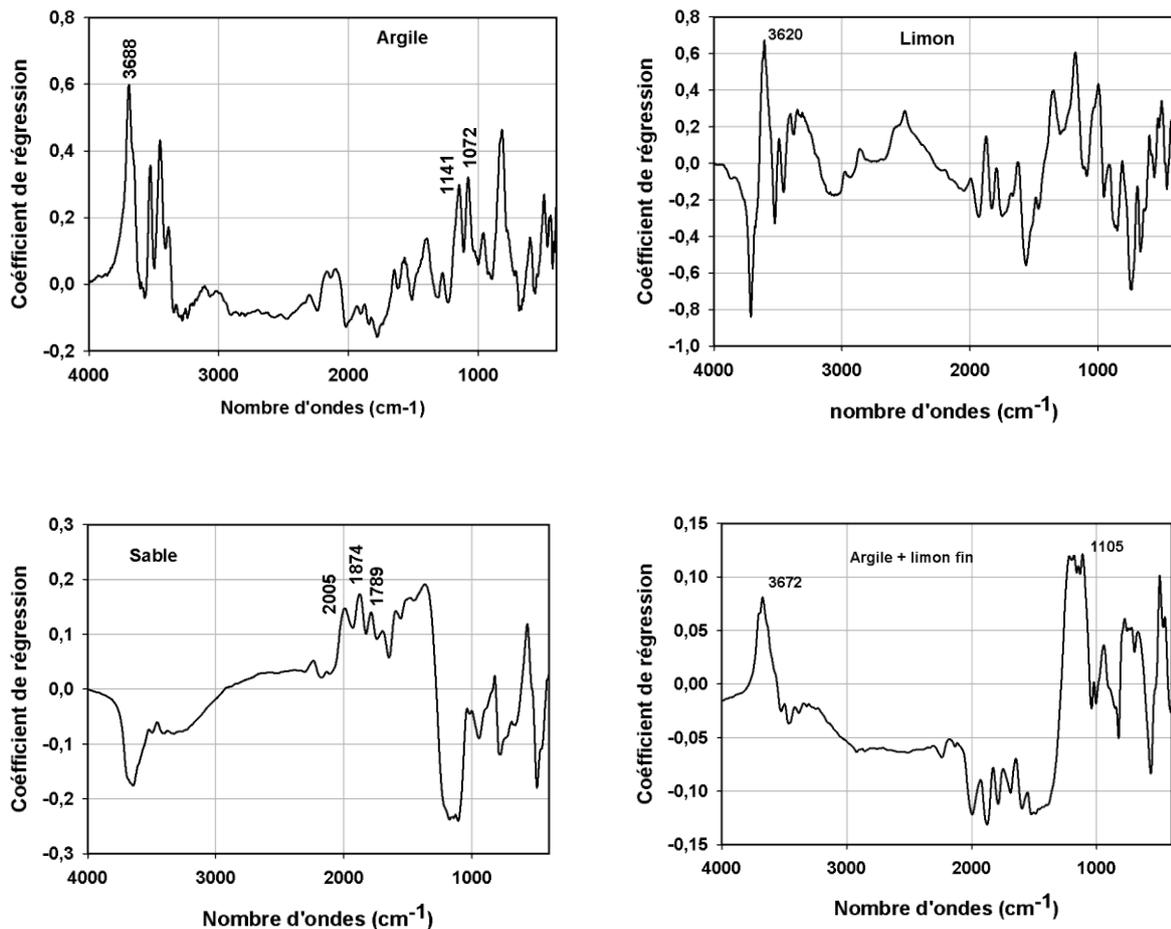


Figure 4-5: Loading pour la prédiction des textures

Les présents résultats ont une grande similitude avec ceux trouvés dans la littérature : sur les sols Australiens, en utilisant la PLS, Janik *et al.* (2009) ont trouvé un RPD= 2,3 pour la teneur en argile, un RPD= 1,4 pour celle en limon et un RPD = 2,6 pour la teneur en sable. Toujours avec ces sols tropicaux de l'Australie, les résultats de Minasny *et al.* (2009) ont montré un RPD de 2,6 pour la teneur en argile ($R^2 = 0,86$) ; 1,5 pour la teneur en limon ($R^2 = 0,58$) et 2,3 pour la teneur en sable ($R^2 = 0,83$). Dans plusieurs études, il a été constaté que la SMIR permet d'avoir une bonne prédiction pour l'argile et le sable (Minasny *et al.*, 2009).

Pour Madagascar, les argiles de ces 5 groupes de sol, notamment les ferralsols, les cambisols et les nitisols, sont dominées par des argiles kaolinitiques de type 1/1. En moyen infrarouge, les sols tropicaux expriment très bien les bandes à kaolinites et à quartz. Les 3 bandes de l'argile kaolinitique sont bien présentes sur les ferralsols, les cambisols, les nitisols et les arenosols (voir figure 4-5). Les bandes aux alentours de 3694 cm⁻¹, 3654 cm⁻¹ et 3620 cm⁻¹ sont attribuées à la kaolinite, dues à la vibration de l'élongation des -OH (Nguyen *et al.*, 1991; Du *et al.*, 2008). Celles proches de 1116 cm⁻¹, 1105 cm⁻¹ et 1020 cm⁻¹ font partie aussi des bandes à kaolinites, dues à la

vibration lors de la déformation angulaire des molécules Al-OH (Nguyen *et al.*, 1991; Ip *et al.*, 2008). Les sables se trouvent essentiellement aux alentours de 2000 cm^{-1} , 1870 cm^{-1} , 1790 cm^{-1} et quelques bandes en dessous de 1000 cm^{-1} (Nguyen *et al.*, 1991; Viscarra Rossel *et al.*, 2006b; Viscarra Rossel *et al.*, 2008b). L'existence de ces bandes, très bien exprimées en moyen infrarouge, explique ainsi l'obtention d'une excellente prédiction pour l'argile et le sable.

3.2.3.2 Carbone organique du sol

Afin d'éviter la non normalité des données, la fonction logarithmique a été utilisée pour transformer les teneurs en carbone organique du sol.

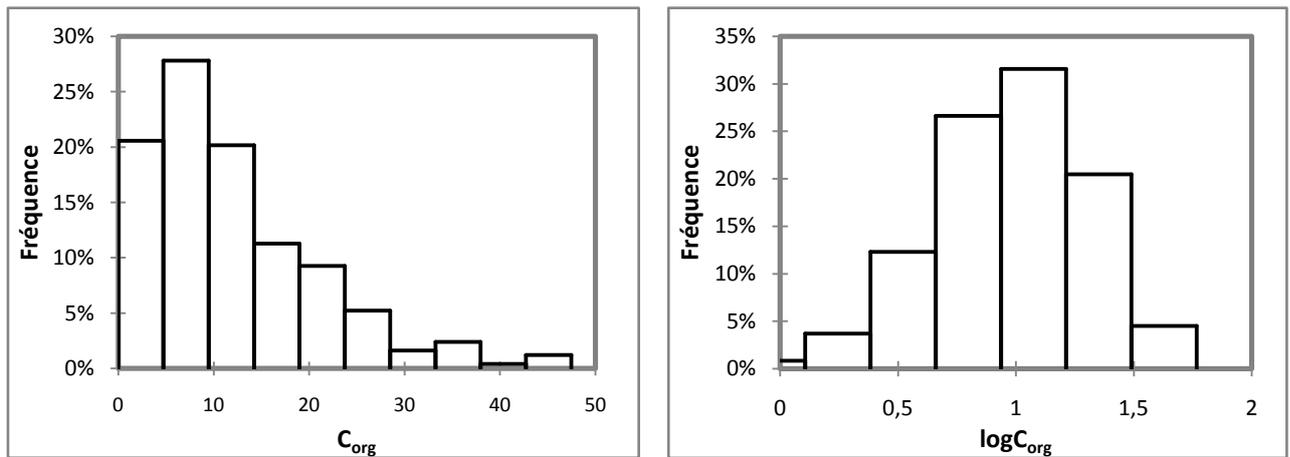


Figure 4-6: Fréquence de distribution pour le C_{org} avant et après transformation en $\log C_{org}$

Après la transformation avec la fonction logarithmique, la figure 4-6 montre que la distribution des échantillons pour le C_{org} est devenue très proche de la distribution normale.

En utilisant tous les groupes de sol, une excellente prédiction a été obtenue pour la teneur en C_{org} avec un R^2 de 0,79 et un RPD de 2,14. Après avoir réalisés des essais par groupe de sol, les résultats les plus pertinents sont ceux avec les sols à texture argileuse (ferralsols, cambisols, nitisols). La valeur de R^2 et le RPD se sont nettement améliorées avec les ferralsols ($R^2= 0,83$; RPD= 2,33) et avec la combinaison ferralsols-cambisols-nitisols ($R^2= 0,81$; RPD= 2,23).

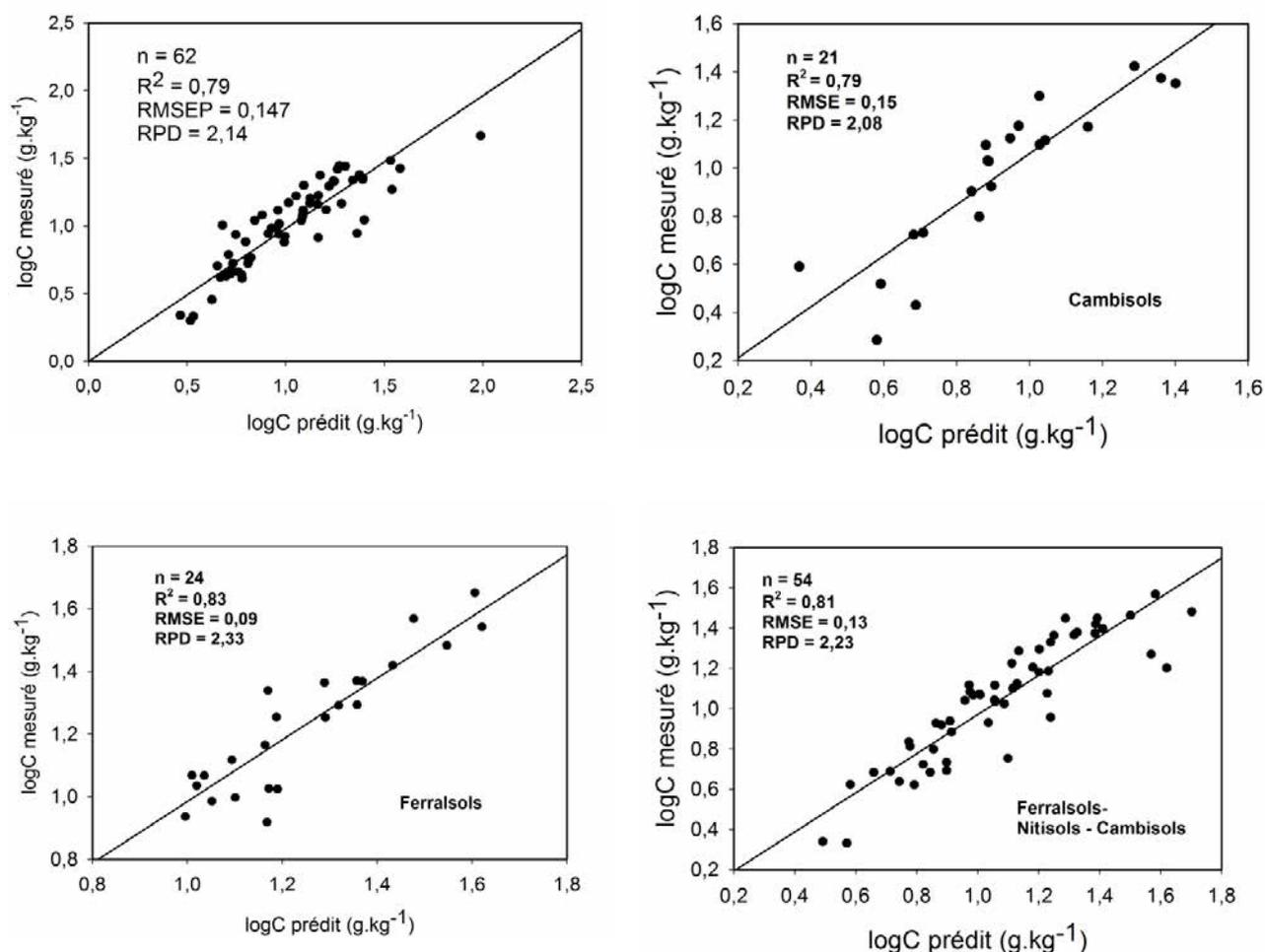


Figure 4-7 : Teneurs en C_{org} mesurées vs prédites en validation

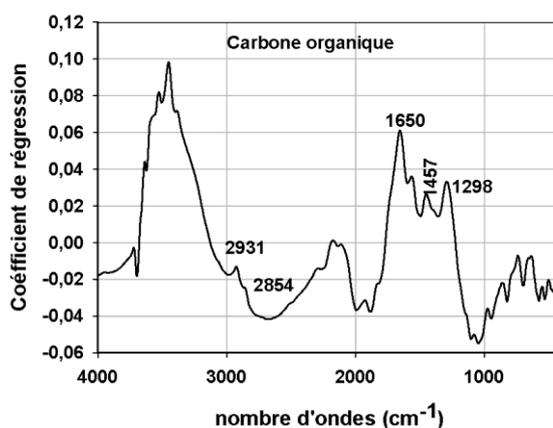


Figure 4-8: Loading pour la prédiction de la teneur en C_{org}

Le carbone organique fait partie des constituants du sol dont la prédiction est souvent excellente en moyen infrarouge. Parmi les multitudes de résultats publiés, on peut citer: sur les sols

tempérés de la Bretagne-France, Aïchi *et al.* (2009) ont trouvé un $R^2 = 0,77$ avec un RPD= 2,14, Minasny *et al.* (2009) et Viscarra Rossel *et al.* (2008b) ont trouvé chacun un $R^2 = 0,83$ avec un RPD= 2,4 et un $R^2 = 0,91$ avec un RPD= 3,22 avec des échantillons des sols tropicaux d'Australie.

A Madagascar, les sols à texture argileuse comme les ferralsols, les cambisols et les nitisols se développent essentiellement en haute altitude et sur les côtes Est de l'île, qui sont des zones plus humides et moins chaudes. La production de biomasse et les restitutions aux sols sont beaucoup plus importantes dans ces zones. D'ailleurs, il a déjà été prouvé que la teneur en carbone organique du sol est corrélée positivement à la teneur en argile (Feller *et al.*, 1991). Outre la richesse de ces classes de sol en carbone, plusieurs bandes dédiées à des composées organiques ont été également identifiées en moyen infrarouge. On peut en citer quelques unes: les alkyles $-CH_2$ aux environs de 2922 cm^{-1} et 2853 cm^{-1} , les acides carboxyliques ($-COOH$) proches de 1708 cm^{-1} , les amides I ($C=O$) proches de 1640 cm^{-1} , les carboxylates proches de 1415 cm^{-1} , les aromatiques aux environs de 1238 cm^{-1} , les carbohydrates ($-COH$) proches de 1051 cm^{-1} (Janik *et al.*, 2007; Artz *et al.*, 2008; Smidt et Parravicini, 2009). Ces fréquences sont parmi les plus importantes pour la prédiction de la teneur en C_{org} du sol (Viscarra Rossel *et al.*, 2008b). Ces bandes sont présentes sur le loading du modèle de prédiction utilisé (figure 4-8). C'est ce qui explique ainsi l'obtention d'un meilleur résultat avec le C_{org} .

3.2.3.3 Formes du fer et de l'aluminium

Avec l'ensemble des groupes de sol, la teneur en Al_{CBD} affiche les meilleurs résultats avec un R^2 de 0,85 ; un RPD de 2,48 et une RMSE de 1,39%. La prédiction de la teneur en Fe_{CBD} reste modeste avec un RPD de 1,55 et une valeur très élevée de la RMSE (10,83%). Pour les formes amorphes et microcristallines extraites avec de l'oxalate d'ammonium, les RPD sont très moyens voir à la limite du seuil minimal acceptable selon les critères de Chang *et al.* (2011) en validation (RPD= 1,45 pour la teneur en Al et RPD= 1,41 pour la teneur en Fe).

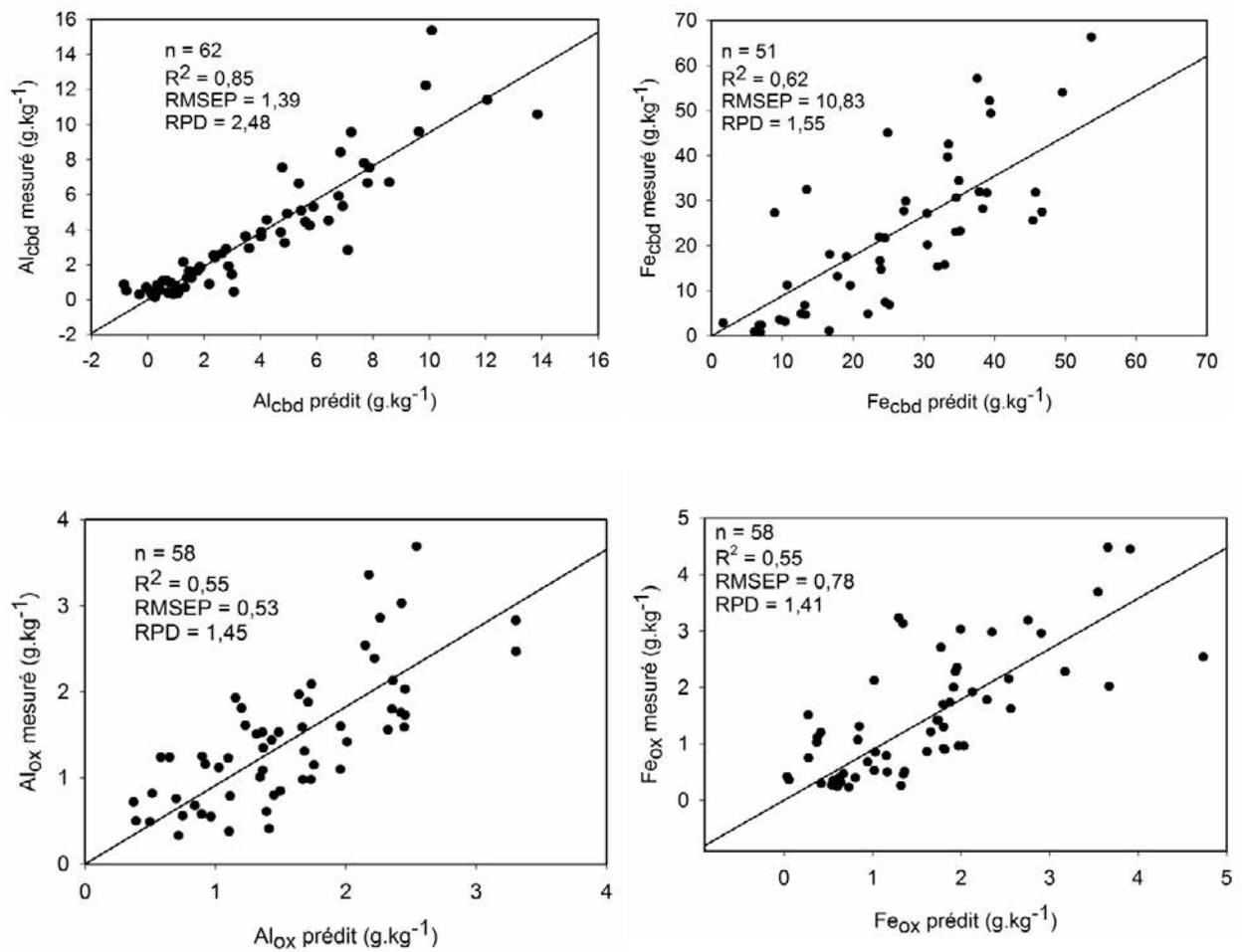


Figure 4-9 : Teneurs en Al_{CBD}, en Fe_{CBD}, en Al_{OX} et en Fe_{OX} mesurées vs prédites en validation (5 groupes de sol)

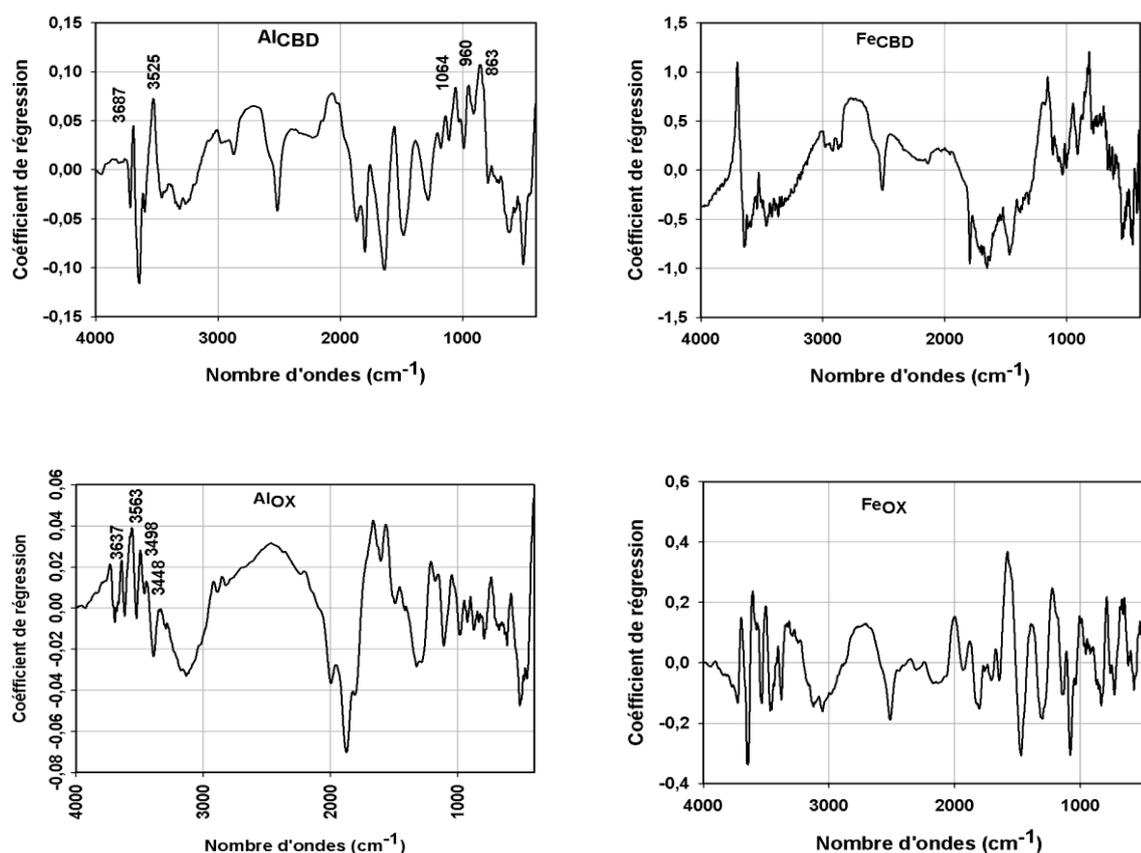


Figure 4-10: Loading pour la prédiction de la teneur en Al_{CBD}, en Fe_{CBD}, en Al_{OX} et en Fe_{OX}

Pourtant, les RMSE sont en dessous de la prédiction de la teneur en Al_{CBD} (RMSE= 0,53% pour l'Al_{OX} et RMSE= 0,78% pour Fe_{OX}). Ces résultats montrent que malgré les valeurs du RPD < 2 pour la teneur en Al_{OX} et en Fe_{OX} et un R² de 0,55, la prédiction reste intéressante en se référant à l'erreur obtenue pour ces 2 éléments. Rappelons que c'est impératif de tenir compte de la RMSE lors de l'évaluation des résultats de la prédiction. Elle donne des informations sur les erreurs éventuelles induites sur les résultats.

Les prédictions par groupe de sol ont donné les meilleurs résultats pour la teneur en Al_{CBD} des ferrasols et des cambisols (figure 4-11). Les RPD trouvés sont tous supérieurs à 2 avec respectivement un R² de 0,71 et 0,81.

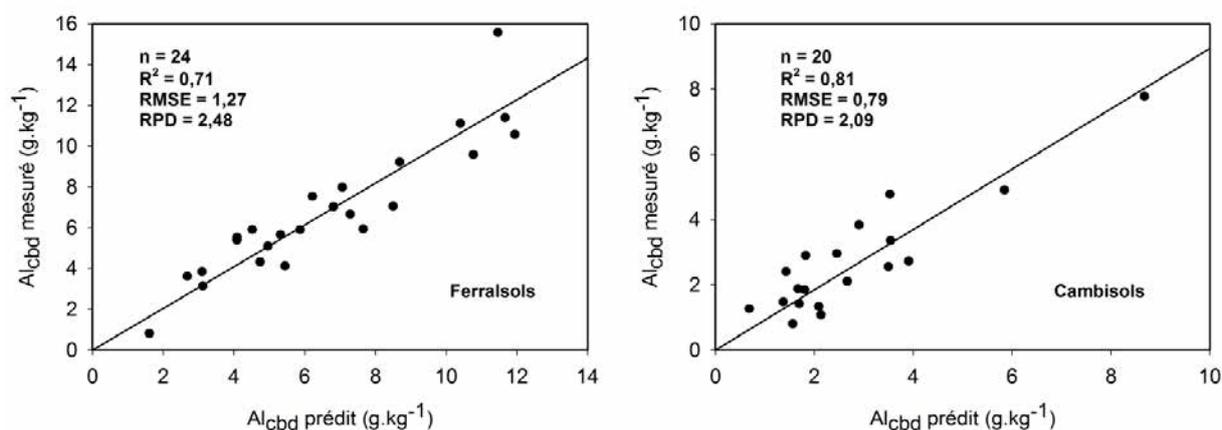


Figure 4-11 : Teneur en Al_{CBD} mesurées vs prédites pour les ferralsols et les cambisols

D'après les résultats de Minasny *et al.* (2009), la SMIR arrive seulement à prédire les teneurs en Fe_{CBD} et en Al_{CBD} ($RPD= 2,2$ et $R^2= 0,79$; $RPD= 1,8$ et $R^2= 0,69$). Les prédictions pour les extraits à l'oxalate sont mauvaises ($RPD= 0,9$ et $R^2= 0,06$ pour le Fe_{OX} ; $RPD= 1,2$ et $R^2= 0,08$ pour l' Al_{OX}). Les diverses formes du fer et de l'aluminium sont directement liées à la minéralogie du sol. Pour le cas des oxydes de fer en particulier, le SMIR n'est pas le bon outil pour sa prédiction. Ce sont surtout les régions visibles et les proches infrarouges (PIR) qui sont les mieux adaptés à la prédiction de la teneur en hématite et en goethite du sol (Pirie *et al.*, 2005; Minasny *et al.*, 2009; Sellitto *et al.*, 2009). Ceci explique en grande partie les résultats moins pertinents à la fois pour les teneurs en Fe_{CBD} et en Fe_{OX} , les fers ne s'expriment pas bien dans la région du moyen infrarouge.

L'aluminium est l'un des éléments qui constituent la kaolinite, de formule $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, mais il est surtout l'élément de base de la gibbsite, de formule chimique $Al(OH)_3$. Ces deux éléments minéraux du sol présentent des bandes très nettes sur les spectres MIR. La kaolinite se situe entre 3700 cm^{-1} et 3600 cm^{-1} et en dessous de 1000 cm^{-1} . Quant à la gibbsite, les bandes proches de 3620 cm^{-1} , 3525 cm^{-1} , 3450 cm^{-1} , 3392 cm^{-1} et 3376 cm^{-1} sont présents sur le spectre moyen des ferralsols (figure 4-1) et sur le loading des modèles utilisés (figure 4-10), dues à la vibration d'élongation des liaisons -OH. L'aluminium est très mobile dans la couche arable supérieure où se déroule la dissolution préférentielle de la kaolinite et la cristallisation de la gibbsite. Lors de la dissolution et de l'altération de la kaolinite, les éléments comme l'aluminium et la silice sont libérés en quantité importante dans la solution du sol. Dans des milieux humides où se développent essentiellement les ferralsols, le départ de la silice se déroule durant le drainage et le passage à la période sèche. Ceci s'accompagne de la formation des aluminiums amorphes et cristallisés (que l'on extrait avec la méthode CBD). La précipitation des gibbsites et la substitution du fer par de l'aluminium se réalisent durant cette période. Effectivement, une

substitution du fer par de l'aluminium est couramment rencontrée pour la goethite et l'hématite (Volkoff *et al.*, 1989).

Cette substitution dépend surtout de la température et de l'humidité et qui reflète l'activité de l'aluminium dans le sol. D'après Fritsch *et al.* (2005), la kaolinite, l'hématite et la goethite pauvre en aluminium sont les témoins des premiers stades de ferrallitisation tandis que la présence de la gibbsite et de la goethite riche en aluminium témoigne le processus d'allitisation. Ces deux éléments correspondent à la dernière génération des minéraux du sol. Il est donc évident que la présence significative de la gibbsite dans le sol s'accompagne d'une teneur importante en Al_{CBD} . Tous ces processus expliquent ainsi l'obtention des meilleurs résultats avec les ferralsols très riches en gibsites pour la prédiction de l' Al_{CBD} : un RPD égal à 2,48, un R^2 de 0,71 et un RMSE égal à 1,27%. Pour l'ensemble des groupes de sol, les ferralsols constituent près de la moitié des échantillons utilisés ($n = 24$ sur 62) lors de la prédiction de l' Al_{CBD} . Cette situation contribue ainsi à l'obtention d'une excellente prédiction avec les 5 groupes de sol.

3.2.3.4 pH_{eau} et pH_{KCl}

La figure 4-12 montre que le pH_{KCl} a une excellente prédiction avec un RPD de 2,05, un R^2 de 0,76 et une RMSE de 0,37 par rapport au pH_{eau} . Néanmoins, les résultats pour le pH_{eau} se situe dans le seuil acceptable pour une prédiction ($1,4 < RPD < 2$).

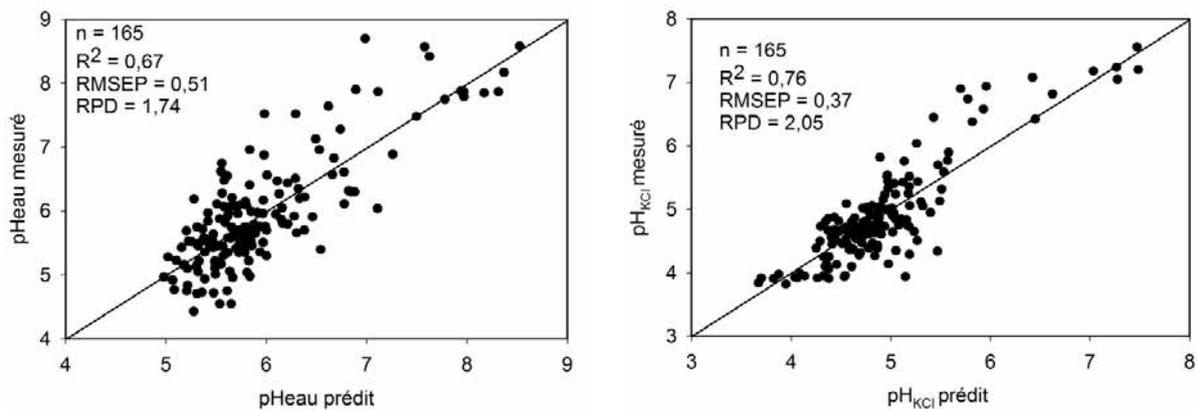


Figure 4-12 : pH_{eau} et pH_{KCl} mesurés vs prédits

Les résultats pour le pH_{eau} sont très proches de ceux trouvés par Janik *et al.* (2009) avec un RPD de 1,5 ; par Viscarra Rossel *et al.* (2008b) avec un RPD de 1,64 et un R^2 de 0,69, par Pirie *et al.* (2005) avec un RPD de 1,8 et un R^2 de 0,71. Dans la littérature, peu sont les scientifiques qui publient des résultats de prédiction avec le pH_{KCl} , ils utilisent surtout le pH_{CaCl_2} . Ce choix est basé essentiellement sur la finalité et l'utilité des analyses effectuées. Ainsi, nous n'avons pas pu trouver des références relatives à la prédiction en cet élément.

Le pH du sol ou les activités des protons n'ont pas des réponses directes sur les signatures spectrales malgré le fait qu'on arrive plus ou moins à bien prédire le pH (Stenberg *et al.*, 2010). D'après Chang *et al.* (2001) et Stenberg *et al.* (2010), cela pourrait être dû à la covariation des constituants du sol spectralement actif tels que la matière organique et l'argile. En outre, le pH du sol est étroitement lié à la quantité des cations acides et des bases dans la solution du sol. Minasny *et al.* (2009) a pris comme hypothèse : une excellente prédiction du pH en moyen infrarouge est essentiellement due à ses relations avec les cations échangeables du sol.

3.2.3.5 Densité apparente et humidité du sol

Les résultats sur la figure 4-13 montrent que la modélisation des spectres MIR permet d'avoir une prédiction acceptable ($1,4 < RPD < 2$) à la fois pour la densité apparente ($RPD=1,45$ et $R^2=0,52$) et pour l'humidité relative ($RPD=1,75$ et $R^2=0,67$).

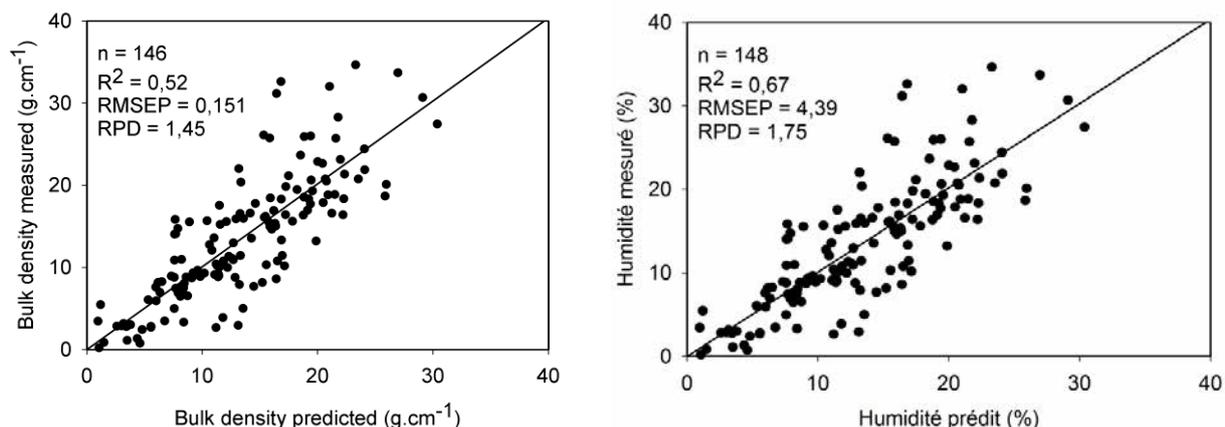


Figure 4-13 : Densité apparente et humidité relative mesurées vs prédites

L'humidité du sol influence plusieurs propriétés du sol y compris la densité apparente. Le calcul de la densité apparente nécessite la connaissance de l'humidité du sol. Pour la prédiction de l'humidité, Janik *et al.* (2009) ont trouvé un RPD de 2,1. En moyen infrarouge, l'eau s'exprime souvent par la fréquence des vibrations fondamentales des molécules d'eau. Les molécules d'eau incorporées dans les couches des argiles contribuent par le biais des vibrations d'élongation des hydroxyles (-OH) à l'expression des bandes à kaolinite aux environs de 3698 cm⁻¹, 3672 cm⁻¹, 3655 cm⁻¹ et 3622 cm⁻¹. Les hydroxyles interviennent dans plusieurs fréquences de la région MIR par ses diverses modes d'expression comme la vibration d'élongation et de déformation angulaire.

3.2.3.6 Bases échangeables :

La figure 4-14 montre que les résultats n'affichent pas une bonne prédiction pour les bases échangeables avec le MIR. Seul le Ca échangeable présente une prédiction acceptable (RPD>1,4) avec un R^2 de 0,59. Un RPD de 1,33 et un R^2 de 0,50 ont été obtenus avec le K échangeable. Le Na échangeable a donné la plus mauvaise prédiction avec un R^2 de 0,07 et un RPD égal à 1.

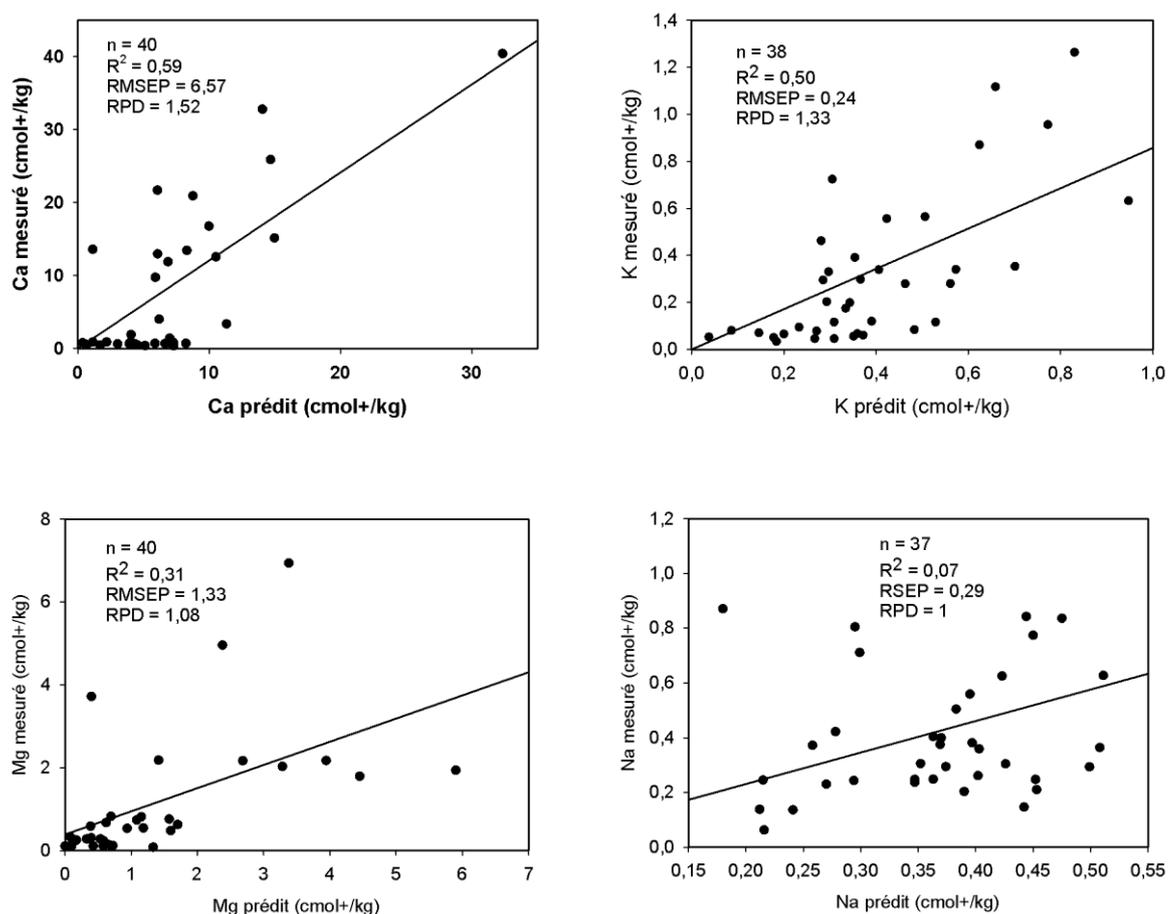


Figure 4-14: Bases échangeables mesurées vs prédites

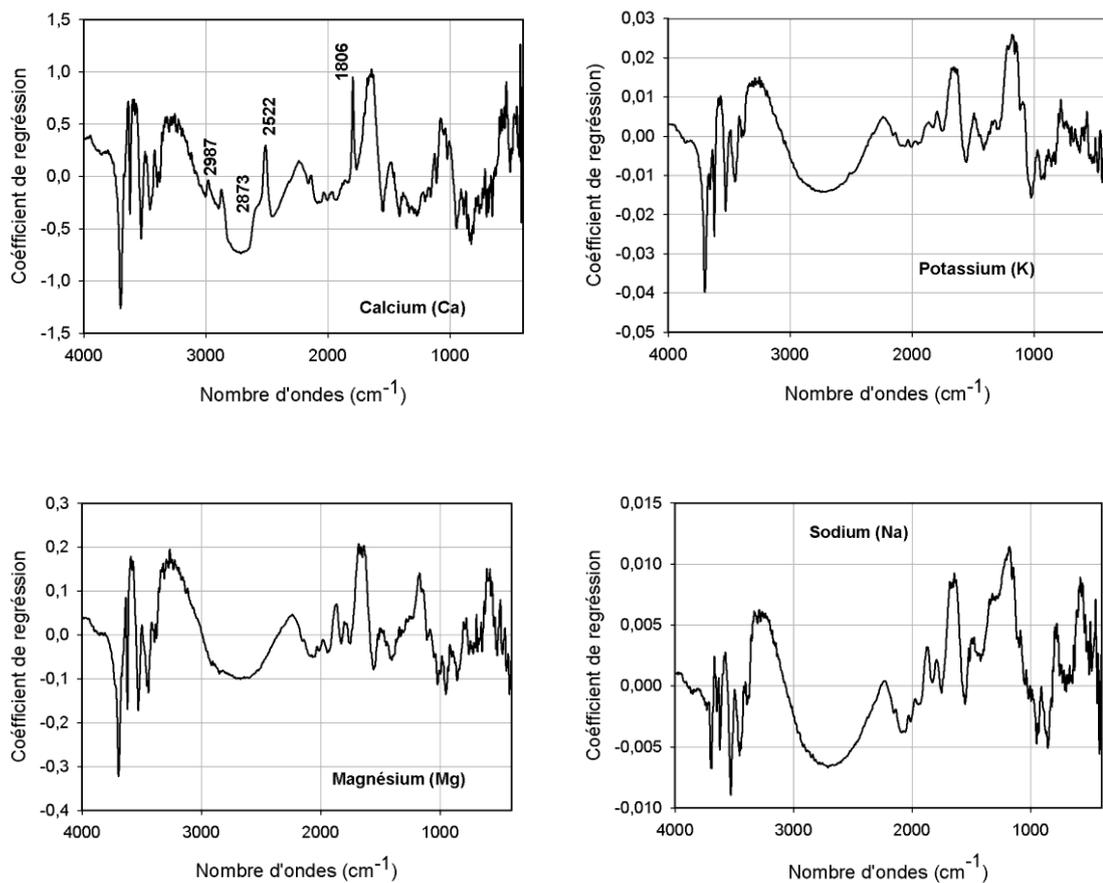


Figure 4-15: Loading pour les prédictions des bases échangeables

Ces résultats sont très proches de ceux trouvés par Pirie *et al.* (2005) en utilisant le MIR. Ils ont avancé comme valeurs de R^2 et de RPD : 0,64 et 1,6 pour le Ca, 0,69 et 1,7 pour le Mg, 0,27 et 1,1 pour le K et enfin 0,20 et 1,1 pour le Na. Le Ca échangeable est beaucoup plus facile à modéliser par rapport aux autres cations grâce à la présence des bandes relatives aux calcites. Ces bandes se trouvent proches de 2988 cm^{-1} , 2880 cm^{-1} , 2517 cm^{-1} et 1800 cm^{-1} (Nguyen *et al.*, 1991). Elles sont présentes sur le loading du modèle pour le Ca échangeable (figure 4-15). Plusieurs raisons peuvent expliquer ces faibles taux de prédiction des bases échangeables. D'après Minasny *et al.* (2009), la concentration de ces bases, notamment le K et le Na, dans les sols normaux (non situés sur les côtes) est très faible. Par conséquent, ces éléments n'ont pas d'influence sur les signatures spectrales des sols analysés. Le niveau de ces éléments dans le sol varie énormément dans le paysage. D'autres facteurs comme la nature des roches mères interviennent également sur l'importance quantitative de ces éléments dans le sol.

En tant qu'éléments échangeables dans le sol, les bases ne présentent pas également des liaisons covalentes sensibles à l'excitation avec le MIR. Ainsi, les prédictions des bases échangeables restent difficiles et aléatoires pour le cas de l'utilisation du SMIR.

4- CONCLUSION

La technique de spectrométrie en moyen infrarouge (SMIR) est un outil très adapté à des analyses qualitatives et quantitatives des sols de Madagascar. Les travaux de prédiction dans la présente étude ont montré la potentialité de cette méthode à prédire un grand nombre de propriétés des sols. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec la texture, en l'occurrence les teneurs en argile, en sable et en argile + limon fin. Ces constituants ont été bien prédits grâce à la présence des signatures spectrales significatives des bandes relatives à la kaolinite et au quartz des échantillons de sol. La présence des argiles kaolinitiques et des gibbsites dans les sols explique l'obtention d'une bonne prédiction pour l' Al_{CBD} , que ce soit avec l'ensemble des groupes de sol ou pour chacun des ferralsols, cambisols et nitisols. Le carbone organique a également affiché des meilleurs résultats, plus particulièrement avec les ferralsols, cambisols et nitisols. L'existence d'une corrélation positive entre la teneur en argile et la teneur en C_{org} explique ces résultats pour ces 3 groupes de sol à texture argileuse. Pour l'ensemble des échantillons, un excellent RPD a été obtenu avec le pH_{KCl} . Les plus mauvaises prédictions ont été constatées avec les bases échangeables. L'inexistence des liaisons covalentes susceptibles de donner une réponse au passage des lumières infrarouges pour les bases en est le principal raison. Malgré la faible performance de cette technique avec certaines propriétés des sols, la prédiction avec les spectres MIR constitue une alternative pour substituer les méthodes conventionnelles d'analyses de sol en laboratoire. Son application dans des pays à vocation agricole comme Madagascar pourra contribuer énormément à l'amélioration de la gestion de la fertilité des sols cultivés dans une optique d'une augmentation de la productivité agricole.

Références bibliographiques

Aïchi, H., Fouad, Y., Walter, C., Viscarra Rossel, R.A., Lili Chabaane, Z. and Sanaa, M., 2009. Regional predictions of soil organic carbon content from spectral reflectance measurements. *Biosystems Engineering*, 104(3): 442-446.

Artz, R.R.E., Chapman, S.J., Jean Robertson, A.H., Potts, J.M., Laggoun-Défarge, F., Gogo, S., Comont, L., Disnar, J.-R. and Francez, A.-J., 2008. FTIR spectroscopy can be used as a screening tool for organic matter quality in regenerating cutover peatlands. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(2): 515-527.

Balan, E., Lazzeri, M., Morin, G. and Mauri, F., 2006. First-principles study of the OH-stretching modes of gibbsite. *American Mineralogist*, 91: 115-119.

Barrios, E., 2007. Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics*.

Bourgeat, F. and Aubert, G., 1972. Les sols ferrallitiques à Madagascar. *Madagascar revue de géographie*, Université de Madagascar: 1-23.

Chang, C.-W., Laird, D.A., Mausbach, M.J. and Hurburgh Jr., C.R., 2001. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy–Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 480-490.

Chang, C.-W., Laird, D.A., Mausbach, M.J. and Hurburgh Jr., C.R., 2011. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy–Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 480-490.

Cobo, J.G., Dercon, G., Yekeye, T., Chapungu, L., Kadzere, C., Murwira, A., Delve, R. and Cadisch, G., 2010. Integration of mid-infrared spectroscopy and geostatistics in the assessment of soil spatial variability at landscape level. *Geoderma*, 158(3-4): 398-411.

Dabin, B., 1984-1985. Les sols tropicaux acides. *Cahier ORSTOM, Série Pédologique*, XXI(1): 7-19.

Dabin, B., 1985. Les sols tropicaux acides. *Cahier ORSTOM, Série Pédologique*, XXI: 7-19.

Dale, V.H. and Polasky, S., 2007. Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. *Ecological Economics*, 64(2): 286-296.

Droogers, P., 2004. Adaptation to climate change to enhance food security and preserve environmental quality: example for southern Sri Lanka. *Agricultural Water Management*, 66: 15-33.

Du, C., Linker, R. and Shaviv, A., 2008. Identification of agricultural Mediterranean soils using mid-infrared photoacoustic spectroscopy. *Geoderma*, 143(1-2): 85-90.

Feller, C., Fritsch, E., Poss, R. and Valentin, C., 1991. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'ouest, en particulier). Cahier ORSTOM, Série Pédologique, XXVI(1): 25-36.

Fritsch, E., Morin, G., Bedidi, A., Bonnin, A., Balan, E., Caquineau, S. and Calas, G., 2005. Transformation of hematite and Al-poor goethite to Al-rich goethite and associated yellowing in a ferralitic clay soil profil of the middle Amazon Basin (Manaus, Brazil). European Journal of Soil Science, 56: 575-588.

Guerrero, C., Rossel, R.A.V. and Mouazen, A.M., 2010. Special issue [']Diffuse reflectance spectroscopy in soil science and land resource assessment'. Geoderma, 158(1-2): 1-2.

Ip, K.H., Stuart, B.H., Ray, A.S. and Thomas, P.S., 2008. A spectroscopic investigation of the weathering of a heritage Sydney sandstone. Spectrochimica Acta Part A, 71: 1032-1035.

Janik, L.J., Forrester, S.T. and Rawsonb, A., 2009. The prediction of soil chemical and physical properties from mid-infrared spectroscopy and combined partial least-squares regression and neural networks (PLS-NN) analysis. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 97: 179-188.

Janik, L.J. and Skjemstad, J.O., 1995. Characterization and Analysis of Soils Using Mid-infrared Partial Least- Squares. II.* Correlations with Some Laboratory Data. Australian Journal of Soil Research, 33: 637-650.

Janik, L.J., Skjemstad, J.O., Shepherd, K.D. and Spouncer, L.R., 2007. The prediction of soil carbon fractions using mid-infrared-partial least square analysis. Australian Journal of Soil Research, 45: 73-81.

Madari, B.E., Reeves Iii, J.B., Machado, P.L.O.A., Guimarães, C.M., Torres, E. and McCarty, G.W., 2006. Mid- and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferralsols. Geoderma, 136(1-2): 245-259.

Minasny, B., Tranter, G., McBratney, A.B., Brough, D.M. and Murphy, B.W., 2009. Regional transferability of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopic prediction for soil chemical properties. Geoderma, 153: 155-162.

Nguyen, T., Janik, L.J. and Raupach, M., 1991. Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform (DRIFT) Spectroscopy in Soil Studies. Australian Journal of Soil Research, 29: 49-67.

Pirie, A., Singht, B. and Islam, K., 2005. Ultrat-violet, visible, near-infrared and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopic techniques to predict several soil proprieties Australian Journal of Soil Research, 43: 713-721.

Reeves III, J.B., 2010. Near- versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: Where are we and what needs to be done? *Geoderma*, In Press, Corrected Proof.

Segalen, P., 1994. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique: Tome I,II,III. 579.

Sellitto, V.M., Fernandes, R.B.A., Barrón, V. and Colombo, C., 2009. Comparing two different spectroscopic techniques for the characterization of soil iron oxides: Diffuse versus bi-directional reflectance. *Geoderma*, 149: 2-9.

Smidt, E. and Parravicini, V., 2009. Effect of sewage sludge treatment and additional aerobic post-stabilization revealed by infrared spectroscopy and multivariate data analysis. *Bioresource Technology*, 100(5): 1775-1780.

Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M. and Wetterlind, J., 2010. Visible and NIR Infrared Spectroscopy in Soil Science. *Advances in Agronomy*, 107: 163-215.

Viscarra Rossel, R.A., Jeon, Y.S., Odeh, I.O.A. and McBratney, A.B., 2008. Using a legacy soil sample to develop a mid-IR spectral library. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46: 1-16.

Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J. and 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.

Volkoff, B., Melfi, A.J. and Pedro, G., 1989. Nature des oxydes de fer dans les sols du Brésil , répartition et fonction du climat. *Sci. Géol., Bull.*, 42(1): 15-25.

Walkley, A. and Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(29-38).

**CHAPITRE V - MODELISATION DES COULEURS DU
SOL POUR LA PREDICTION DE LA TENEUR EN FER
ET EN CARBONE ORGANIQUE**

RESUME

Depuis longtemps, la couleur du sol a été considérée comme un outil indispensable pour la description et la classification mais également pour l'évaluation qualitative de la fertilité des sols. La couleur peut être également utilisée pour des analyses quantitatives de certaines propriétés des sols. En effet, la couleur du sol est essentiellement liée à la forme du fer qui le compose et à sa teneur en matière organique. La présente étude a pour objectif de modéliser la couleur du sol pour prédire la teneur en fer et en C_{org} . Elle a été réalisée sur des échantillons issus de 113 sites dans tout Madagascar, sur des profondeurs de 0-10, 10-20 et 20-30 cm comprenant 5 groupes de sol. La forme du fer a été analysée avec la méthode CBD et la teneur en C_{org} avec la méthode Walkley & Black. Deux méthodes ont été utilisées pour la mesure des couleurs sur des échantillons secs et humides : identification des couleurs avec le code Munsell, numérisation des échantillons à l'aide d'un appareil photo numérique avec un dispositif spécialisé. Les valeurs HVC (Hue, Value, Chroma) du Munsell et les valeurs RVB (Rouge, Vert, Bleu) des photos ont été transformées avec le logiciel Colosol pour avoir les différents modèles spatiaux de couleur. Le choix des variables pour l'établissement des modèles a été basé sur les résultats de la corrélation entre les transformés de couleur et la teneur en fer et en C. Les analyses de corrélation ont montré que ces deux éléments sont faiblement corrélés aux couleurs Munsell, contrairement aux couleurs RVB. Il a été décidé ainsi d'utiliser les photos numériques pour la modélisation. Une meilleure corrélation a été trouvée entre la teneur en Fe_{CBD} et couleur RVB à l'état sec, et C_{org} et couleur RVB à l'état humide. Les arenosols avec le paramètre CIE C et les luvisols avec la chromaticité x, ont affiché les meilleurs résultats pour le Fe_{cbd} avec des R^2_{aj} respectifs de 0,95 et 0,86 et un RMSE de 2,88‰ et 4,82‰. Le modèle pour les cambisols est moins pertinent avec un R^2_{aj} de 0,40 et une RMSE de 21,13‰. Pour le C_{org} , le meilleur modèle a été obtenu avec les arenosols et le chroma C présentant : un R^2_{aj} de 0,72 et un RMSE de 1,34‰. Les ferralsols avec le paramètre de couleur u^* et les nitisols avec le chroma C ont respectivement un R^2_{aj} de 0,63 et 0,61 et un RMSE de 4,99‰ et 2,96‰. Ces résultats ont montré que ces deux propriétés du sol peuvent être prédites avec les différents modèles spatiaux de couleur. Les arenosols et luvisols représentent les meilleurs modèles pour le Fe_{CBD} , dus à l'individualisation très poussée des sesquioxydes de fer, offrant au sol une teinte plus rouge. Le développement d'un tel outil, moins coûteux et très accessible, contribue essentiellement au développement de la recherche en agronomie dans des pays comme Madagascar où les coûts liés aux analyses de sol demeurent exorbitants.

Mots clés : modélisation, couleur, Munsell, RVB, appareil photo, fer, carbone organique

1- INTRODUCTION

En Afrique comme dans de nombreux pays tropicaux, la production agricole assure encore une part très importante des revenus de la population. Pourtant, l'insécurité alimentaire persiste encore dans le continent, une situation attribuée essentiellement à l'insuffisance de la production (Sanchez *et al.*, 2003). Dans ces zones, l'agriculture demeure fortement tributaire à la fois du climat et de la fertilité des sols. Caractérisées surtout par un climat chaud et humide, ces zones subissent les actions érosives des pluies qui affectent énormément les propriétés des sols et le rendement des cultures (Ebeid *et al.*, 1995). Face aux contraintes d'accès aux intrants agricoles et aux produits financiers, bon nombre de paysans se limitent à des modes de production excluant l'utilisation de fertilisants recommandés, tel est le cas à Madagascar. Ainsi, le passage vers l'intensification agricole et l'agriculture de précision ne seraient qu'une utopie. L'essentiel de l'amélioration de la production à venir sera basée sur l'intensification agricole des terres déjà cultivées (Lal, 2009) et devra passer avant tout par une meilleure gestion du capital « sol ». Les expertises en analyse de sol demeurent très limitées, notamment en raison de leurs coûts exorbitants et du temps nécessaire. Dans ce sens, d'autres outils ont été développés par les chercheurs afin de contourner ce problème. L'application de la spectrométrie infrarouge en science du sol a beaucoup évolué ces 20 dernières années (1990-2010). La prédiction des propriétés des sols à partir de leurs signatures spectrales dans les proches et moyens infrarouges fait l'objet d'une multitude de recherche en science du sol. Cette technique, très rapide, permet de réaliser un grand nombre d'analyse et une prédiction simultanée de plusieurs propriétés du sol avec une seule acquisition spectrale (Minasny *et al.*, 2009). Cependant, le coût d'acquisition du matériel limite encore son usage pour beaucoup de praticiens (Levin *et al.*, 2005); d'ailleurs les analyses directes aux champs restent limitées aux appareils portables. Certaines recherches ont essayé de développer l'utilisation de la couleur du sol comme outil de prédiction de leurs propriétés. Cette caractéristique constitue généralement un outil très utilisé par les pédologues pour les études du sol (Mathieu *et al.*, 1998), pour la description des profils pédologiques (Scheinost et Schwertmann, 1999) et pour la classification des différents types de sol (Adderley *et al.*, 2002; Barrett, 2002) en utilisant parfois le « terme couleur » comme qualificatif pour nommer un sol (exemple : podzol rouge...) (Coventry et Robinson, 1981b). La couleur a toujours été considérée comme un indicateur pertinent pour les évaluations quantitatives et qualitatives des sols cultivés (Mouazen *et al.*, 2007). Pour certains, la couleur grise (chroma ≤ 2) sert d'indicateur de saturation et des conditions réductrices du sol (Singleton, 1991). La couleur du sol est liée à la teneur en matière organique, au régime hydrique ou l'existence d'un problème de drainage, à la forme et teneur en fer dans les minéraux argileux, à la présence des carbonates (Mathieu *et al.*, 1998; Barrett, 2002; Levin *et al.*, 2005). La couleur d'un objet opaque est liée à ses propriétés de réflectance dans les régions visibles 400-770 nm (Wyszecki et Stiles, 1982). Il est connu depuis longtemps que la couleur du sol reflète la composition et la teneur en oxyde de

fer (Scheinost et Schwertmann, 1999). La couleur rouge est attribuée à l'hématite et le jaune à la goethite (Barron et Torrent, 1984; Fritsch *et al.*, 2005). Ce sont surtout les acides humiques dans les matières organiques qui offrent les gammes de couleur sombres (brune à noire) des sols (Shields *et al.*, 1968). Plusieurs études ont essayé de réaliser des analyses quantitatives des propriétés des sols à partir de leurs couleurs: prédiction de la teneur en fer (ou de l'hématite) à partir des couleurs du sol (Torrent *et al.*, 1983; Levin *et al.*, 2005; Viscarra Rossel *et al.*, 2006a), prédiction de la teneur en carbone du sol (Fernandez *et al.*, 1988; Konen *et al.*, 2003; Viscarra Rossel *et al.*, 2008a). Pour la mesure ou l'évaluation des couleurs du sol, le système de couleur standard Munsell (Munsell Color Company, 2000) reste le plus usité, particulièrement pour la classification des sols. Les premières séries de plaquettes de couleur du code Munsell ont été publiées vers 1940 (Sánchez-Marañón *et al.*, 2005). Avec ce colorimètre, les mesures qualitatives de la couleur du sol sont réalisées par le biais de 3 variables : H (Hue), V (Value) et C (Chroma). D'après Viscarra Rossel *et al.* (2006a), ces variables expriment la perception spatiale de la couleur. La teinte H est représentée par les lettres R (rouge), YR (jaune-rouge) et Y (jaune) précédée des nombres 0 à 10. La teinte devient plus jaune et moins rouge avec l'augmentation du nombre. La valeur V se situe sur une échelle de 0 (noir absolu) à 10 (blanc absolu) et le chroma C entre 0 (gris neutre) et 20. Le système Munsell a plusieurs avantages : système universel, toujours disponible, facile à utiliser notamment pour des études au champ. Son utilisation est basée sur une comparaison visuelle entre les échantillons de sol et les plaquettes de couleurs. Globalement, les conditions de lumière et l'expérience de l'observateur constituent deux facteurs limitant pour l'observation visuelle (Barrett, 2002). De plus, le nombre de plaquettes de couleur disponibles reste limité rendant ainsi la simplification de l'identification des couleurs (Levin *et al.*, 2005; Sánchez-Marañón *et al.*, 2005). Outre le code Munsell et le spectromètre dans les régions visibles (400-770 nm), l'utilisation d'un appareil photo numérique constitue également une autre alternative pour la numérisation et la mesure des couleurs. Cette technique a été utilisée entre autres par Levin *et al.* (2005) et Viscarra Rossel *et al.* (2008a) pour la prédiction de la teneur en fer et en carbone organique du sol. Une couleur donnée peut être obtenue en mélangeant le rouge (R), le vert (V) et le bleu (B) (Coventry et Robinson, 1981b; Coventry et Robinson, 1981a). Les valeurs de ce tristimulus RVB qui varient de 0 (sombre) à 255 (claire) s'obtiennent avec les images via l'appareil photo. Il s'agit donc d'une mesure quantitative de la couleur du sol. L'utilisation d'un appareil photo numérique est une opération simple et rapide. L'outil est de plus en plus accessible et la mesure des couleurs ne se heurte plus à la subjectivité de l'observateur. La réussite de la modélisation des couleurs pour prédire les propriétés du sol résout largement les problèmes liés au coût et au temps alloué aux analyses.

Les sols de Madagascar sont dominés par des sols ferrallitiques et ferrugineux de la classification française des sols (CPCS). En général, ces sols ont une couleur rouge ou jaune ou jaune sur rouge selon la forme du fer et les conditions hydrologiques du sol. Les sols plus sombres contiennent

souvent beaucoup plus de carbone organique (Coventry et Robinson, 1981a; Viscarra Rossel *et al.*, 2008a). Ces deux constituants du sol pourront être modélisés à partir des couleurs du sol.

La présente étude a pour objectifs (i) de caractériser la couleur des différentes groupes de sols de Madagascar avec l'utilisation du système de couleur Munsell et d'un appareil photo numérique, (ii) de développer des modèles de couleur pour prédire la teneur en fer et en carbone organique des sols.

2- MATERIELS ET METHODES

2.1 ZONE D'ETUDE ET ECHANTILLONNAGE

Madagascar se trouve entre 43° et 50° longitude Est et 12° et 25° latitude Sud. Les sols sont dominés par deux classes de sol : les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux de la classification française CPCS. Les échantillons de sol ont été prélevés dans 119 sites à travers l'île, couvrant les transects Est-Ouest et Nord-Sud. Les sites de prélèvement ont été espacés de 20km. Pour la présente étude, la profondeur de prélèvement utilisé est de 0-10, 10-20 et 20-30 cm. Sur les échantillons prélevés, ceux qui correspondent aux sols ferrallitiques et ferrugineux (correspondant à des ferralsols, cambisols, nitisols, arenosols et luvisols de la classification FAO des sols) ont été retenus pour les analyses en laboratoire et la mesure des couleurs.

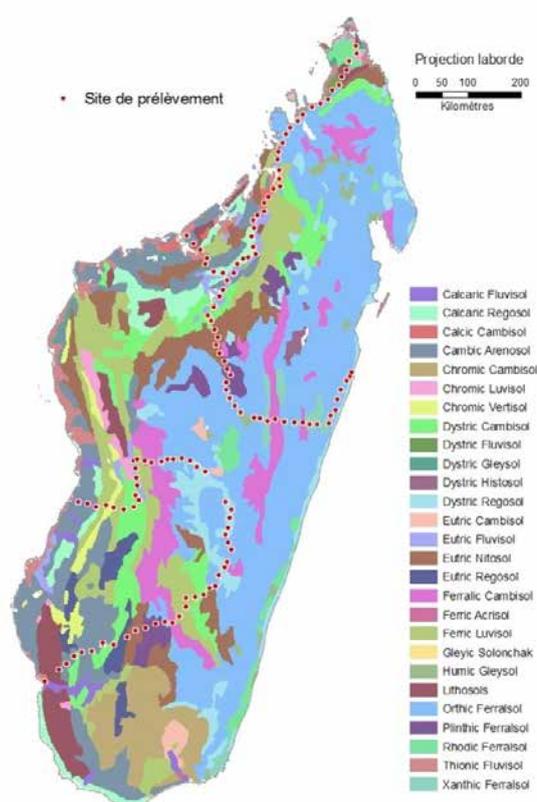


Figure 5-1 : Carte pédologique (FAO, 1974) et localisation des sites de prélèvements

2.2 PREPARATION DES ECHANTILLONS ET ANALYSES EN LABORATOIRE

Après séchage à l'air libre pendant quelques jours, les échantillons ont été broyés et tamisés successivement à 2 mm et à 0,2 mm. Les échantillons ont été divisés en plusieurs lots pour les

analyses du fer et du carbone, pour la mesure des couleurs avec le code Munsell et l'appareil photo numérique.

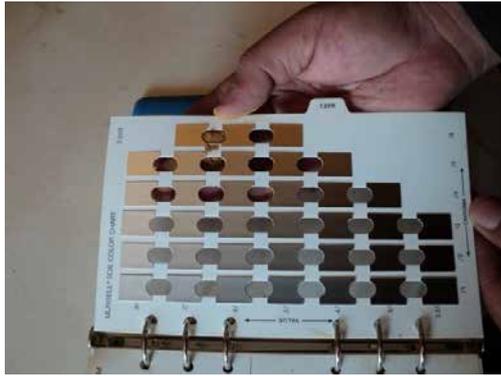
Tableau 5-1: Nombre d'échantillon utilisé par groupe de sol

| Groupe de sol | n |
|---------------|----|
| Ferralsols | 86 |
| Cambisols | 59 |
| Nitisols | 28 |
| Arenosols | 31 |
| Luvissols | 27 |

Le carbone organique (C_{org}) a été analysé avec la méthode conventionnelle de Walkley & Black (1934). L'utilisation du réactif « bichromate de potassium » ($K_2Cr_2O_7$) permet d'oxyder le carbone du sol. Les formes amorphes et cristallisées du fer (Fe_{CBD}) ont été extraites avec le réactif sélectif CBD (citrate-bicarbonate- dithionite) (Mehra et Jackson, 1960b). La concentration en fer a été mesurée avec un spectromètre d'absorption atomique ThermoScientific ICE3000. Tous les résultats sont exprimés en $g.kg^{-1}$ de sol. D'autres analyses ont parallèlement été réalisées pour ces échantillons dans le cadre d'un autre thème de recherche, à savoir les pH_{eau} et pH_{KCl} , la texture, les bases échangeables, la teneur en aluminium,...

2.3 MESURE DES COULEURS

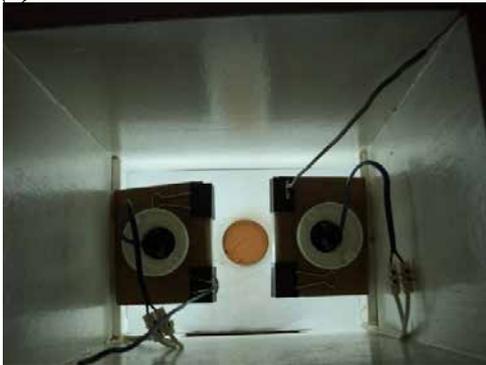
La mesure de la couleur des échantillons a été réalisée en laboratoire avec l'utilisation du code Munsell et d'un appareil photo numérique, à la fois sur des échantillons secs et humides. Les couleurs Munsell sont obtenus en procédant à l'identification sous la lumière du jour. Pour le cas de la numérisation des échantillons avec l'appareil photo, le dispositif a été inspiré et adapté de l'installation et des procédés développés par Levin *et al.* (2005) et par Viscarra Rossel *et al.* (2008a). Il s'agit d'utiliser un appareil photo numérique classique, placé à 50 cm à la verticale au-dessus de l'échantillon. Deux lampes halogènes faisant chacune un angle de 45° et diffusant des lumières sur les échantillons constituent les sources de lumière du dispositif, sans autre source de lumière artificielle provenant de l'appareil photo. L'objectif est d'avoir un dispositif diffusant une lumière blanche homogène pour toutes les prises de photo. Le tout est placé dans une boîte opaque de couleur blanche pour éviter l'effet d'interférence des lumières (Viscarra Rossel *et al.*, 2008a).



(a)



(b)



(c)



(d)

Photo 5-1 : (a) Identification des couleurs avec le Munsell colour chart, (b) dispositif pour la prise des photos, (c) vue d'en haut de l'intérieur du dispositif de prise de photo, (d) exemple d'image non traitée

Les échantillons ont été placés dans des boîtes de Pétri. La surface a été lissée afin d'éviter la présence des microtopographies qui pourraient provoquer des effets d'ombrage, (Levin *et al.*, 2005; Viscarra Rossel *et al.*, 2008a). Pour la prise des photos humides, les échantillons ont été vaporisés avec 3 ml à 5 ml d'eau distillée jusqu'à humectation totale mais sans débordement. Un temps de pose de 30 à 60 mn précède la prise de photo pour permettre une absorption optimale.

2.4 TRAITEMENT DES IMAGES

Les photos ont été transférées pour un traitement numérique sur ordinateur à l'aide du logiciel Adobe Photoshop 7.0. Une zone dénommée « région d'intérêt » (Viscarra Rossel *et al.*, 2008a) a été fixée à 200 x 200 pixels au centre de l'image. Le logiciel exécute un calcul automatique des valeurs du tristimulus RVB de la totalité de la surface de la région d'intérêt préalablement spécifiée. Les valeurs moyennes ont été extraites des informations produites.

2.5 TRANSFORMATION DES COULEURS

La couleur est un phénomène psychophysique tridimensionnel, représentée dans un modèle spatial. Le modèle spatial des couleurs a été largement développé par divers auteurs (ex. Scheinost et Schwertmann, 1999; Viscarra Rossel *et al.*, 2006a). En 1931, la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) a adopté un standard pour la spécification des couleurs (Coventry et Robinson, 1981a). Le système de couleur XYZ a été accepté où Y représente la luminosité, X et Z sont les composantes virtuelles des spectres primaires. Pour éviter le problème de visualisation du tristimulus XYZ, l'espace de couleur en deux dimensions CIE Yxy a été inventé. Les chromaticités x et y sont indépendants de la luminosité Y et qui spécifient la variation des couleurs du bleu au rouge et du bleu au vert. Pour surmonter les problèmes de non-linéarité des XYZ et Yxy, la CIE a proposé en 1964 les systèmes CIE L u*v* et CIE L a*b*. Le paramètre de couleur L représente la luminance (brightness) qui varie de 0 (noir) à 100 (blanc). Les a* et b*, les u* et v* représentent les coordonnées de chromaticité sur des échelles opposant le rouge-vert et le bleu-jaune : +a* et +u* pour le rouge, -a* et -u* pour le vert, +b* et +v* pour le jaune, -b* et -v* pour le bleu. Pour contourner la difficulté avec les coordonnées de chromaticité xy, les coordonnées de chromaticité Helmholtz ont été développées: λ_d pour les longueurs d'onde dominant, P_e pour la pureté d'excitation et Y la luminosité.

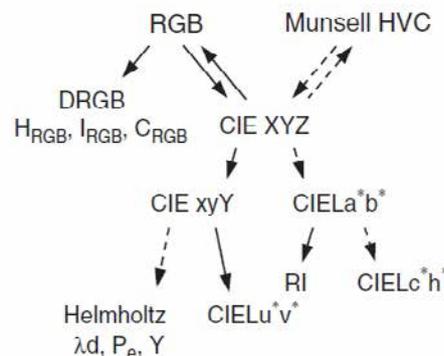


Figure 5-2 : Transformation d'espace couleur (d'après Viscarra Rossel *et al.*, 2006)

La transformation des couleurs vers ces différents systèmes a été effectuée par le biais du logiciel COLOSOL (Viscarra Rossel, 2004). C'est un logiciel conçu à la fois pour la transformation d'un seul tristimulus et la transformation des multiples espaces de couleur dans un fichier texte ASCII (Viscarra Rossel *et al.*, 2006a). Avec Colosol, les couleurs identifiées avec le système Munsell et les valeurs RVB des images de l'appareil photo peuvent être transformées vers les différents systèmes de couleur. Ce logiciel permet également d'obtenir d'autres paramètres de couleur: les coordonnées cylindriques CIE H (hue) et CIE C (chroma) qui permet de faciliter la visualisation, l'indice de rougeur RI (redness index), tous les deux basés sur la CIE L a*b*, les HRVB, IRVB et SRVB qui proviennent de la décorrélation du tristimulus RVB et qui représentent respectivement la teinte (hue), l'intensité lumineuse et les informations chromatiques. Ces

différents paramètres de couleurs ont été utilisés pour les analyses quantitatives du fer et du carbone organique pour la présente étude.

2.6 TEST DE CORRELATION

Après avoir transformé les couleurs « Munsell » et « RVB » vers les différents modèles spatiaux de couleur, une analyse de la corrélation entre ces divers paramètres et les teneurs en fer et en carbone organique a été effectuée par groupe de sol. Le coefficient de corrélation r exprime le degré de liaison qui existe entre ces deux propriétés du sol et chacun des paramètres de couleur.

Afin d'éviter le problème lié à la non normalité de la distribution, qui pourrait être due au mode d'échantillonnage lors des analyses, certaines variables ont été transformées en utilisant le logarithme décimale ou la racine carrée.

2.7 ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE

L'analyse en composante principale (ACP) consiste surtout à rendre les variables étudiées. L'analyse sert à identifier les groupes de variable homogène et d'étudier les corrélations entre les groupes. L'ACP permet également d'analyser qualitativement les relations entre la teneur en fer et en carbone organique avec les variables transformées de couleur. Les ACP ont été réalisées avec les différents modèles spatiaux de couleur issus des couleurs Munsell et RVB à l'état sec et humide. Le logiciel R-Stat a été utilisé pour les analyses statistiques.

2.8 MODELISATION : RELATION ENTRE COULEUR DU SOL ET TENEUR EN FER ET EN CARBONE

Le nombre d'échantillons analysés s'avérait insuffisant pour être divisé en lots de calibration et de validation. Par conséquent, il était préférable pour chaque groupe de sol d'utiliser l'ensemble des échantillons pour l'établissement des modèles et d'effectuer par la suite une validation croisée (cross validation). Une régression univariée a été réalisée pour la modélisation en adoptant une fonction logarithmique ou exponentielle (ex. $C_{org} = f(u^*)$). Le choix du modèle de couleur utilisé pour la régression est basé sur le coefficient de corrélation r . Le modèle de couleur le plus corrélé (proche de -1 ou de 1) à chacun des teneurs en carbone organique et en fer a été retenu. L'évaluation de la robustesse des modèles se base sur deux critères : le coefficient de détermination ajusté (R^2_{aj}) et le RMSE (ou erreur quadratique moyenne) en validation croisée. R^2 est un indicateur qui permet de juger la qualité de la régression (modèle intéressant si R^2 est proche de 1).

3- RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 TENEUR EN C_{ORG} ET EN Fe_{CBD}

La mesure des couleurs et les analyses en laboratoire pour le Fe_{CBD} et le C_{org} ont été réalisées par groupe de sol. Le tableau 5-2 montre les statistiques descriptives de la teneur en Fe_{CBD} et en C_{org} pour les échantillons analysés.

Tableau 5-2 : Statistiques descriptives pour la teneur en C_{org} et en Fe_{CBD}

| Fe_{CBD} (g.kg ⁻¹) | | | | | | |
|----------------------------------|----|---------|---------|-------|-------|--------|
| Tye de sol | n | moyenne | mediane | Sd | Min | Max |
| Ferralsols | 57 | 35,65 | 34,86 | 14,51 | 10,11 | 71,45 |
| Cambisols | 57 | 34,82 | 26,67 | 27,18 | 6,52 | 114,68 |
| Nitisols | 18 | 24,67 | 12,95 | 28,95 | 1,95 | 113,36 |
| Arenosols | 28 | 7,92 | 3,74 | 13,15 | 0,77 | 51,73 |
| Luvisols | 18 | 11,69 | 3,29 | 12,69 | 0,71 | 34,54 |
| C_{org} (g.kg ⁻¹) | | | | | | |
| Tye de sol | n | moyenne | mediane | Sd | Min | Max |
| Ferralsols | 69 | 18,12 | 16,19 | 8,22 | 4,1 | 39,45 |
| Cambisols | 39 | 8,14 | 8,39 | 4,03 | 1,93 | 16,79 |
| Nitisols | 23 | 7,97 | 6,4 | 4,72 | 2,15 | 19,74 |
| Arenosols | 25 | 5,23 | 5,78 | 2,52 | 0,85 | 10,98 |
| Luvisols | 26 | 10,43 | 10,09 | 5,29 | 1,71 | 21,76 |

Pour l'ensemble des échantillons, la teneur en Fe_{CBD} varie de 0,71 à 114,68 g.kg⁻¹. Les teneurs moyennes les plus élevées ont été obtenues avec les cambisols, nitisols et ferralsols avec respectivement 34,82 g.kg⁻¹; 24,67g.kg⁻¹ et 35,65g.kg⁻¹. Ces trois groupes de sol correspondent à des sols ferrallitiques de la classification française des sols. Ces résultats montrent que ces trois groupes de sol ont beaucoup plus de fer « libre » sous forme amorphe et des oxydes bien cristallisés par rapport aux luvisols et arenosols (sols ferrugineux). La richesse en sesquioxydes de fer résulte d'une hydrolyse des minéraux qui reste très poussée pour les sols ferrallitiques par rapport à celle des sols ferrugineux (Eschenbrenner, 1988). Les ferralsols affichent les teneurs les plus importantes en C_{org} avec une moyenne de 18,12 g.kg⁻¹ et une valeur maximale de 39,45 g.kg⁻¹. Ce sont les arenosols qui ont les teneurs les moins élevées avec 0,85 g.kg⁻¹. Ces arenosols qui représentent en grande partie les sols ferrugineux ont une faible teneur en matière organique. Ils subissent en général une minéralisation plus rapide (Eschenbrenner, 1988). Ces types de sol ont des textures sableuses. D'après Feller *et al.* (1991), les stocks organiques des sols sont beaucoup plus déterminés par la texture que par le climat, ces stocks diminuent d'autant plus rapidement que le sol est sableux. En moyenne, ce sont les ferralsols argileux qui ont les teneurs les plus élevées en C_{org} .

3.2 VARIATION DES COULEURS MUNSELL AVANT ET APRES HUMECTATION

Le tableau 5-3 montre un extrait des données de couleurs identifiées avec le code Munsell pour les groupes de sol étudiées. Les échantillons figurant sur le tableau ont été choisis comme représentant les gammes de couleur identifiées à l'état sec et humide.

Tableau 5-3 : Extraits des couleurs Munsell à l'état « secs et humides » pour les 5 groupes de sol étudiées

| Code | Sols | Sec | | | Humide | | |
|-------|------------|-------|---|---|--------|---|---|
| | | H | V | C | H | V | C |
| 2_14 | Ferralsols | 5YR | 6 | 4 | 2,5YR | 5 | 6 |
| 34_23 | Ferralsols | 7,5YR | 4 | 6 | 5YR | 3 | 4 |
| 2_05 | Ferralsols | 10YR | 6 | 4 | 7,5YR | 4 | 4 |
| 4_21 | Ferralsols | 2,5Y | 5 | 4 | 10YR | 5 | 2 |
| 34_20 | Cambisols | 2,5YR | 5 | 8 | 7,5R | 5 | 6 |
| 34_18 | Cambisols | 5YR | 4 | 4 | 2,5YR | 3 | 3 |
| 6_20 | Cambisols | 7,5YR | 7 | 6 | 5YR | 5 | 8 |
| 2_03 | Cambisols | 10YR | 7 | 6 | 7,5YR | 3 | 4 |
| 2_01 | Cambisols | 2,5Y | 5 | 4 | 10YR | 4 | 3 |
| 34_14 | Nitisols | 5YR | 7 | 8 | 2,5YR | 4 | 8 |
| 34_12 | Nitisols | 7,5YR | 8 | 3 | 5YR | 6 | 6 |
| 6_30 | Nitisols | 10YR | 5 | 5 | 7,5YR | 7 | 6 |
| 4_05 | Arenosols | 2,5YR | 5 | 8 | 7,5R | 4 | 6 |
| 34_07 | Arenosols | 7,5YR | 8 | 3 | 5YR | 6 | 8 |
| 34_07 | Arenosols | 10YR | 7 | 3 | 7,5YR | 7 | 4 |
| 34_08 | Luvisols | 5YR | 6 | 6 | 2,5YR | 4 | 8 |
| 34_02 | Luvisols | 7,5YR | 6 | 3 | 5YR | 4 | 3 |
| 34_05 | Luvisols | 10YR | 6 | 4 | 7,5YR | 4 | 3 |

Etant donné que la teinte H devient plus jaune et moins rouge avec l'augmentation du nombre qui précède les lettres R, YR et Y, les ferralsols et les cambisols se distribuent dans les « jaune-rouge » et le « jaune ». A l'état sec, les gammes commencent par des couleurs jaunes (2,5Y), moins jaunes (10YR), et passent graduellement vers le rouge (7,5YR ; 5YR ; 2,5YR). Les nitisols, les luvisols et les arenosols se limitent dans le domaine des jaunes-rouges, la gamme jaune (Y) n'y figure pas. Par analogie à la classification CPCSS des sols, les sols ferrallitiques se répartissent dans le jaune-rouge et le jaune tandis que les sols de transition (nitisols) et les arenosols et luvisols (sols ferrugineux) tirent leurs couleurs dans la gamme des jaunes-rouges. Les oxydes cristallisés (hématites) contribuent à la coloration rouge des sols. L'individualisation des sesquioxydes de fer confère au sol une couleur très accusée comme le rouge, l'ocre ou encore la couleur rouille (Eschenbrenner, 1988). Dans des zones à longue saison de pluie, on assiste à la présence des goethites qui sont responsables de la couleur jaune des sols. Les goethites et hématites coexistent souvent dans le sol mais le pouvoir colorant de l'hématite est largement supérieur (Segalen, 1994). A Madagascar, les ferralsols, cambisols et nitisols (sols ferrallitiques) évoluent en général sous un climat plus humide par rapport aux arenosols et luvisols.

Sachant que l'humectation assombrit d'avantage la couleur des sols (Viscarra Rossel *et al.*, 2008a), il est plus qu'évident que les chiffres qualifiant l'intensité du jaune et du rouge ont diminué. A l'état humide, les chiffres de la teinte H ont diminué d'une unité (2,5). Par conséquent, la couleur la plus proche du rouge dans la gamme « jaune-rouge » (2,5YR) est devenue rouge (7,5R) après humectation, c'est le cas pour les arenosols. Dans la foulée, l'assombrissement des couleurs est aussi exprimé par la diminution de la valeur V. En s'approchant de 10, la couleur tend vers le blanc absolu et inversement elle tend vers le noir absolu à l'approche de 0.

3.3 VARIATION DES COULEURS MESUREES AVEC L'APPAREIL PHOTO NUMERIQUE

La figure 5-4 montre des photos des échantillons de sol numérisés. Ces échantillons représentent les 5 groupes de sol étudiés. La région d'intérêt a été fixée à 200 x 200 pixels. Les valeurs moyennes du tristimulus RVB ont été calculées à partir de ces régions d'intérêt. Visuellement, il a été constaté que la couleur s'assombrit après humectation pour tous les échantillons testés. Cet assombrissement est d'autant plus important que l'échantillon à l'état sec a déjà une teinte assez sombre.

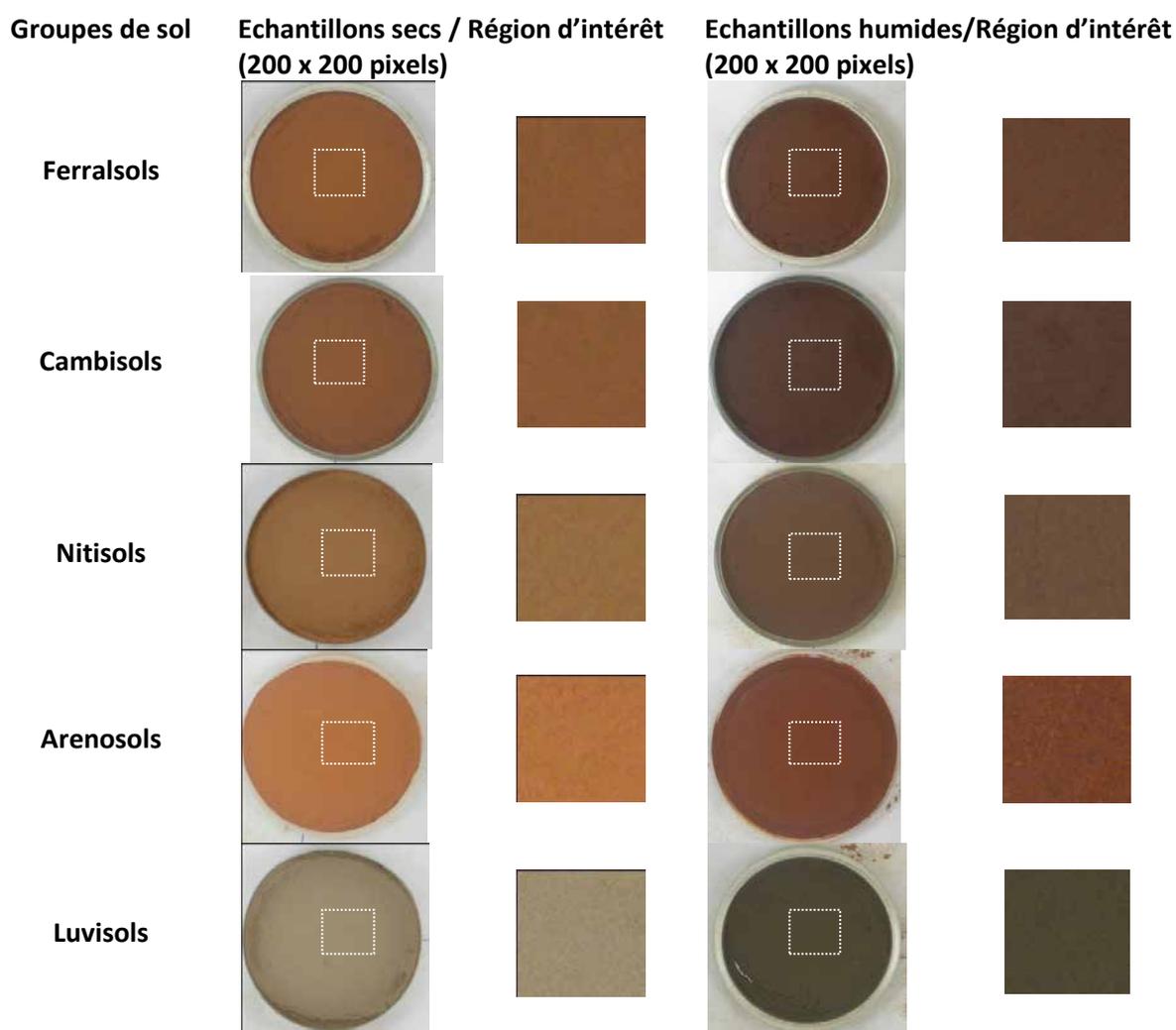


Photo 5-2 : Echantillons secs et humides numérisés (par groupe de sol), région d'intérêt pour l'extraction des valeurs RVB

Les statistiques descriptives des différents modèles d'espace de couleur dans le tableau 5-3 concernent l'ensemble des différents groupes de sol étudiés. La transformation des couleurs RVB a été effectuée sur des échantillons secs et humides.

La gamme de couleur pour chacun des R, V et B diminue significativement après humectation. En moyenne, ce tristimulus est en dessous de 100 pour les échantillons humides. Ces échantillons humides ont des écart-types inférieurs à ceux des échantillons secs, qui suggèrent que les couleurs humides mesurées sont plus précises (Viscarra Rossel *et al.*, 2008a). Par contre, il n'y a pas de différence significative à l'état sec et humide sur les écart-types des chromaticités a^* , b^* , u^* et v^* . Ces modèles de couleur sont donc plus stables malgré la condition d'humectation des échantillons. Cette situation a été détectée également pour les CIE C et CIE H. Pour le cas de l'indice de rougeur (RI), l'écart-type est très élevé pour les échantillons humides. L'humectation

a rendu la couleur plus sombre, ainsi les échantillons sont devenus moins rouges. D'ailleurs, la valeur moyenne de R est passée de 143 à 98 à l'état humide.

Tableau 5-4 : Statistiques descriptives des modèles de couleur

| Variables couleurs | échantillons de sol sec | | | | | échantillons de sol humide | | | | | |
|--------------------|-------------------------|-------|---------|---------|------|----------------------------|-------|---------|---------|------|-----|
| | Min. | Max. | Médiane | Moyenne | Sd | Min. | Max. | Médiane | Moyenne | Sd | |
| R | 94 | 190 | 142 | 143 | 18 | 52 | 150 | 99 | 98,4 | 17 | |
| G | 51 | 162 | 109 | 108 | 21,4 | 26 | 106 | 68 | 68,2 | 14,5 | |
| B | 19 | 132 | 64,5 | 64,9 | 22 | 9 | 95 | 43 | 42,7 | 13,6 | |
| HRGB | - | 21,5 | 3 | 3,8 | 2,8 | - | 12 | 2,5 | 3,3 | 2,6 | |
| IRGB | 60,7 | 157,7 | 106,3 | 105,3 | 17,9 | 37,0 | 104,3 | 69,8 | 69,8 | 12,1 | |
| SRGB | 9,5 | 70,5 | 40,0 | 39,1 | 11,3 | - | 50,5 | 27,5 | 27,8 | 10,1 | |
| X | 6,5 | 35,7 | 18,1 | 18,3 | 5,4 | 2,3 | 18,5 | 7,8 | 7,9 | 2,6 | |
| Y | 5,6 | 37,1 | 17,4 | 17,7 | 5,9 | 2,3 | 17,1 | 7,1 | 7,3 | 2,5 | |
| Z | 1,5 | 27,1 | 7,4 | 8,1 | 4,3 | 0,6 | 11,8 | 3,3 | 3,5 | 1,7 | |
| x | 0,3 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,0 | 0,3 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,0 | |
| y | 0,4 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,0 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,0 | |
| L | 28,4 | 67,3 | 48,7 | 48,3 | 7,4 | 17,0 | 48,4 | 32,0 | 31,8 | 5,6 | |
| a* | - | 9,6 | 28,0 | 7,8 | 8,8 | 7,5 | 4,3 | 28,5 | 9,6 | 9,9 | 7,1 |
| b* | 9,1 | 53,1 | 29,9 | 29,4 | 7,4 | 10,2 | 36,7 | 20,5 | 20,6 | 7,1 | |
| u* | 0,6 | 63,7 | 26,2 | 26,9 | 12,4 | 0,2 | 46,9 | 21,0 | 21,7 | 11,0 | |
| v* | 11,6 | 56,1 | 30,6 | 31,0 | 6,8 | 15,0 | 36,2 | 18,8 | 18,8 | 6,4 | |
| CIE C | 9,3 | 54,4 | 31,7 | 31,3 | 8,5 | 3,9 | 41,1 | 23,2 | 23,6 | 8,1 | |
| CIE H | 0,9 | 1,6 | 1,3 | 1,3 | 0,2 | 0,6 | 1,6 | 1,1 | 1,1 | 0,2 | |
| RI | 0,1 | 10,4 | 0,6 | 1,1 | 1,4 | 6,7 | 137,5 | 5,4 | 11,0 | 19,1 | |
| H | 13,7 | 25,0 | 21,1 | 20,6 | 3,0 | 7,0 | 25,0 | 18,8 | 18,7 | 3,9 | |
| V | 2,7 | 6,6 | 4,7 | 4,7 | 0,7 | 1,6 | 4,7 | 3,1 | 3,1 | 0,6 | |
| C | 1,9 | 8,7 | 5,0 | 5,0 | 1,3 | 1,3 | 7,0 | 3,7 | 3,9 | 1,3 | |
| DW nm | 567,3 | 594,1 | 583,4 | 583,7 | 4,4 | 564,7 | 689,1 | 586,8 | 587,3 | 9,3 | |
| Pe % | 10,2 | 85,7 | 51,5 | 51,0 | 16,2 | 16,0 | 80,3 | 50,1 | 50,4 | 16,7 | |

3.4 CORRELATION ENTRE PROPRIETES DES SOLS ET MODELES DE COULEUR

3.4.1 Corrélation avec les couleurs Munsell

Le tableau 5-5a montre les coefficients de corrélation r entre les transformés des couleurs Munsell et la teneur en fer et en carbone organique. En général, le C_{org} est très faiblement corrélé aux modèles de couleurs Munsell tant à l'état sec qu'humide. A l'état sec, seul le Fe_{CBD} des arenosols ont un r assez élevé avec u^* ($r = 0,70$) et CIE C ($r = 0,70$) (voir tableau 5-5). Les

valeurs de r demeurent en dessous de la valeur absolue de 0,5 pour le carbone organique. A l'état humide, seuls les luvisols ont des valeurs de r supérieures à 0,60 avec le Fe_{CBD} et les arenosols avec le carbone. Cette faible corrélation pourrait être attribuée à l'existence des biais avec le système Munsell. Plusieurs auteurs ont déjà évoqué les limites de ce système. Parmi ces facteurs limitant : l'identification des couleurs est fortement affectée par les propriétés spectrales et la lumière illuminant l'échantillon, l'angle de vue, le statu de l'échantillon (taille, taux d'humidité, texture...), la subjectivité de l'observateur, le nombre limité des plaquettes de couleurs disponibles (Sánchez-Marañón *et al.*, 2005). Globalement, il y a trop de paramètres qui peuvent affecter l'utilisation du code Munsell.

3.4.2 Corrélation avec les couleurs RVB

Les coefficients de corrélation r entre Fe_{CBD} et carbone organique et les modèles de couleurs sont représentés dans le tableau 5-5a et 5-5b. Globalement, le Fe_{CBD} a une forte corrélation avec les couleurs par rapport au carbone organique. Le fer est plutôt corrélé aux modèles des couleurs à l'état sec tandis que le carbone l'est aux couleurs à l'état humide. Pour le cas du Fe_{CBD} , les arenosols affichent des valeurs de coefficient de corrélation r les plus élevées avec les couleurs à l'état sec ($r > 0,80$ pour C, CIE C, b^* ...). Le fer des ferralsols est plutôt corrélé à la couleur bleue (B) et au paramètre Z, ceux des cambisols aux CIE C ($r = 0,50$), C ($r = 0,51$) et u^* ($r = 0,48$), ceux des nitisols à l'indice RI ($r = 0,61$), corrélé négativement à v ($r = -0,60$) et à Z ($r = -0,57$). Les luvisols sont les moins corrélés avec les modèles de couleurs à l'état secs : u^* ($r = 0,43$), x ($r = 0,42$). Pour les échantillons humides, le C_{org} des arenosols sont fortement corrélés avec la couleur rouge R ($r = 0,94$). Toujours avec le C_{org} , les valeurs de r ne sont pas significatives à l'état sec, pourtant elles peuvent aller jusqu'à - 0,78 à l'état humide. Le carbone des ferralsols est négativement corrélé avec le chroma C (humide, $r = -0,64$).

Par rapport aux modèles avec les couleurs Munsell, ceux issus de la transformation des RVB semblent avoir des coefficients de corrélation significativement élevés avec le Fe_{CBD} et le C_{org} . Ces résultats détermineront ainsi le choix des variables pour la modélisation.

Tableau 5-5a : Corrélations entre teneur en C_{org} , en Fe_{CBD} et les modèles de couleurs Munsell

| | Echantillons secs (Munsell) | | | | | | | | | | Echantillons humides (Munsell) | | | | | | | | | |
|-------|-----------------------------|---------------|------------------|---------------|-------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|--------|--------------------------------|---------------|------------------|---------------|-------------------|---------------|-----------------|-------------|-----------------|---------------|
| | Arenosols (n=31) | | Cambisols (n=59) | | Ferralsols (n=86) | | Luvisols (n=27) | | Nitisols (n=27) | | Arenosols (n=31) | | Cambisols (n=59) | | Ferralsols (n=86) | | Luvisols (n=27) | | Nitisols (n=27) | |
| | Fe_{cbd} | Corg | Fe_{cbd} | Corg | Fe_{cbd} | Corg | Fe_{cbd} | Corg | Fe_{cbd} | Corg | Fe_{cbd} | Corg | Fe_{cbd} | Corg | Fe_{cbd} | Corg | Fe_{cbd} | Corg | Fe_{cbd} | Corg |
| X | - 0,34 | - 0,33 | - 0,19 | 0,10 | - 0,10 | - 0,39 | 0,40 | - 0,53 | - 0,50 | - 0,36 | - 0,24 | - 0,33 | - 0,15 | 0,14 | 0,02 | - 0,33 | 0,47 | - 0,12 | - 0,42 | - 0,47 |
| Y | - 0,51 | - 0,18 | - 0,27 | 0,20 | - 0,21 | - 0,37 | 0,13 | - 0,49 | - 0,48 | - 0,32 | - 0,32 | - 0,25 | - 0,25 | 0,19 | - 0,06 | - 0,30 | 0,60 | - 0,07 | - 0,38 | - 0,41 |
| Z | - 0,37 | - 0,38 | - 0,19 | 0,00 | - 0,12 | - 0,31 | 0,09 | - 0,32 | - 0,45 | - 0,32 | - 0,36 | - 0,08 | - 0,14 | 0,22 | - 0,05 | - 0,12 | - 0,05 | - 0,11 | - 0,46 | - 0,40 |
| x | 0,65 | - 0,11 | 0,35 | - 0,11 | 0,30 | - 0,03 | 0,40 | - 0,15 | 0,41 | 0,29 | 0,48 | - 0,61 | 0,23 | - 0,31 | 0,35 | - 0,36 | 0,27 | - 0,05 | - 0,02 | - 0,43 |
| y | - 0,39 | 0,49 | - 0,16 | 0,35 | - 0,10 | 0,11 | - 0,19 | - 0,16 | 0,12 | 0,29 | - 0,23 | 0,02 | - 0,24 | 0,05 | - 0,09 | - 0,13 | 0,51 | 0,01 | 0,00 | - 0,06 |
| L | - 0,53 | - 0,12 | - 0,29 | 0,25 | - 0,18 | - 0,32 | 0,14 | - 0,50 | - 0,55 | - 0,30 | - 0,30 | - 0,26 | - 0,27 | 0,23 | - 0,02 | - 0,30 | 0,58 | - 0,14 | - 0,44 | - 0,44 |
| a* | 0,69 | - 0,48 | 0,35 | - 0,41 | 0,32 | - 0,20 | 0,43 | - 0,03 | - 0,02 | - 0,27 | 0,44 | - 0,45 | 0,32 | - 0,19 | 0,32 | - 0,17 | - 0,13 | - 0,12 | - 0,22 | - 0,39 |
| b* | - 0,17 | 0,42 | - 0,07 | 0,29 | - 0,02 | 0,04 | 0,01 | - 0,22 | 0,09 | 0,20 | 0,04 | - 0,34 | - 0,14 | - 0,05 | 0,04 | - 0,27 | 0,64 | - 0,01 | - 0,03 | - 0,16 |
| u* | 0,70 | - 0,40 | 0,41 | - 0,37 | 0,36 | - 0,25 | 0,48 | - 0,10 | - 0,06 | - 0,19 | 0,45 | - 0,59 | 0,26 | - 0,21 | 0,38 | - 0,34 | 0,13 | - 0,16 | - 0,32 | - 0,55 |
| v* | - 0,33 | 0,49 | - 0,13 | 0,32 | - 0,09 | 0,05 | - 0,07 | - 0,18 | 0,05 | 0,18 | - 0,07 | - 0,24 | - 0,22 | 0,01 | - 0,03 | - 0,22 | 0,65 | 0,03 | - 0,01 | - 0,09 |
| R | - 0,07 | - 0,40 | - 0,10 | 0,05 | 0,02 | - 0,38 | 0,55 | - 0,46 | - 0,57 | - 0,36 | 0,01 | - 0,49 | - 0,08 | 0,08 | 0,18 | - 0,35 | 0,33 | - 0,08 | - 0,45 | - 0,53 |
| G | - 0,67 | 0,04 | - 0,36 | 0,32 | - 0,29 | - 0,24 | - 0,12 | - 0,35 | - 0,51 | - 0,25 | - 0,42 | - 0,10 | - 0,37 | 0,28 | - 0,14 | - 0,22 | 0,67 | - 0,05 | - 0,37 | - 0,32 |
| B | - 0,33 | - 0,34 | - 0,19 | - 0,02 | - 0,11 | - 0,26 | 0,11 | - 0,24 | - 0,49 | - 0,36 | - 0,34 | - 0,07 | - 0,14 | 0,25 | - 0,05 | - 0,02 | - 0,11 | - 0,11 | - 0,50 | - 0,41 |
| HRGB | - 0,62 | 0,50 | - 0,28 | 0,40 | - 0,23 | 0,17 | - 0,40 | - 0,00 | 0,08 | 0,27 | - 0,36 | 0,35 | - 0,29 | 0,13 | - 0,25 | 0,06 | 0,28 | 0,09 | 0,19 | 0,29 |
| IRGB | - 0,42 | - 0,25 | - 0,26 | 0,14 | - 0,13 | - 0,34 | 0,26 | - 0,49 | - 0,56 | - 0,34 | - 0,25 | - 0,28 | - 0,22 | 0,23 | 0,03 | - 0,27 | 0,37 | - 0,10 | - 0,48 | - 0,47 |
| SRGB | 0,42 | - 0,02 | 0,14 | 0,09 | 0,19 | - 0,13 | 0,44 | - 0,24 | 0,01 | 0,07 | 0,32 | - 0,61 | 0,06 | - 0,18 | 0,25 | - 0,40 | 0,42 | - 0,03 | - 0,21 | - 0,44 |
| RI | - 0,23 | 0,23 | 0,02 | 0,25 | 0,04 | - 0,07 | - 0,25 | - 0,01 | 0,02 | 0,19 | - 0,23 | - 0,07 | - 0,26 | 0,11 | - 0,06 | - 0,01 | - 0,15 | 0,46 | - 0,12 | - 0,47 |
| CIE C | 0,70 | - 0,32 | 0,39 | - 0,25 | 0,42 | - 0,21 | 0,45 | - 0,13 | 0,02 | - 0,09 | 0,52 | - 0,58 | 0,34 | - 0,32 | 0,30 | - 0,35 | 0,39 | - 0,33 | - 0,27 | - 0,54 |
| CIE H | - 0,47 | 0,57 | - 0,14 | 0,36 | - 0,15 | 0,11 | - 0,21 | - 0,10 | 0,15 | 0,29 | - 0,09 | - 0,31 | - 0,26 | 0,08 | - 0,04 | - 0,13 | 0,46 | - 0,04 | 0,01 | - 0,03 |
| DW nm | 0,27 | - 0,53 | 0,05 | - 0,30 | 0,18 | - 0,13 | - 0,11 | - 0,02 | - 0,25 | - 0,32 | - 0,19 | 0,60 | 0,18 | - 0,10 | - 0,06 | 0,18 | - 0,07 | - 0,14 | - 0,15 | 0,20 |
| Pe % | 0,56 | 0,02 | 0,29 | - 0,03 | 0,23 | 0,00 | 0,32 | - 0,15 | 0,35 | 0,27 | 0,54 | - 0,62 | 0,27 | - 0,37 | 0,26 | - 0,33 | 0,43 | - 0,21 | - 0,07 | - 0,40 |

En gras, valeurs significatives au seuil alpha = 0,05

Tableau 5-5b: Corrélations entre teneur en C_{org}, en Fe_{CBD} et les modèles de couleurs RVB

| | Echantillons secs (RVB) | | | | | | | | | | Echantillons humides (RVB) | | | | | | | | | |
|-------|-------------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|--------|-------------------|--------|----------------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
| | Arenosols (n=31) | | Cambisols (n=59) | | Ferralsols (n=86) | | Luvisols (n=27) | | Nitissols (n=27) | | Arenosols (n=31) | | Cambisols (n=59) | | Ferralsols (n=86) | | Luvisols (n=27) | | Nitissols (n=27) | |
| | Fe _{cbd} | Corg | Fe _{cbd} | Corg | Fe _{cbd} | Corg | Fe _{cbd} | Corg | Fe _{cbd} | Corg | Fe _{cbd} | Corg | Fe _{cbd} | Corg | Fe _{cbd} | Corg | Fe _{cbd} | Corg | Fe _{cbd} | Corg |
| R | 0,39 | - 0,11 | 0,08 | 0,22 | - 0,27 | 0,13 | 0,17 | - 0,15 | - 0,59 | - 0,16 | - 0,37 | 0,20 | 0,16 | - 0,04 | 0,17 | - 0,36 | 0,58 | - 0,32 | - 0,43 | - 0,27 |
| G | - 0,34 | 0,25 | - 0,30 | 0,44 | - 0,49 | 0,26 | - 0,21 | - 0,03 | - 0,58 | - 0,14 | - 0,27 | 0,46 | - 0,18 | 0,41 | - 0,16 | 0,13 | 0,35 | 0,29 | - 0,38 | - 0,01 |
| B | - 0,58 | 0,33 | - 0,41 | 0,46 | - 0,52 | 0,29 | - 0,33 | 0,17 | - 0,58 | - 0,19 | - 0,28 | 0,94 | - 0,07 | 0,46 | - 0,17 | 0,44 | - 0,05 | 0,66 | - 0,21 | 0,28 |
| HRGB | - 0,16 | - 0,10 | - 0,07 | - 0,10 | - 0,15 | 0,04 | - 0,16 | - 0,08 | - 0,13 | - 0,18 | 0,65 | - 0,43 | 0,28 | - 0,58 | 0,00 | - 0,31 | - 0,02 | - 0,30 | - 0,09 | - 0,27 |
| IRGB | - 0,25 | 0,20 | - 0,26 | 0,43 | - 0,49 | 0,26 | - 0,17 | 0,00 | - 0,61 | - 0,17 | - 0,09 | 0,05 | - 0,04 | 0,33 | - 0,04 | 0,04 | 0,42 | 0,26 | - 0,42 | - 0,05 |
| SRGB | 0,83 | - 0,39 | 0,49 | - 0,28 | 0,29 | - 0,18 | 0,34 | - 0,22 | 0,06 | 0,06 | 0,47 | - 0,70 | 0,20 | - 0,41 | 0,25 | - 0,59 | 0,42 | - 0,62 | - 0,31 | - 0,44 |
| X | 0,02 | 0,06 | - 0,12 | 0,36 | - 0,41 | 0,21 | - 0,03 | - 0,07 | - 0,60 | - 0,20 | 0,05 | - 0,19 | 0,03 | 0,18 | 0,04 | - 0,17 | 0,61 | - 0,09 | - 0,44 | - 0,21 |
| Y | - 0,17 | 0,15 | - 0,23 | 0,41 | - 0,46 | 0,23 | - 0,13 | - 0,06 | - 0,59 | - 0,18 | - 0,16 | - 0,01 | - 0,09 | 0,32 | - 0,05 | - 0,04 | 0,56 | 0,08 | - 0,42 | - 0,13 |
| Z | - 0,53 | 0,28 | - 0,38 | 0,45 | - 0,52 | 0,27 | - 0,35 | 0,12 | - 0,57 | - 0,23 | - 0,29 | 0,40 | - 0,09 | 0,47 | - 0,16 | 0,34 | 0,03 | 0,59 | - 0,31 | 0,19 |
| x | 0,77 | - 0,42 | 0,47 | - 0,44 | 0,46 | - 0,29 | 0,42 | - 0,25 | 0,44 | 0,09 | 0,55 | - 0,67 | 0,24 | - 0,51 | 0,32 | - 0,61 | 0,32 | - 0,65 | - 0,11 | - 0,41 |
| y | 0,57 | - 0,29 | 0,09 | 0,03 | 0,21 | - 0,11 | 0,21 | - 0,28 | - 0,01 | 0,24 | - 0,28 | - 0,35 | - 0,27 | 0,12 | - 0,07 | - 0,23 | 0,20 | - 0,78 | - 0,18 | - 0,16 |
| L | - 0,16 | 0,17 | - 0,23 | 0,42 | - 0,46 | 0,24 | - 0,11 | - 0,07 | - 0,60 | - 0,15 | - 0,14 | - 0,01 | - 0,09 | 0,32 | - 0,05 | - 0,04 | 0,53 | 0,06 | - 0,43 | - 0,11 |
| a* | 0,77 | - 0,40 | 0,44 | - 0,38 | 0,39 | - 0,24 | 0,40 | - 0,10 | 0,32 | 0,03 | 0,72 | - 0,59 | 0,36 | - 0,47 | 0,38 | - 0,53 | 0,37 | - 0,44 | - 0,08 | - 0,32 |
| b* | 0,83 | - 0,39 | 0,46 | - 0,23 | 0,24 | - 0,15 | 0,28 | - 0,23 | - 0,00 | 0,11 | 0,26 | - 0,69 | 0,00 | - 0,25 | 0,16 | - 0,53 | 0,39 | - 0,71 | - 0,33 | - 0,42 |
| u* | 0,81 | - 0,40 | 0,48 | - 0,36 | 0,36 | - 0,23 | 0,43 | - 0,17 | 0,22 | 0,02 | 0,66 | - 0,65 | 0,34 | - 0,47 | 0,35 | - 0,59 | 0,41 | - 0,51 | - 0,21 | - 0,40 |
| v* | 0,78 | - 0,33 | 0,17 | 0,08 | 0,03 | - 0,03 | 0,23 | - 0,23 | - 0,40 | 0,01 | 0,08 | - 0,60 | - 0,12 | 0,01 | 0,07 | - 0,38 | 0,45 | - 0,70 | - 0,37 | - 0,31 |
| CIE C | 0,84 | - 0,41 | 0,50 | - 0,34 | 0,29 | - 0,20 | 0,30 | - 0,23 | 0,14 | 0,07 | 0,47 | - 0,73 | 0,19 | - 0,48 | 0,23 | - 0,62 | 0,39 | - 0,67 | - 0,31 | - 0,48 |
| CIE H | - 0,68 | 0,33 | - 0,38 | 0,44 | - 0,36 | 0,19 | - 0,26 | 0,13 | - 0,38 | - 0,05 | - 0,77 | 0,51 | - 0,40 | 0,48 | - 0,35 | 0,39 | - 0,22 | 0,20 | - 0,10 | 0,04 |
| RI | 0,12 | - 0,20 | 0,17 | - 0,35 | 0,39 | - 0,24 | 0,02 | 0,07 | 0,61 | - 0,03 | 0,11 | - 0,11 | 0,12 | - 0,30 | 0,04 | - 0,09 | - 0,40 | 0,01 | 0,33 | - 0,02 |
| H | - 0,56 | 0,36 | - 0,40 | 0,55 | - 0,23 | 0,22 | - 0,18 | - 0,05 | - 0,36 | - 0,06 | - 0,67 | 0,33 | - 0,39 | 0,54 | - 0,24 | 0,39 | - 0,18 | 0,02 | 0,02 | 0,13 |
| V | - 0,16 | 0,17 | - 0,23 | 0,42 | - 0,46 | 0,24 | - 0,11 | - 0,07 | - 0,60 | - 0,15 | - 0,14 | - 0,01 | - 0,09 | 0,32 | - 0,05 | - 0,04 | 0,53 | 0,06 | - 0,43 | - 0,11 |
| C | 0,85 | - 0,43 | 0,51 | - 0,39 | 0,30 | - 0,22 | 0,30 | - 0,22 | 0,17 | 0,04 | 0,55 | - 0,73 | 0,22 | - 0,51 | 0,25 | - 0,64 | 0,39 | - 0,65 | - 0,30 | - 0,49 |
| DW nm | 0,52 | - 0,33 | 0,38 | - 0,39 | 0,37 | - 0,18 | 0,30 | - 0,14 | 0,36 | 0,00 | 0,69 | - 0,54 | 0,42 | - 0,50 | 0,08 | - 0,08 | 0,17 | - 0,02 | 0,01 | - 0,14 |
| Pe % | 0,74 | - 0,40 | 0,50 | - 0,43 | 0,46 | - 0,28 | 0,35 | - 0,27 | 0,50 | 0,17 | 0,39 | - 0,67 | 0,12 | - 0,49 | 0,24 | - 0,60 | 0,29 | - 0,71 | - 0,13 | - 0,43 |

3.5 ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE

Les ACP ont été réalisées avec les variables issues de la transformation des couleurs Munsell et RVB, à l'état sec et humide. La figure 5-3 montre le pourcentage des informations expliquées par les axes principaux (ou PC).

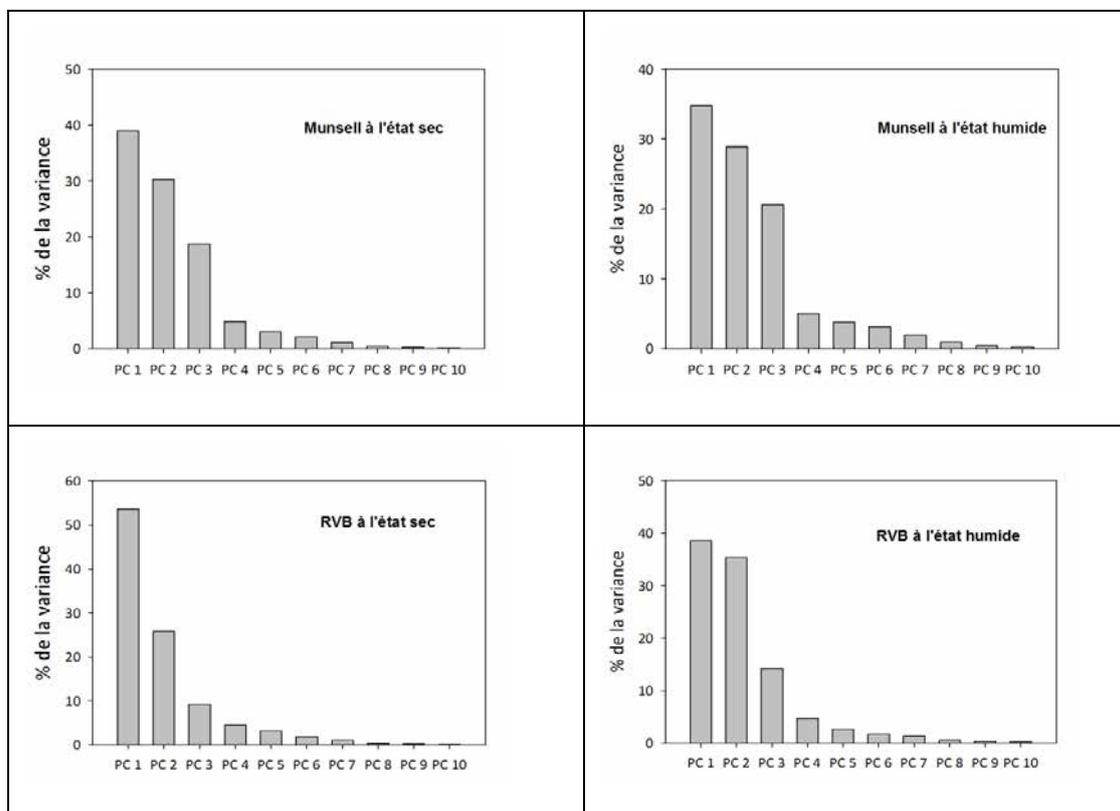
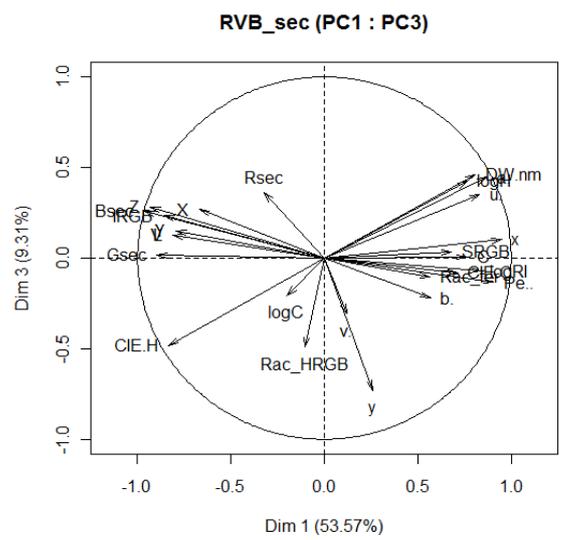
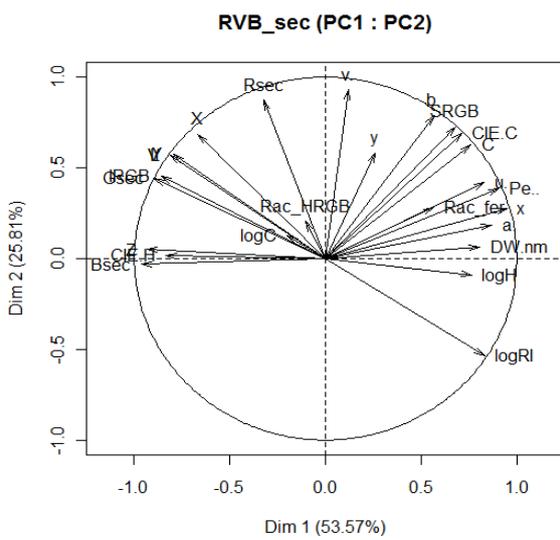
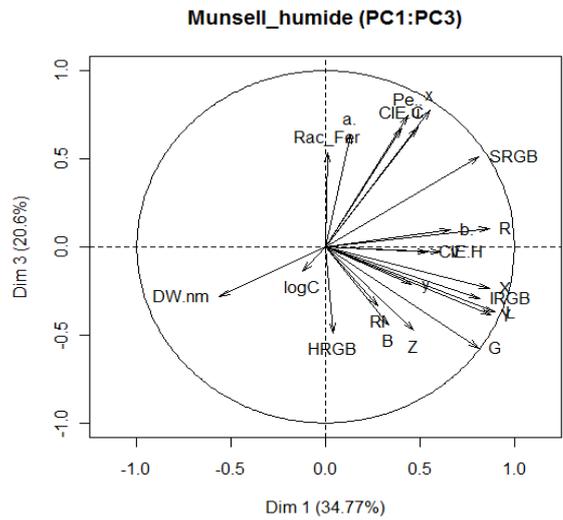
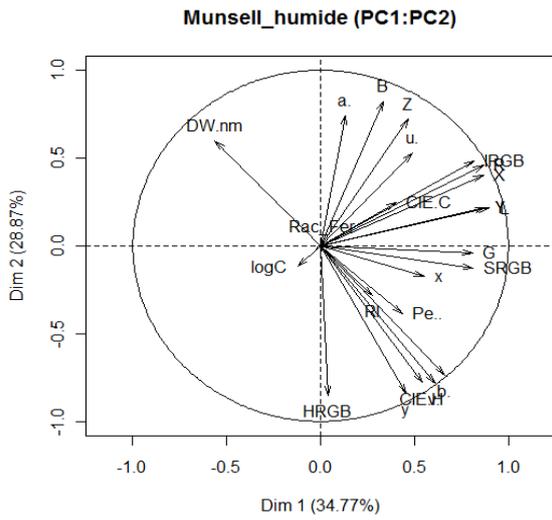
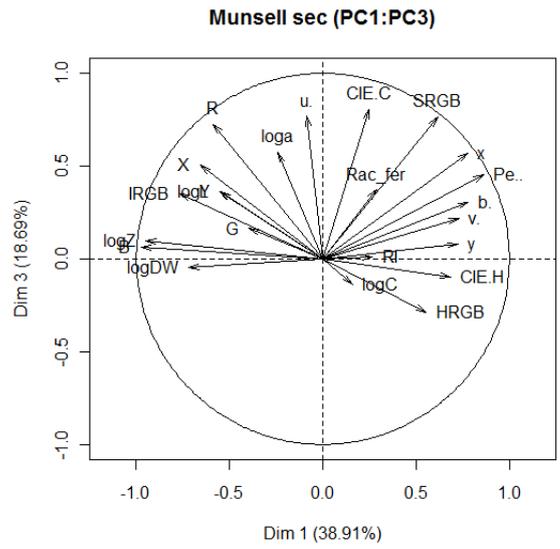
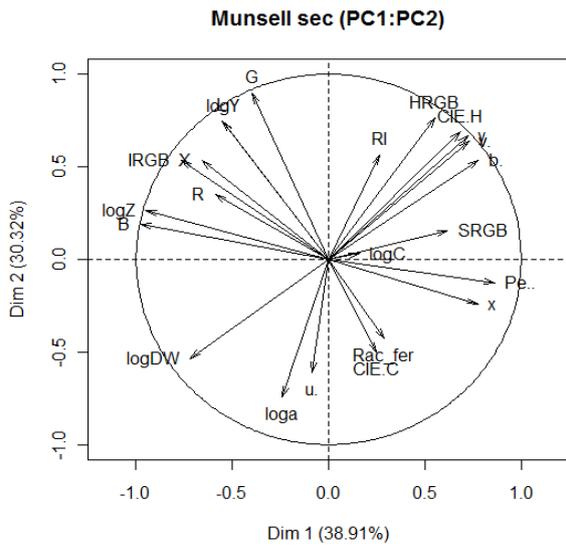


Figure 5-3 : Variation du pourcentage des variables expliquées par les PC

Les trois premiers axes (PC) contribuent largement à l'explication des informations obtenues : près de 88% pour le cas des couleurs Munsell à l'état sec, 85% pour les couleurs Munsell à l'état humide, 89% pour les RVB à l'état sec et 88% pour les RVB à l'état humide. Ainsi, nous nous limiterons les analyses sur ces trois premiers axes.



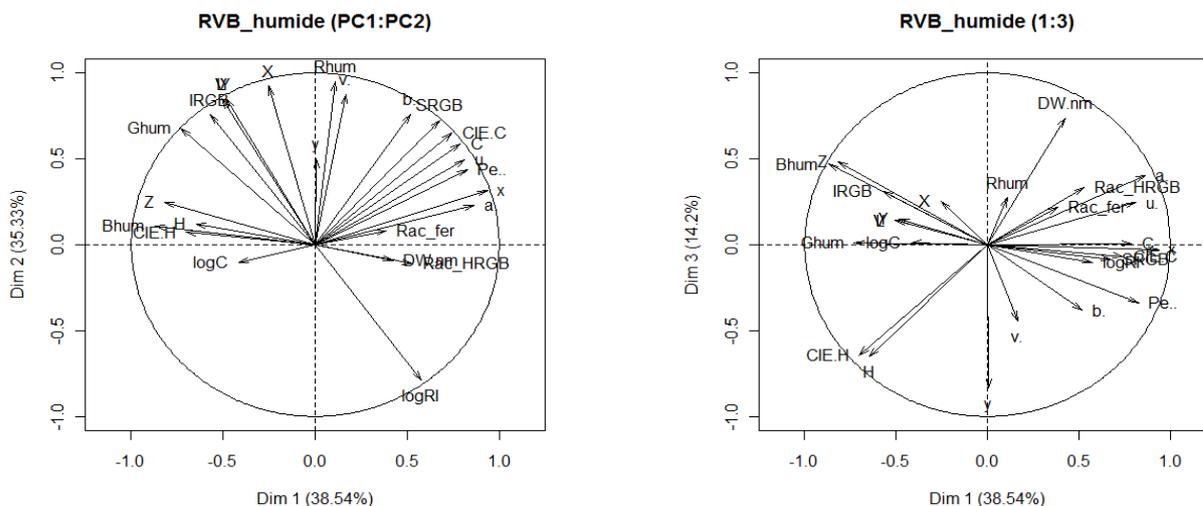


Figure 5-4 : ACP des modèles spatiaux de couleur et la teneur en fer et en carbone

Les ACP sur les 3 premiers axes sont représentés sur la figure 5-4. Pour l'ensemble, le fer (Rac_fer) est corrélé à d'autres variables de couleurs tandis qu'aucun groupe homogène n'est détecté avec le carbone (logC). Ces résultats sont conformes à ceux trouvés lors des tests de corrélation qui relataient une très faible corrélation avec la teneur en carbone organique et une assez forte corrélation avec la teneur en fer.

Pour l'ACP des couleurs Munsell à l'état sec, l'axe PC1 explique une très forte corrélation et un regroupement des variables HRGB, CIE H, v, y, b, SRGB, Pe, x en positif, et logZ, B, R, IRGB, X et logDW en négatif. Le fer, malgré une assez faible corrélation avec la PC, forme un groupe homogène avec CIE C, u* et loga*. Ainsi, la teneur en fer est plutôt corrélée positivement à la chromaticité et négativement à la couleur vert (G) et à logY. A l'état humide, les transformés de couleurs Munsell se répartissent essentiellement sur PC1 positif et sur PC2. Le fer est intégré dans un même groupe que les chromaticités a*, x, CIE C et la pureté d'excitation Pe. Ce groupe est expliqué par PC3 en positif.

Pour le cas des couleurs RVB, le fer est expliqué par la PC1, dans le même groupe que les chromaticités a*, x, u*, C, CIE C et les autres variables (Pe, SRGB, DW). La teneur en fer est corrélée négativement au groupe formé par les variables B, CIE H, G, Z, IRGB. Une faible corrélation a été détectée entre le carbone logC et les variables B, G, CIE H et Z pour les transformés de couleurs RVB à l'état humide.

Ces résultats des ACP, combinés aux résultats des tests de corrélation, sont nécessaires sur le choix des variables à utiliser pour la construction des modèles de prédiction de la teneur en fer et en carbone organique.

3.6 MODELES ENTRE Fe_{CBD} ET C_{ORG} ET PARAMETRES COULEURS

La modélisation entre les divers modèles de couleur et les teneurs en fer et en carbone a été effectuée par groupe de sol. Le choix des variables pour les régressions a été essentiellement basé sur l'analyse de la matrice de corrélation (tableau 5-5a et 5-5b) et les résultats des ACP. Après avoir essayé de réaliser des régressions sur les modèles de couleur issus des couleurs Munsell et des valeurs RVB des images, il a été constaté que les modèles avec les couleurs RVB étaient plus intéressants. L'évaluation a été effectuée selon les deux critères RMSE et R^2_{aj} . D'ailleurs ces résultats confirment les faibles corrélations entre ces deux propriétés des sols et les couleurs Munsell. Sur les figures 5-5 et 5-6, tous les groupes de sol ont été projetés sur un même graphe afin de visualiser la répartition de la variable du modèle pour les autres groupes de sol.

3.6.1 Relations entre teneur en Fe_{CBD} et modèles de couleurs à l'état sec (RVB)

La figure 5-5 montre les modèles les plus pertinents pour le Fe_{CBD} par groupe de sol. Le meilleur modèle a été obtenu avec la régression entre la variable CIE C et les arenosols. Le coefficient de détermination ajusté R^2_{aj} est de 0,95 et l'erreur RMSE le plus faible de l'ordre de 2,88‰. Ce résultat est conforme à la matrice de corrélation (tableau 5-5b) : ce sont les arenosols qui ont des coefficients de corrélation r les plus élevés. Les luvisols affichent un R^2_{aj} de 0,86 et un RMSE de 4,82‰ avec la chromaticité x . Malgré un R^2_{aj} de 0,78 ; le RMSE de 13,64‰ des nitisols reste élevé par rapport à celui des luvisols et arenosols. C'est le cas aussi pour les ferralsols avec la couleur bleue (B) qui a une RMSE de 8‰. Rappelons que, outre R^2 , l'erreur RMSE est un indicateur très pertinent et devrait toujours être considéré pour l'évaluation d'un modèle. Elle permet d'évaluer les erreurs sur les valeurs prédites par rapport à celles mesurées en laboratoire. Le RMSE le plus élevé a été obtenu avec la régression entre les coordonnées de chromaticité CIE u^* et les cambisols. Des échantillons sont mal répartis et s'éloignent de l'axe de régression d'où un R^2_{aj} de 0,40. Il est donc aisé d'avancer que la modélisation des couleurs pour prédire le Fe_{CBD} peut très bien être réalisée avec les deux groupes de sol : arenosols et luvisols. Rappelons que ces deux types de sol font partie des sols ferrugineux de la classification CPC. D'après Segalen (1994), les conditions de pédogénèse des sols ferrugineux favorisent la séparation des sesquioxydes des argiles et leur migration. L'individualisation des sesquioxydes de fer confère la couleur rouge des sols (Eschenbrenner, 1988). Après, ces oxydes de fer libre s'associent au quartz sous formes de couche mince, donnant le chroma C rougeâtre de la matrice et de sa stabilité (Ben-Dor et Singer, 1987; Levin *et al.*, 2005). Ce comportement du fer explique ainsi l'obtention des meilleurs modèles avec le chroma CIE C et la chromaticité x de ces deux sols à texture sableuse.

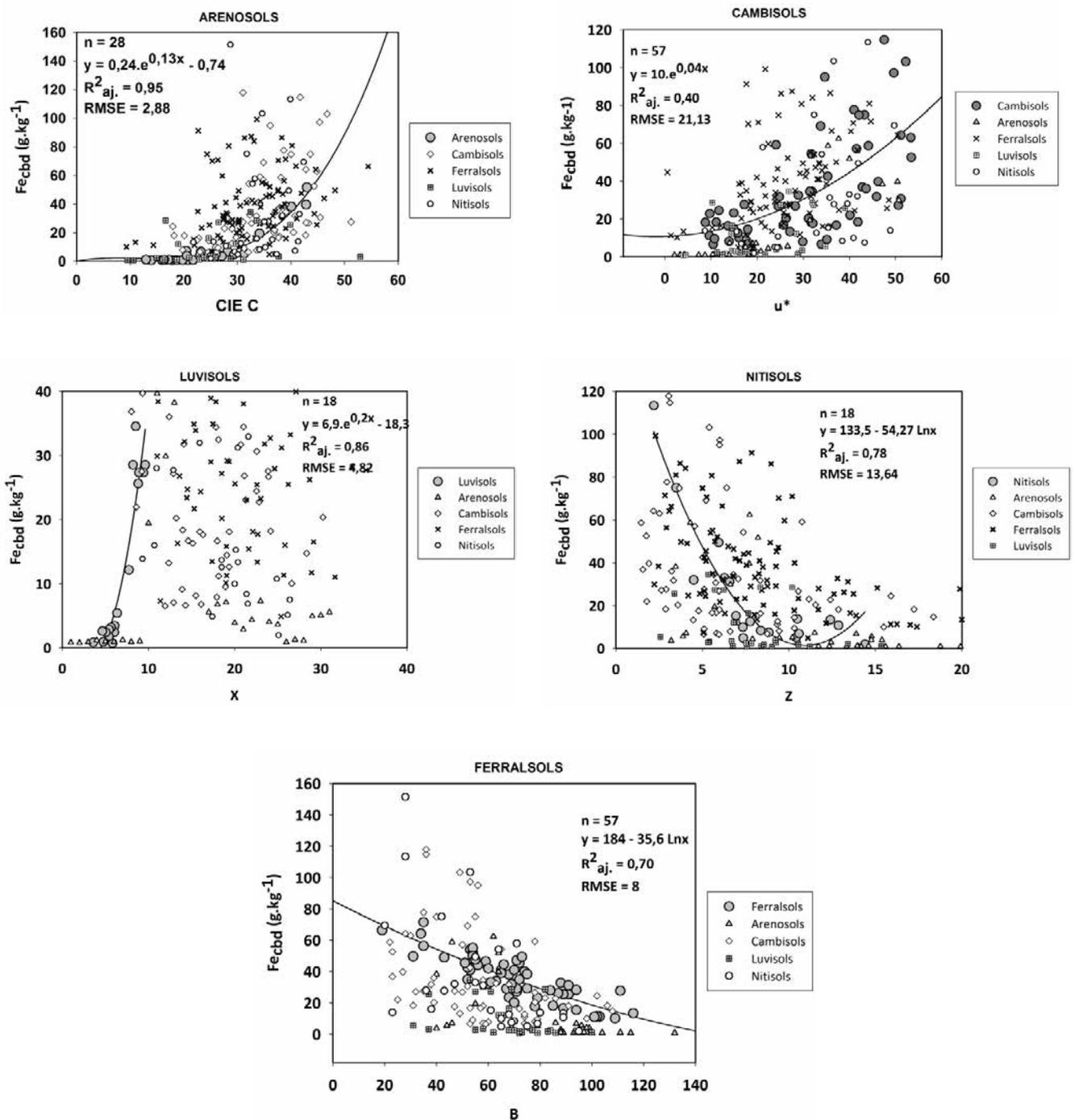


Figure 5-5 : Modèles pour la teneur en Fe_{CBD} à partir des paramètres de modèles de couleurs (RVB)

Les résultats publiés dans la littérature ne sont pas en contradiction avec ceux dont nous avons trouvé dans la présente étude. Levin *et al.* (2005) ont trouvé un R^2 de 0,89 entre la teneur en Fe_{CBD} et l'indice de rougeur RI des sols de type sableux. En calibration, Viscarra Rossel *et al.* (2008a) ont mentionné un $R^2_{aj.}$ de 0,70 et un RMSE de 0,5% pour la teneur en

fer en fonction de la RI. Ces deux résultats ont été obtenus avec l'utilisation d'un appareil photo numérique. Malgré le peu d'études qui ont été réalisées sur la prédiction de la teneur en fer à partir des couleurs des sols, cette comparaison semble confirmer la possibilité de modéliser la teneur en fer des sols à partir des différents modèles de couleurs issus de la RVB.

3.6.2 Relations entre teneur en C_{org} et modèles de couleurs à l'état humides (RVB)

Etant donné que les modèles de couleur sont moins corrélés à la teneur en carbone organique, les coefficients de détermination ajusté $R^2_{aj.}$ demeurent en dessous de 0,72 pour les 5 groupes de sol. Les valeurs du RMSE demeurent en dessous de 5%. Pourtant, ces RMSE ne sont pas comparables avec celles des Fe_{CBD} . Les gammes ne sont pas les mêmes entre le carbone et le fer. La teneur moyenne maximale en Fe_{CBD} est de $35,65g.kg^{-1}$, alors qu'elle est de l'ordre de $18,12g.kg^{-1}$ pour le C_{org} (voir tableau 5-2). Ainsi, une erreur de $5g.kg^{-1}$ pour la teneur en C_{org} pourra affecter de manière significative les résultats de la prédiction. Similaire au modèle sur la teneur en Fe_{CBD} , les arenosols et le chroma C affichent les meilleurs résultats avec un $R^2_{aj.}$ de 0,72 et une RMSE de 1,34%. La teneur en C_{org} peut être prédite également à partir du chroma C pour les nitisols avec une RMSE de 2,96%. La régression des chromatocité u^* avec la teneur en C_{org} des ferralsols affichent la RMSE la plus élevée avec 4,88%. Les modèles ne sont pas très robustes pour les cambisols (RMSE de 2,74% et $R^2_{aj.}$ de 0,54) avec la H décorrélé des RVB et pour les luvisols (RMSE de 3,39% et $R^2_{aj.}$ de 0,59) avec la chromatocité γ . Pour l'ensemble, la teneur en C_{org} est inversement proportionnelle aux paramètres de couleur: le carbone diminue avec l'augmentation des variables couleurs.

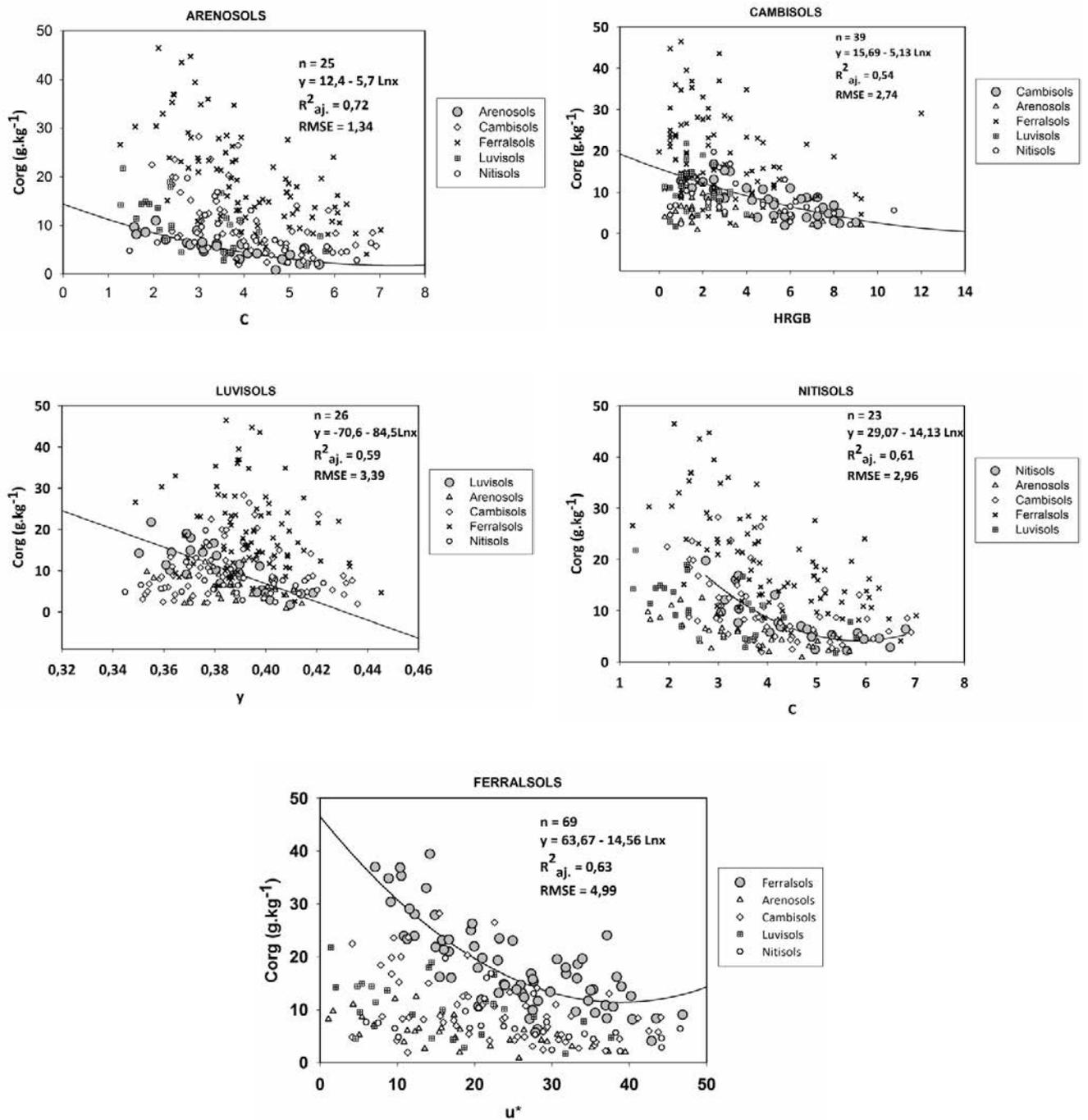


Figure 5-6 : Modèles pour la teneur en C_{org} à partir des paramètres de modèle de couleur (RVB)

Dans la littérature, Shields *et al.* (1968) ont déjà avancé l'existence d'une relation qui suit une fonction logarithmique entre la teneur en C_{org} et la valeur V du système Munsell. Utilisant la couleur Munsell, Schulze *et al.* (1993) ont trouvé un faible R² (0,31) avec le paramètre V, Konen *et al.* (2003) ont trouvé des R² entre 0,68 et 0,77 avec le chroma C et la valeur V des échantillons humides. Viscarra Rossel *et al.* (2006a) ont utilisé différents paramètres pour modéliser la teneur

en C_{org} des sols. Ils ont établi différents modèles dont certains résultats en calibration sont les suivants : un $R^2_{aj.}$ de 0,66 et un RMSE de 5,3‰ pour la teneur en C_{org} en fonction du paramètre R, $R^2_{aj.}$ de 0,63 et un RMSE de 5,5‰ entre C_{org} et v^* , $R^2_{aj.}$ de 0,56 et 0,52 et des RMSE de 5,6‰ et 5,8‰ avec les paramètres CIE L et CIE u^* .

Quant à l'utilisation de l'appareil photo pour prédire la teneur en C_{org} , Viscarra Rossel *et al.* (2008a) ont utilisé une régression logarithmique avec le modèle CIE v^* . Ils ont trouvé un $R^2_{aj.}$ de 0,88 et un RMSE de 4,8‰.

La présente étude se limitera aux résultats en calibration. Le nombre d'échantillons analysés ne permet pas de réaliser une validation avec des lots indépendants. Néanmoins, ces résultats ont pu démontrer que les couleurs du sol constituent un outil potentiellement pertinent pour modéliser la teneur en fer et en carbone organique du sol. Les échantillons utilisés proviennent de sites considérablement différents et sous diverses conditions pédoclimatiques. Cette hétérogénéité de la population étudiée a pu avoir une influence sur les modèles. Ces derniers sont de plus en plus robustes avec l'homogénéité des échantillons. Comme les modèles ont été établis par groupe de sol, les ferralsols et cambisols sont les plus hétérogènes du point de vue climat et distribution spatiale. Ces deux groupes de sol ont les modèles les moins pertinents. Par contre, les arenosols et luvisols se développent généralement dans des conditions climatiques assez homogènes malgré leur distribution spatiale, d'où l'obtention des modèles plus robustes par rapport aux autres groupe de sol.

4- CONCLUSION

La couleur du sol a toujours été utilisée pour la description, la classification et l'évaluation qualitative de la fertilité des sols. Pourtant, elle constitue un outil permettant de prédire certaines propriétés des sols en l'occurrence la teneur en fer et en carbone organique. Dans la présente étude, les couleurs Munsell et les couleurs RVB extraites des photos numériques ont été utilisées. La modélisation des différents modèles spatiaux de couleurs pour prédire les teneurs en ces deux éléments montre qu'il serait possible d'utiliser la couleur pour des analyses quantitatives des propriétés des sols. Il a été constaté que le fer et le carbone sont plutôt corrélés aux paramètres de couleur des photos, moins avec les couleurs Munsell. D'une manière générale, le fer est corrélé à des couleurs à l'état sec et le carbone à des couleurs des échantillons humides. L'assombrissement des échantillons après humectation en est la principale explication. En calibration, ce sont surtout les arenosols et luvisols qui ont les meilleurs modèles pour le Fe_{CBD} avec un $R^2_{aj.}$ de 0,95 et de 0,86 et des RMSE en dessous de 5%. Ces résultats ont été obtenus avec le modèle de couleur CIE C pour les arenosols et la chromaticité x pour les luvisols. Pour le carbone organique, ce sont aussi les arenosols qui ont un

R^2_{aj} , le plus élevé (0,72) et un RMSE de 1,34‰ avec le chroma C des photos des échantillons humides. Les nitisols et ferralsols ont respectivement des R^2_{aj} de 0,61 et 0,63 et des RMSE de 2,96‰ et 4,99‰. Ces résultats montrent qu'on peut très bien modéliser la teneur en fer et en C_{org} à partir des couleurs pour certains groupes de sol. Pour évaluer la robustesse des modèles et la possibilité de leur utilisation future, d'autres lots de validation devront être utilisés. La connaissance des R^2_{aj} et RMSE en validation reste un facteur déterminant dans l'évaluation de la pertinence des modèles obtenus. Une fois les modèles obtenus, la prédiction de la teneur en fer et en carbone organique ne serait plus limitée par la disponibilité de produits chimiques et de matériels, ni par le temps d'analyse en laboratoire. Cette méthode est à moindre coût et plus rapide, les matériels nécessaires sont limités à un appareil photo numérique, un simple dispositif de prise de photo, le code Munsell et un logiciel de traitement d'image et de données statistiques. Ces résultats semblent prometteurs sur l'avenir de cet outil à Madagascar.

Références Bibliographiques

Adderley, W.P., Simpson, I.A. and Davidson, D.A., 2002. Colour description and quantification in mosaic images of soil thin sections. *Geoderma*, 108: 181-195.

Barrett, L.R., 2002. Spectrophotometric color measurement in situ in well drained sandy soils. *Geoderma*, 108: 49-77.

Barron, V. and Torrent, J., 1984. Influence of aluminum substitution on the color of synthetic hematites. *Clays and Clay Minerals*, 32(2): 157-158.

Ben-Dor, E. and Singer, A., 1987. Optical density of vertisol clays suspensions in relation to sediment volume and dithionite—citrate—bicarbonate extractable iron. *Clays and Clay Minerals*, 35(311-317).

Coventry, R.J. and Robinson, P.J., 1981a. Colour Groups Derived from Numerical Classification of the Munsell Soil Colour Chips. *Australian Journal of Soil Research*, 19: 103-112.

Coventry, R.J. and Robinson, P.J., 1981b. Colour groups derived from numerical classification of the munsell soil colour chips, pp. 103-112.

Ebeid, M.M., Lal, R., Hall, G.F. and Miller, E., 1995. Erosion effects on soil properties and soybean yield of a Miamian soil in Western Ohio in a season with below normal rainfall. *Soil Technology*, 8: 97-108.

Eschenbrenner, V., 1988. Les glébules des sols de Côte d'Ivoire. Nature et origine en milieu ferrallitique. Modalités de leur concentration. Rôle des termites. *Thèse de Doc. es Sci.*, 498 p.+ 282 p. Publié en 1988, *ORSTOM*, T.D.M., n°39.

Feller, C., Fritsch, E., Poss, R. and Valentin, C., 1991. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'ouest, en particulier). *Cahier ORSTOM, Série Pédologique*, XXVI(1): 25-36.

Fernandez, R.N., Schulze, D.G., Coffin, D.L. and Van Scoyocn, G.E., 1988. Color, organic carbon, and pesticide adsorption relationships in a soil landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52: 1023-1026.

Fritsch, E., Morin, G., Bedidi, A., Bonnin, A., Balan, E., Caquineau, S. and Calas, G., 2005. Transformation of hematite and Al-poor goethite to Al-rich goethite and associated yellowing in a ferralitic clay soil profil of the middle Amazon Basin (Manaus, Brazil). *European Journal of Soil Science*, 56: 575-588.

- Konen, M.E., Burras, C.L. and Sandor, J.A., 2003. Organic Carbon, Texture, and Quantitative Color Measurement Relationships for Cultivated Soils in North Central Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67: 1823-1830.
- Lal, R., 2009. Soils and world food security. *Soil & Tillage Research*, 102: 1-4.
- Levin, N., Ben-Dor and Singer, A., 2005. A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments. *International Journal of Remote Sensing*, 26(24): 5475-5492.
- Mathieu, R., Pouget, M., Cervelle, B. and Escadafal, R., 1998. Relationships between Satellite-Based Radiometric Indices Simulated Using Laboratory Reflectance Data and Typic Soil Color of an Arid Environment. *Remote Sensing of Environment*, 66: 17-28.
- Mehra, O.P. and Jackson, M.L., 1960. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite–citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 7: 317-327.
- Minasny, B., Tranter, G., McBratney, A.B., Brough, D.M. and Murphy, B.W., 2009. Regional transferability of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopic prediction for soil chemical properties. *Geoderma*, 153: 155-162.
- Mouazen, A.M., Karoui, R., Deckers, J., De Baerdemaeker, J. and Ramon, H., 2007. Potential of visible and near-infrared spectroscopy to derive colour groups utilising the Munsell soil colour charts. *Biosystems Engineering*, 97: 131-143.
- Munsell Color Company, 2000. *Munsell Soil Color Charts, 2000 Revised Washable Edition*. Gretagmacbeth, New Windsor, NY.
- Sánchez-Marañón, M., Huertas, R. and Melgosa, M., 2005. Colour variation in standard soil-colour charts. *Australian Journal of Soil Research*, 43(827-837).
- Sanchez, P.A., Palm, C.A. and Buol, S.W., 2003. Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma*, 114: 157-185.
- Scheinost, A.C. and Schwertmann, U., 1999. Color Identification of Iron Oxides and Hydroxysulfates: Use and Limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63: 1463-1471.
- Schulze, D.G., Nagel, J.L., Von Scoyoc, G.E., Henderson, T.L., Steinwand, M.F., Baumgardner, A.L. and Stott, D.E., 1993. Significance of organic carbon in determining soil colors. p. 71–90. In J.M. Bigham and E.J. Ciolkosz (ed.) *Soil Color*. SSSA Spec. Publ. 31, SSSA, Madison, WI.
- Segalen, P., 1994. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique: Tome I,II,III. 579.
- Shields, J.A., Paul, E.A., Arnaud, R.J.S. and Head, W.K., 1968. Spectrophotometric measurement of soil color and its relationship to moisture and organic matter. *Canadian Journal of Soil Science*, 48(271-280).

Singleton, P.L., 1991. Water Tables and Soil Colour as an Indicator of Saturation in Some Soils of the Waikato, New Zealand. *Australian Journal of Soil Research*, 29: 467-481.

Torrent, J., Schwertmann, U., Fechter, H. and Alferez, F., 1983. Quantitative relationships between soil colour and hematite content. *Soil Science*, 136: 354-358.

Viscarra Rossel, R.A., 2004. ColoSol. Executable Software to Perform Colour Space Model Transformations for Soil Colour. <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/people/rvrossel/soft02.htm>.

Viscarra Rossel, R.A., Fouad, Y. and Walter, C., 2008. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. *Biosystems Engineering*, 100(2): 149-159.

Viscarra Rossel, R.A., Minasny, B., Roudier, P. and McBratney, A.B., 2006. Colour space models for soil science. *Geoderma*, 133: 320-337.

Walkley, A. and Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(29-38).

Wyszecki, G. and Stiles, W.S., 1982. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*,. Second Edition Wiley, New York.

**CHAPITRE VI - RELATIONS « SOL-CLIMAT » : ANALYSES DE
LA SENSIBILITE DES PROPRIETES DES SOLS AU CLIMAT**

RESUME

Dans les pays tropicaux à vocation agricole comme Madagascar, la connaissance de la sensibilité des sols au climat permet une meilleure gestion de cette ressource dans l'optique d'une amélioration de la productivité agricole. L'objectif de la présente étude est d'analyser la sensibilité des propriétés des sols à la température et à la pluviosité à partir des couleurs et des spectres MIR. Les échantillons de sol utilisés sont issus des prélèvements dans 119 sites le long des axes Est-Ouest et Nord-Sud de l'île. Des ACP ont été réalisées entre la température, la pluviosité, les variables couleurs et les propriétés du sol. Les analyses de la sensibilité ont été réalisées avec des régressions PLS entre les variables de couleurs RVB et Munsell et la température et la pluviosité, et entre les spectres et les variables climatiques. Des simulations relatives aux scénarii de changement climatique de l'IPCC et aux différents scénarii de changement d'usage des terres ont été effectuées avec le modèle RothC pour l'analyse de la sensibilité du C_{org} . Les ACP et les PLS ont montré l'absence des relations entre les variables climatiques et les couleurs pour les ferralsols, cambisols et luvisols. Des valeurs de R^2 entre 0,52 et 0,88 ont été obtenues avec les nitisols et les arenosols. Les ACP entre les propriétés du sol et les variables climatiques ont permis de constater que la température est toujours corrélée négativement au C_{org} et la pluviosité intervient plutôt sur le pH et le C pour les sols sableux. Les analyses avec les spectres ont présenté des valeurs de R^2 élevées pour les nitisols ($R^2= 0,91$), luvisols ($R^2= 0,99$) et arenosols ($R^2= 0,83$). Ces valeurs de R^2 restent en dessous de 0,8 pour les cambisols et les ferralsols. Les analyses qualitatives des loadings ont montré la sensibilité à long terme au climat des kaolinites et des gibbsites. Les bandes relatives à ces éléments ont été identifiées maintes fois sur les loadings. Cette sensibilité peut être due à des lessivages des argiles ou à l'altération de ces dernières. Les matières organiques sont plutôt sensibles à la température. Les produits aliphatiques ont été identifiés sur tous les loadings aux environs de 2922 cm^{-1} et de 2853 cm^{-1} , les acides carboxyliques pour les ferralsols proches de 1756 cm^{-1} , les amides I proches de 1653 cm^{-1} et les amides II aux environs de 1653 cm^{-1} , 1600 cm^{-1} et 1556 cm^{-1} pour l'ensemble des groupes de sol, excepté les luvisols. Ces composés organiques constituent les *variables rapides* tandis que les éléments minéraux sont qualifiés de *variables lentes*. Les simulations avec RothC ont confirmé que le C du sol est plutôt sensible aux modes d'usage. La sensibilité aux climats ne se manifeste que dans des cas extrêmes comme l'absence de couvertures végétales. Le changement d'usage a fait diminuer les stocks de C quand les biomasses aériennes ne sont pas restituées au sol, particulièrement pour les ferralsols. Le C des arenosols est moins sensible à ces 2 types de changement que le C des ferralsols.

Mots clés : sensibilité, climat, propriétés des sols, couleurs, signatures spectrales, PLS, carbone, RothC

1- INTRODUCTION

Dans le monde, 1,2 à 1,5 milliards d'hectares sont consacrés à l'agriculture (Howden *et al.*, 2007). Avec ou sans les changements climatiques, le plus grand défi pour les 25 à 40 ans à venir reste l'augmentation de la capacité agricole mondiale. Ceci permettra de répondre aux demandes croissantes en nourriture, suite à une importante croissance démographique (Easterling et Apps, 2005). L'agriculture offre plusieurs services écosystémiques à l'homme. Pourtant, les activités agricoles demeurent très sensibles aux variations du climat (Howden *et al.*, 2007). Il a été constaté que l'agriculture est une activité fortement tributaire du climat. Excepté pour les cultures irriguées dont les sources en eau sont indirectement influencées par la pluviosité, les cultures pluviales dépendent entièrement non seulement de la quantité mais surtout de la répartition des pluies pour chaque cycle cultural. Dans les pays en développement où l'augmentation future de la population se réalisera en grande partie, les ressources en sol et en eau sont déjà sous une forte pression (Lal, 2007). A Madagascar, les zones de bas fonds, souvent très exigües, sont de plus en plus saturées. Faute de moyens pour l'irrigation, les zones de *tanety* sont uniquement dédiées à des cultures pluviales (ex. riz, manioc, maïs...). Les zones de *tanety* sont largement dominées par les ferralsols, notamment sur les Hautes Terres. D'après Rabeharisoa (2004), les sols ferrallitiques de la classification CPCS représente 65% de la surface agricole utile à Madagascar. A part l'intensification pour les cultures situés sur les bas fonds, l'exploitation des *tanety* constitue ainsi la seule alternative afin d'augmenter la production via l'augmentation des surfaces cultivées. Actuellement, les sols des zones de *tanety* sont toujours considérés comme hautement assujettis aux activités érosives des pluies et sont souvent très pauvres en éléments nutritifs. Les ferralsols malgaches sont très acides, pauvres en matière organique avec une faible capacité d'échange et une faible teneur en cation échangeable. Ils sont également carencés en phosphore (Rabeharisoa, 2004).

A l'échelle du pays, Madagascar représente différents groupes de sol, dominés essentiellement par des sols à texture argileuse tels que les ferralsols, les cambisols et les nitisols et des sols à texture sableuse comme les arenosols et les luvisols, selon la classification FAO des sols (FAO, 1974). Un même groupe de sol, distribué dans différentes zones de l'île, peut être soumis à différents régimes climatiques. Les types de climat identifiés à Madagascar laissent comprendre que ces sols évoluent sous des températures et des pluviosités hétérogènes. Ainsi, à travers des études d'un même groupe de sol évoluant dans des zones climatiques différentes, on pourra appréhender les impacts du climat sur les propriétés des sols. Pour la relation « sol-climat », la question qui se pose est la suivante : « *quelles sont les propriétés des sols qui sont sensibles au climat ?* ». La connaissance du compartiment ou des éléments du sol les plus sensibles au climat permettra d'évaluer les impacts futurs des changements climatiques sur le sol, par le biais des simulations de différents scénarii. D'ailleurs, une meilleure connaissance de l'interaction entre le

changement d'usage des terres, le changement climatique et le biosphère terrestre reste cruciale pour le planning futur de la gestion des terres (Falloon *et al.*, 2007).

Parmi les composantes du sol, les effets des variables climatiques en particulier la température, sur le carbone organique du sol (COS) ont été longuement étudiés. Le carbone a une importance particulière sur le fonctionnement du sol car il demeure le premier constituant des matières organiques du sol. Ces dernières assurent un rôle primordial en tant que déterminantes de la fertilité et de la productivité d'un sol (Feller et Beare, 1997). Le carbone joue également un rôle majeur sur la structure des sols (Swinton *et al.*, 2007). A d'autre échelle, le COS est une composante très importante de l'agro-écosystème par son rôle dans la dynamique des gaz à effet de serre (Martin *et al.*, 2010), responsable du réchauffement planétaire global. Il a été avancé qu'un petit changement au niveau du COS peut avoir un énorme impact sur la concentration de CO₂ atmosphérique (Xu *et al.*, 2011). L'augmentation de la température et du CO₂ atmosphérique affecte à la fois la productivité des plantes (qui constituent les sources de COS) et le taux de décomposition des matières organiques du sol qui détermine la perte en COS (Farina *et al.*, 2011). La sensibilité du COS au réchauffement climatique (malgré les divergences de point de vue des scientifiques) est un élément très important pour les différentes projections sur la concentration en CO₂ dans l'atmosphère et sur le climat en général (Knorr *et al.*, 2005). La dépendance à la température du taux de minéralisation du COS a été longtemps soutenue (Kirschbaum, 1995; Leiros *et al.*, 1999; Agren et Bosatta, 2002; Smith et Fang, 2010).

Les changements climatiques sont souvent assimilés à une augmentation de la température moyenne de la surface terrestre et à une diminution de la pluviosité. Dans leur rapport sur des projections sur le climat, l'IPCC (2007) a proposé divers scénarii probables relatifs aux changements du climat. Pour le cas du réchauffement en surface, les scénarii : B1 prévoit une augmentation de 1,8°C, B2 une augmentation de 2,4°C, A1B une élévation de 2,8°C, A2 une augmentation de 3,2°C et A1FI une augmentation de 4°C, comparées à la période de 1880 à 1999. Pour la pluviosité, par rapport à 1888 à 1999, le scénario A1B prévoit une diminution de 20 à 60% en 2040 et 30 à 80% en 2090 (IPCC, 2007). Ces différents scénarii peuvent être utilisés pour l'analyse de l'effet de la variabilité du climat sur la dynamique du carbone du sol.

Les objectifs principaux de la présente étude sont de (i) identifier les composantes du sol sensibles à la température et à la pluviosité par le biais des variables couleurs et les signatures spectrales des sols, (ii) étudier la dynamique du COS suivant les différents scénarii de changement futur du climat et du changement des modes d'usage des terres.

La connaissance de la sensibilité des propriétés des sols, particulièrement le COS, aux climats permettra d'apporter des recommandations sur la gestion des terres et de connaître si la sensibilité est due au climat ou au changement d'usage des terres.

2- MATERIELS ET METHODES

2.1 SITES D'ETUDES

Les sites de prélèvement d'échantillons de sol sont ceux décrits dans le chapitre 2. Ce sont des sites répartis dans divers endroits de Madagascar, suivant les transects Est-Ouest et Nord Sud. Ils sont au nombre de 119, espacés de 20 km chacun. Pour la présente étude, les analyses se focalisaient uniquement sur les sols à texture argileuse (ferralsols, cambisols et nitisols) et sur les sols à texture sableuse (arenosols et luvisols), correspondants aux sols ferrallitiques et sols ferrugineux de la classification CPCS des sols.

2.2 DONNEES SOLS

Les échantillons ont été prélevés sur 5 profondeurs : 0-10, 10-20, 20-30, 50-60 et 80-90 cm. Chaque échantillon utilisé est un composite des 4 répétitions par site et par profondeur de prélèvement. Les détails sur les méthodes d'échantillonnage ont été développés dans le chapitre 2.

2.3 VARIABLES « COULEURS DE SOL »

Les données sur la couleur de sol sont celles utilisée dans le chapitre 5 sur la prédiction des teneurs en fer et en carbone organique à partir des variables de couleur. Ce sont des « modèles spatiaux de couleur » issues de la transformation des couleurs RVB et Munsell à l'aide du logiciel COLOSOL (Viscarra Rossel, 2004).

2.4 DONNEES SPECTRALES

Les signatures spectrales des échantillons de sol ont été issues des analyses spectrales en moyen infrarouge (MIR). Les échantillons ont été scannés entre 400 cm^{-1} et 4000 cm^{-1} (voir chapitre 2).

2.5 DONNEES SUR LES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

Les données d'analyse utilisées sont issues des 2 résultats différents : d'une part les résultats des analyses en laboratoire et d'autres part les résultats des prédictions à partir des données spectrales MIR développés dans le chapitre 4, notamment pour le carbone organique et la texture.

2.6 DONNEES CLIMATIQUES

2.6.1 Température et pluviosité

Les températures moyennes, minimales et maximales mensuelles ainsi que la pluviosité moyenne mensuelle ont été extraites des bases de données WORLDCLIM (Hijmans *et al.*, 2005). Les points GPS des sites de prélèvement ont été projetés sur les cartes de température et de pluviosité afin d'extraire les données climatiques correspondantes.

2.6.2 Evapotranspiration potentielle (ETP)

Les évapotranspirations potentielles ou ETP ont été extraites des données climatiques FAO. Ce sont des données issues des enregistrements entre 1961 et 1990. Les ETP ont été calculées avec les formules de Penman-Monteith.

2.7 ANALYSES DE LA SENSIBILITE

2.7.2 Analyses qualitatives de la relation « propriétés des sols-climat »

Deux variables du climat ont été retenues pour les analyses de la sensibilité : la température moyenne annuelle et la pluviosité moyenne annuelle. Des analyses qualitatives sur la relation entre les propriétés physico-chimiques des sols prélevés et ces deux variables climatiques ont été réalisées en premier lieu.

2.7.3 Analyses en composante principale (ACP) entre propriétés des sols et climat:

Il s'agit d'analyser les corrélations entre les propriétés des sols et les variables « température et pluviosité ». Les ACP permettent de déceler l'existence des groupes de variables « sols » et « climats » homogènes. Ces analyses informent également l'importance des corrélations entre les variables.

2.7.4 Analyses en composante principale entre variables couleurs et climats

Par groupe de sol, des ACP ont été effectuées entre les variables transformées de couleur RVB et Munsell et les variables climatiques « température et pluviosité ». L'objectif est d'analyser la présence éventuelle de groupes homogènes entre les variables de couleur et de climat.

2.7.5 Régression linéaire du moindre carré partiel (PLSR) des variables couleurs

Les régressions ont pour but d'utiliser les couleurs comme variables d'analyse de la sensibilité. La pluviosité et la température constituent les variables à expliquer Y et les couleurs représentent les variables explicatives X. Chaque modèle a été évalué avec le coefficient de détermination R^2 .

2.7.6 Régression linéaire du moindre carré partiel (PLSR) des spectres

Des régressions ont été réalisées entre les spectres, représentant les variables explicatives X, et les variables « température et pluviosité » qui représentent les variables à expliquer Y.

Les coefficients de détermination R^2 permettent d'évaluer l'importance des relations entre les variables climatiques et les spectres. Les constituants du sol sensible à la température et à la pluviosité peuvent être identifiés à partir des bandes exprimées sur les loadings.

2.8 SIMULATION SUR LA DYNAMIQUE DU CARBONE ORGANIQUE DU SOL : MODELE ROTH C

Le modèle de simulation du carbone organique du sol Rothamsted carbon ou RothC (Jenkinson et Rayner, 1977) a été utilisé pour analyser la dynamique du carbone sur 500 ans, entre 2008 et 2508. Il s'agit d'un modèle très utilisé pour estimer le changement du COS en réponse au climat ou au changement d'usage des terres (Xu *et al.*, 2011). Ce modèle peut estimer les flux du C organique résultant de l'évolution du sol en tenant compte des conditions climatiques (température et pluviosité), du type de sol et le cas échéant, la nature de la couverture végétale.

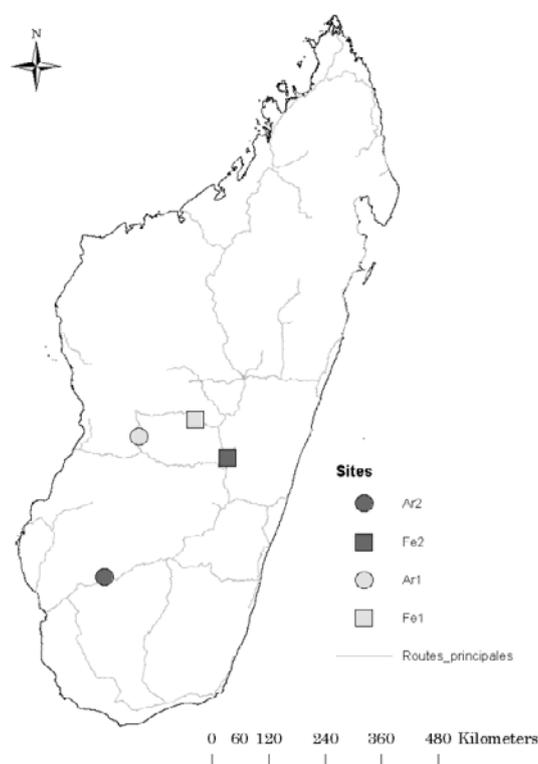


Figure 6-1: Carte de localisation des sites utilisés pour la simulation RothC

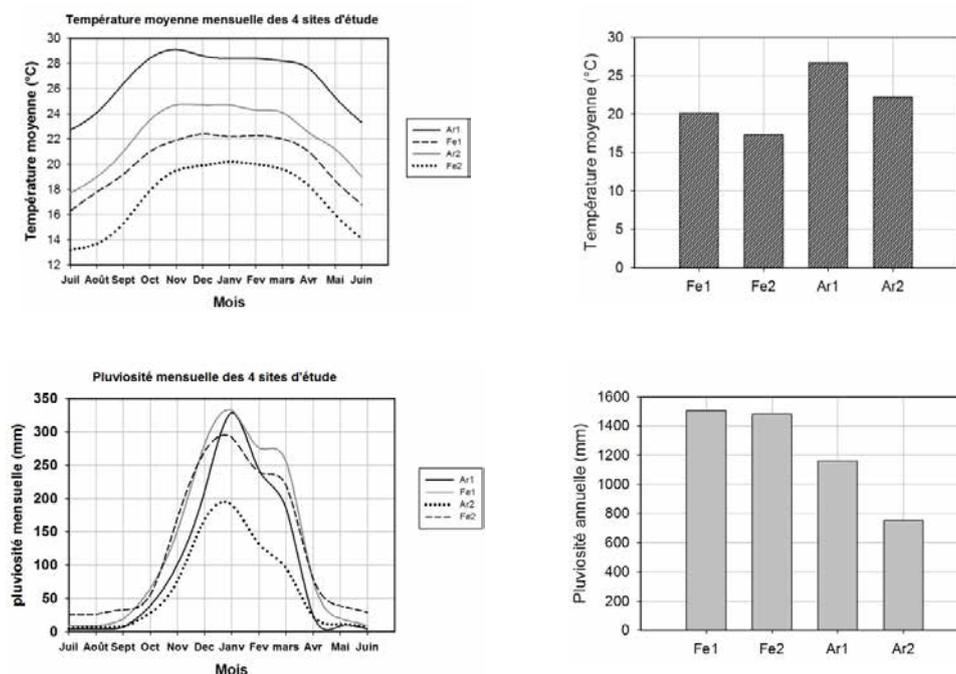


Figure 6-2 : Température et pluviométrie moyenne annuelle des sites étudiés

Les simulations ont été réalisées sur deux sites correspondant à des ferralsols (Fe1 et Fe2- sols argileux) et deux autres correspondant à des arenosols (Ar1 et Ar2- sols sableux). Les échantillons issus de 0-10 cm de profondeur ont été utilisés pour la simulation RothC. Pour l'état initial, ces sols étaient couverts de *bozaka*, non encore cultivés.

Les 4 sites étudiés se différencient à la fois par leurs températures moyennes annuelles et par la quantité de pluie enregistrée. Les ferralsols Fe1 et Fe2 se trouvent dans des zones plus froides mais plutôt humides par rapport aux arenosols Ar1 et Ar2.

Tableau 6-1 : Teneur en carbone et en argile des échantillons étudiés

| | Teneur en C (gC.kg ⁻¹) | Argile (g.100g ⁻¹) |
|-----|------------------------------------|--------------------------------|
| Fe1 | 15,76 | 38,16 |
| Fe2 | 27,88 | 47,11 |
| Ar1 | 6,44 | 12,19 |
| Ar2 | 7,08 | 11,38 |

Les teneurs en carbone et en argile initiales utilisées sont celles obtenues lors des analyses en laboratoire (voir chapitre 4). Les ferralsols Fe1 et Fe2 ont des teneurs en carbone supérieure à 15 g.kg⁻¹ et des teneurs en argile variant entre 30 et 47 g.kg⁻¹. Les arenosols, à texture sableuse, affichent des teneurs très faibles en argile (<15%) et en carbone organique (<10 g.kg⁻¹).

Pour la simulation des changements climatiques, les scénarii utilisés sont ceux de l'IPCC (2007) : scénario B1 (augmentation de 1,8°C), scénario A1B (augmentation de 2,8°C) et scénario A1FI (augmentation de 4°C) pour la température, et le scénario A1B (diminution de 20% à 80%) pour la pluviosité. Pour le cas présent, nous avons pris comme valeur une diminution de 30% de la pluviosité.

Pour les modes d'usage des terres, la culture de riz pluvial avec un apport de fumier a été utilisée comme une base des scénarii à simuler. Le niveau de restitution des biomasses aériennes (pailles de riz) différencie chaque scénario. Les teneurs en carbone suivantes ont été retenues pour la simulation RothC :

Tableau 6-2 : Teneur en carbone des « entrées » utilisés

| Matières | Biomasse (Mg.ha ⁻¹) | Quantité de C (MgC.ha ⁻¹) | Source |
|--------------------|---|---------------------------------------|--------------------------|
| Bozaka (aérienne) | 3,8 à 5,2 | 1,9 à 2,6 | (Razafindramanana, 2006) |
| Bozaka (racinaire) | 1,18 à 2,6 | 0,59 à 1,62 | |
| Riz (aérienne) | 5,14 | 2,57 | (Razafimbelo, 2005) |
| Riz (racinaire) | 1,61 | 0,80 | |
| Fumier | Apport de 5Mg.ha ⁻¹ avec un taux de carbone de 30% | 1,55 | (Falinirina, 2010) |

Le tableau ci-après résume les différents scénarii adoptés :

Tableau 6-3 : Scénarii utilisés pour le RothC

| Scénario | Température (T) | Pluviosité (P) | Mode d'usage | Restitution | Apport |
|----------|-----------------|----------------|--------------|--|---------------------------------|
| S1 | T | P | Bozaka | 100% restituée | - |
| S2 | T + 1,8°C | P-(30%*P) | Bozaka | 100% restituée | - |
| S3 | T + 2,8°C | P-(30%*P) | Bozaka | 100% restituée | - |
| S4 | T + 4°C | P-(30%*P) | Bozaka | 100% restituée | - |
| SF0 | T | P | Riz pluvial | 0% biomasse aérienne 100% biomasse racinaire | - |
| SF1 | T | P | Riz pluvial | 0% biomasse aérienne et 100% biomasse racinaire | 5Mg.ha ⁻¹ fumier |
| SF2 | T | P | Riz pluvial | 100% biomasse aérienne et 100% biomasse racinaire | 5Mg .ha ⁻¹ fumier |

Après avoir effectué séparément des simulations avec les scénarii de changement climatique et de changement d'usage des terres, les deux types de scénarii ont été ensuite croisés avec les différentes combinaisons existantes: (S1, S2, S3, S4) x (SF0, SF1, SF2).

3- RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 PROPRIETES DES SOLS ET CLIMATS

Sur la figure 6-3, la relation entre les températures et les pluviosités des sites d'études montre que les sols à texture sableuse (arenosols et luvisols) se trouvent sous une température supérieure à 20°C et une pluviosité moyenne annuelle inférieure à 1500 mm. Les sols à texture argileuse, particulièrement les ferralsols, se rencontrent sur une large gamme de température, entre 16°C et 28 °C.

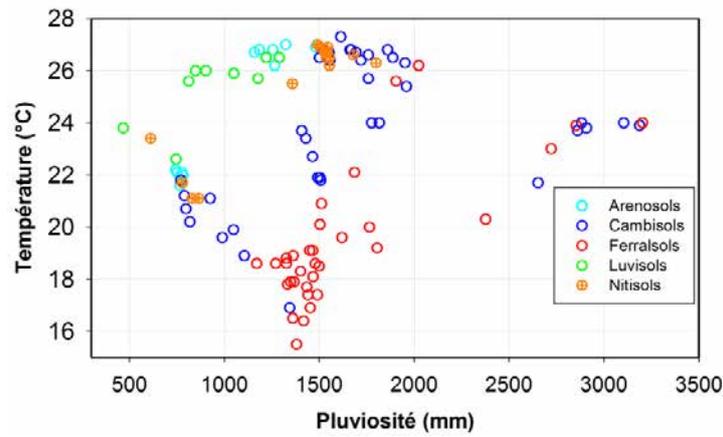
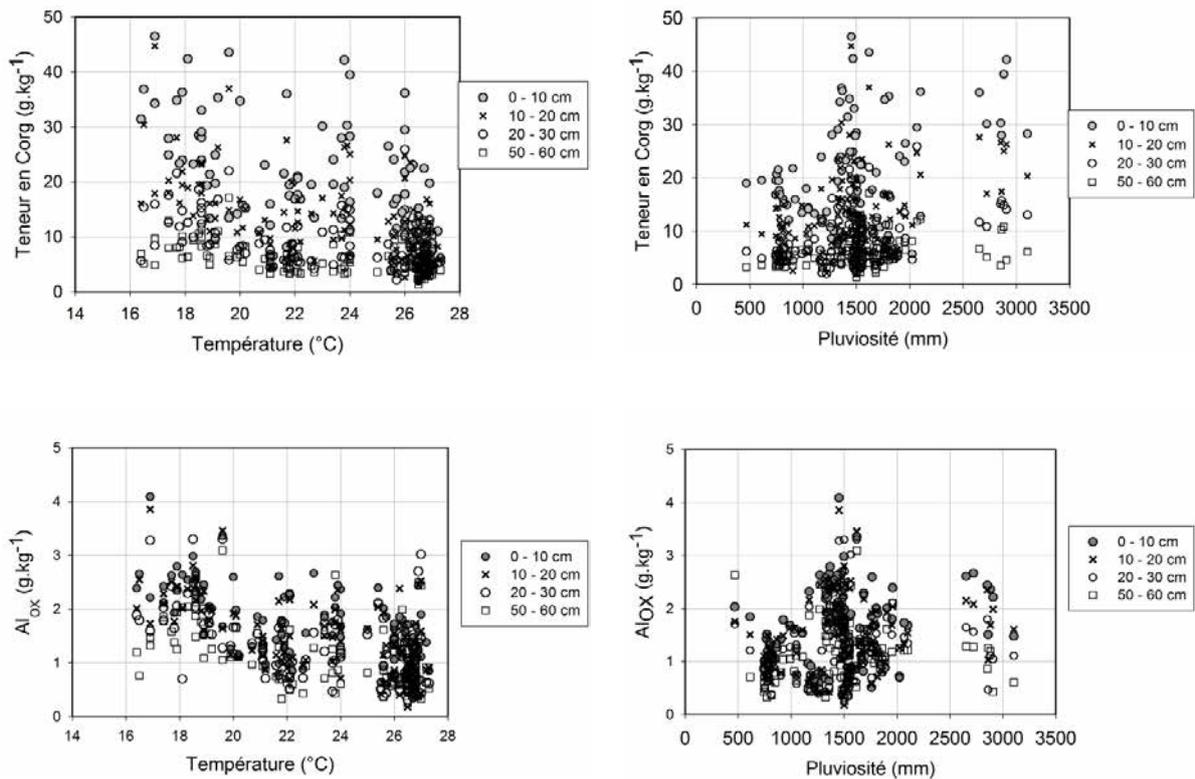


Figure 6-3 : Relation « température-pluviosité » des sites de prélèvement

La figure 6-4 montre les relations entre les variables climatiques « température et pluviosité » et la teneur en carbone organique, en Fe_{OX} , en Fe_{CBD} , en Al_{OX} et en Al_{CBD} .



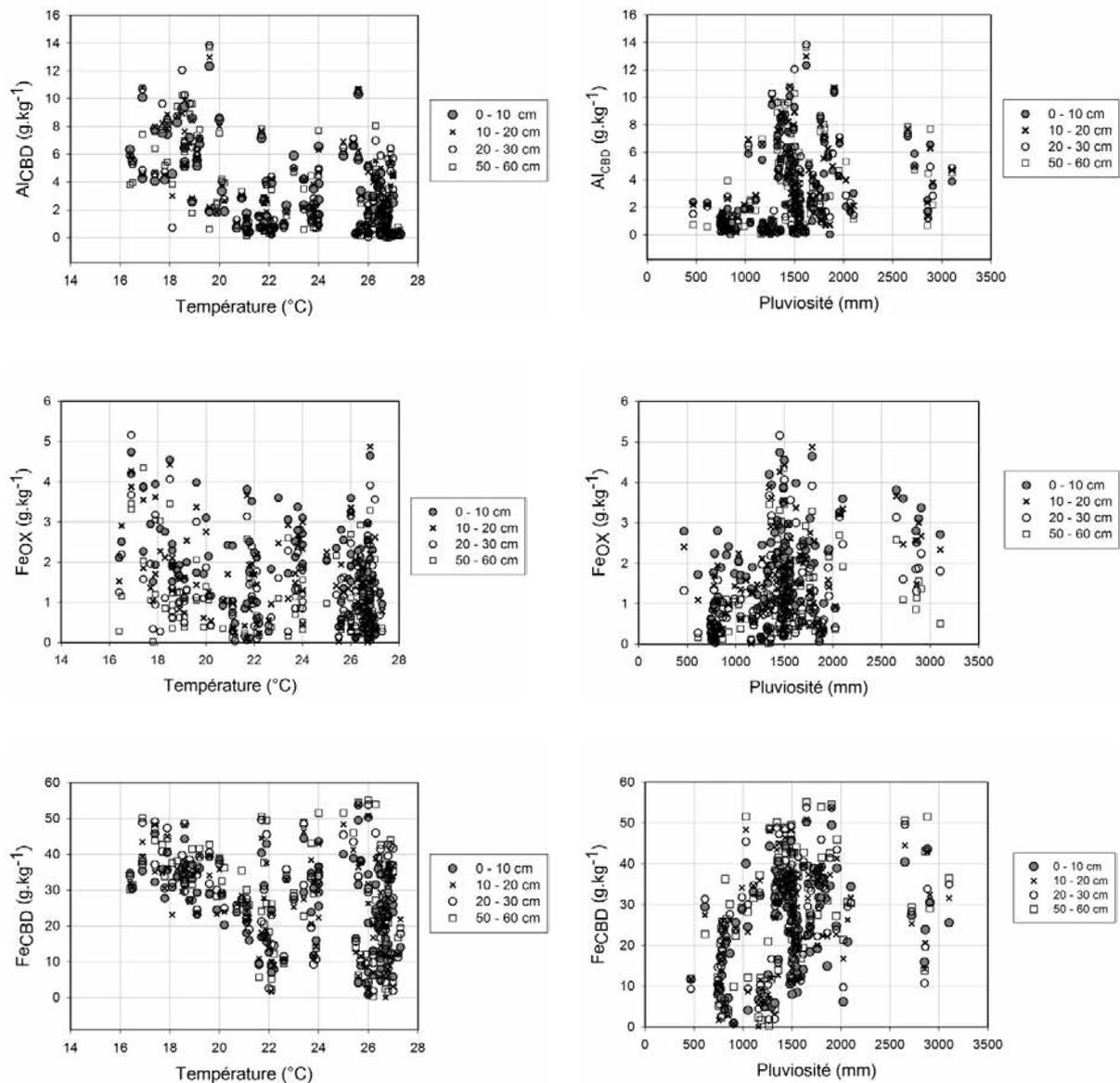


Figure 6-4 : Relations entre température, pluviosité et certaines propriétés des sols

Pour le carbone organique du sol, la tendance générale montre que la teneur en carbone est inversement proportionnelle à la température et proportionnelle à la pluviosité. Au niveau des profils, la teneur diminue avec la profondeur. Le dynamique du C par rapport à ces deux variables climatiques peut être expliquée par : d'une part la respiration des racines et la décomposition microbienne des matières organiques provoquant l'émission de CO_2 , sont des processus très dépendants de la température (Davidson et Janssens, 2006). Ainsi, une augmentation de la température provoque une augmentation du taux de minéralisation du C du sol et de sa perte par émission (Agren et Bosatta, 2002). D'après certains résultats de Kirschbaum (1995), la teneur en COS est positivement corrélée à la pluviosité jusqu'à une certaine quantité de pluie et négativement à la température. D'autre part, les sols situés sous

une température moyenne élevée sont ceux qui subissent des pluviosités faibles, en dessous de 1500 mm. Ce sont les sols à texture sableuse « arenosols et luvisols ». La production primaire nette est beaucoup plus importante sous des climats humides. La restitution de biomasse végétale au sol reste élevée pour les zones à pluviosité élevée. Ce niveau de restitution contrôle la quantité de matière organique, donc du C dans le sol.

Pour les autres constituants du sol, les teneurs ne sont pas différentes le long du profil analysé. Les Fe_{CBD} ont tendance à augmenter avec la pluviosité. Les Al_{CBD} et Al_{OX} sont assez élevées pour des températures moyennes inférieures à 20°C, par contre ces formes d'aluminium restent faibles pour des pluviosités en dessous de 1200 mm. Les formes amorphes, cristallisées et microcristallines de l'aluminium sont beaucoup plus importantes pour les sols à texture argileuse, notamment pour les ferralsols. Les ferralsols sont particulièrement riches en gibbsite. Pourtant, la gibbsite et la goethite riche en aluminium correspondent à la dernière génération des minéraux du sol (Fritsch *et al.*, 2005). La présence significative de la gibbsite dans le sol s'accompagne par conséquent d'une teneur importante des différentes formes de l'aluminium (Al_{CBD} et Al_{OX}).

3.2 EVALUATION DE LA SENSIBILITE AVEC LES COULEURS

3.2.1 Analyse en composante principale

Les figures ci-après montrent les résultats des ACP entre les variables climatiques et celles issues des transformations des couleurs RVB et Munsell à l'état humide et sec. Généralement, les deux premiers axes représentent près de 70% de la totalité des informations.

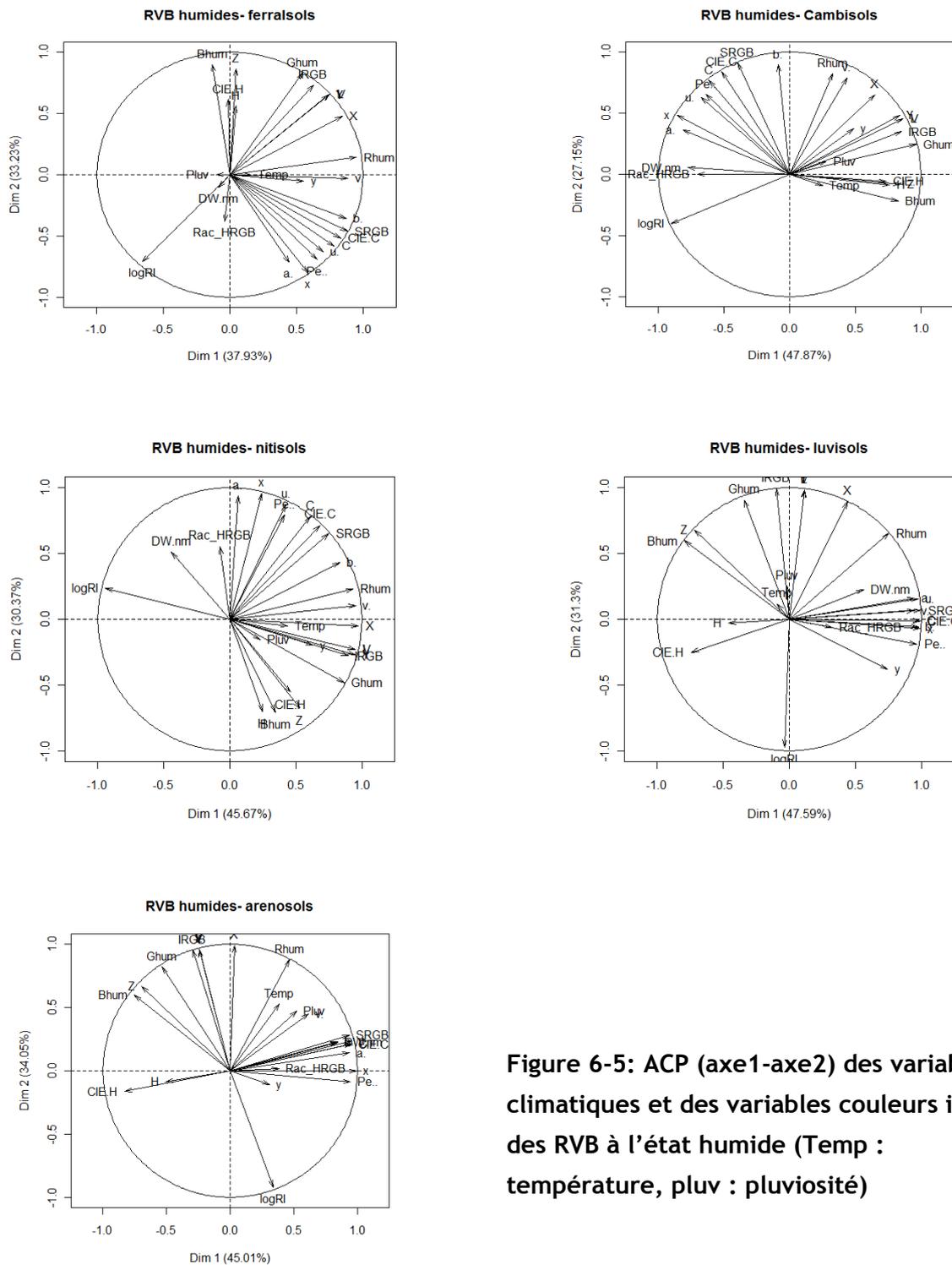


Figure 6-5: ACP (axe1-axe2) des variables climatiques et des variables couleurs issues des RVB à l'état humide (Temp : température, pluv : pluviosité)

Sur le plan 1-2, il a été constaté l'absence de corrélation entre les variables climatiques et les variables de couleur pour les ferralsols. Une très faible corrélation a été décelée avec les cambisols. Pour le cas des nitisols, des faibles corrélations positives ont été identifiées entre la température et les variables IRVB, Rhum, X, Ghum et entre la pluviosité et les variables Bhum et

HRGB. Pour les luvisols, l'axe3 (8,9%) montre une très faible corrélation positive entre T, P et les variables RI et Dw. Les corrélations les plus importantes ont été constatées entre la pluviosité des arenosols et les variables SRGB, CIE C, C, a*, x, u*, Pe (corrélation positive) d'une part et les variables H, CIE H d'autre part (corrélation négative).

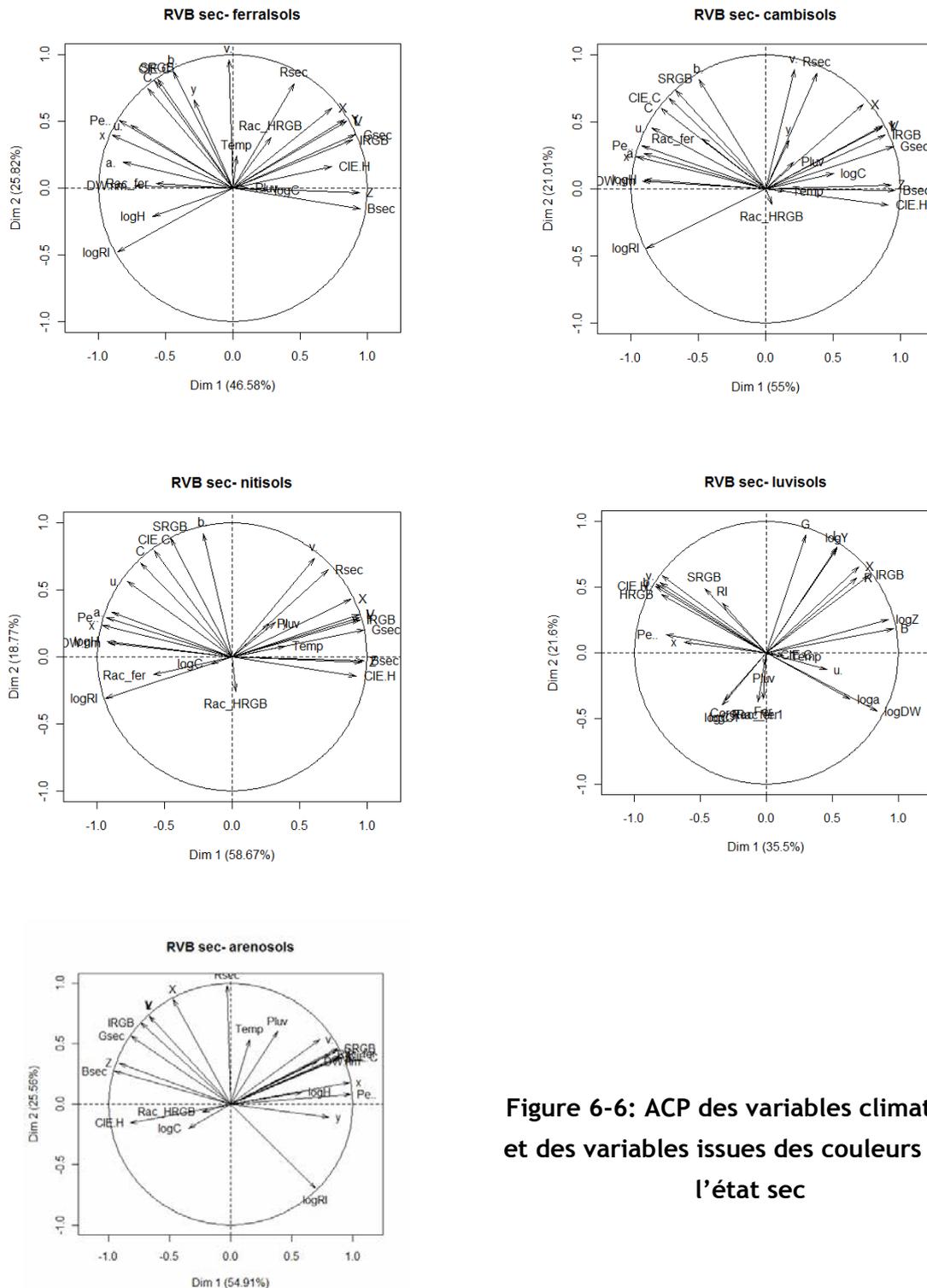


Figure 6-6: ACP des variables climatiques et des variables issues des couleurs RVB à l'état sec

Les ACP avec les couleurs issues des RVB à l'état sec ont montré des faibles corrélations avec les variables climatiques pour les ferralsols, les cambisols et les luvisols. Pour les nitisols, des corrélations positives ont été constatées entre la température et la pluviosité et les variables CIEH, Bsec, Gsec, IRGB, X, Rsec et v^* . Seuls les arenosols ont présenté une corrélation positive significative entre les variables du climat et la variable Rsec et une corrélation négative avec la variable logRI.

Dans la même tendance que les résultats précédents, les ACP avec les couleurs Munsell à l'état humide ont montré l'absence de corrélation entre les variables climatiques et les couleurs pour les ferralsols, les cambisols et les luvisols. Pour le cas des nitisols, la température forme un groupe homogène avec les variables SRGB, C, CIEC, RI, v^* , L, X, IRGB, R, b, γ , B, u^* . Des corrélations positives suivant le premier axe ont été constatées entre la température des arenosols et les variables R, b^* , IRGB, γ , G, CIEH, B, Z. Suivant la deuxième axe, la pluviosité est corrélée positivement à CIEC, a^* , u^* et négativement à HRGB, RI et γ .

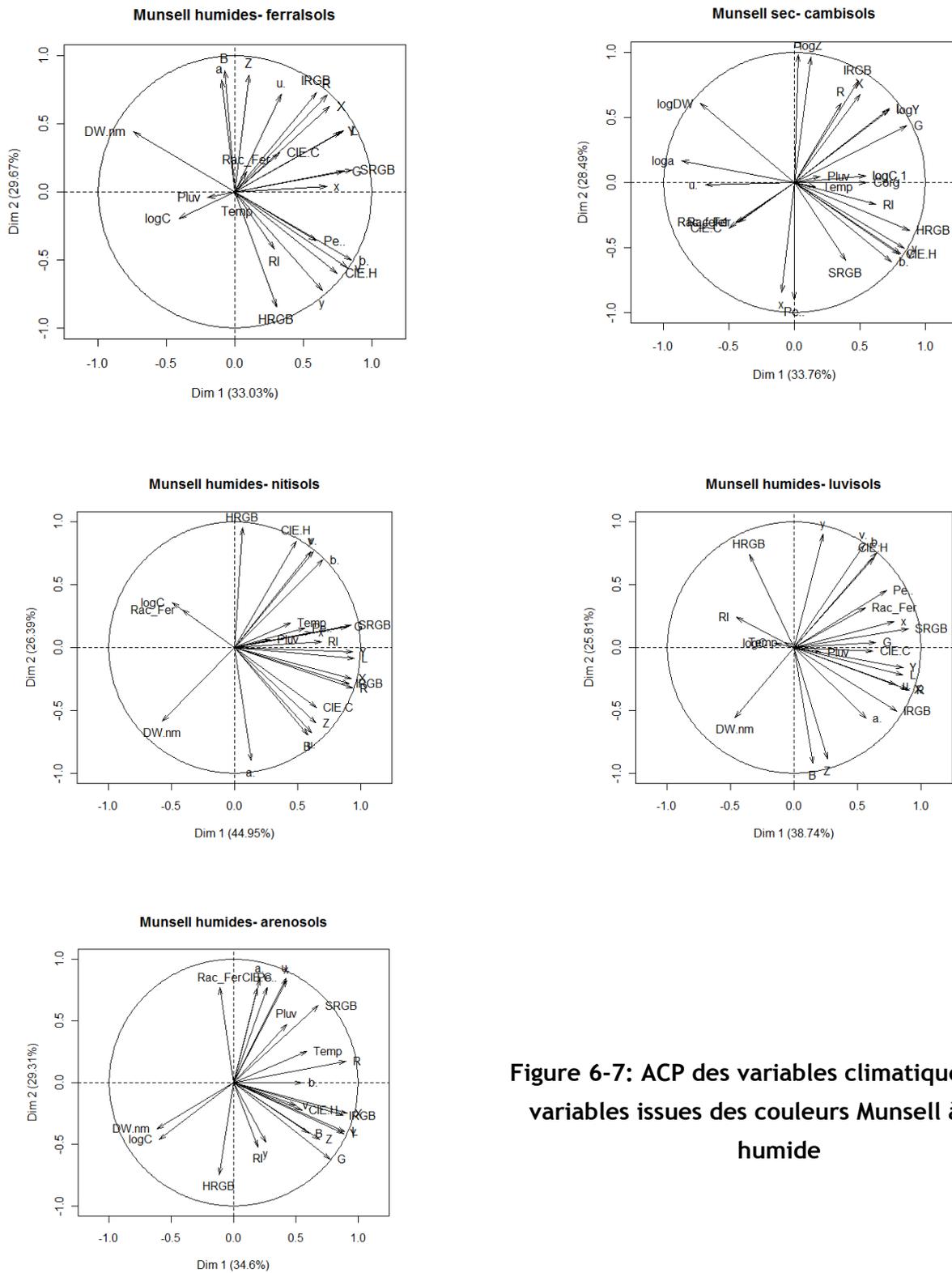


Figure 6-7: ACP des variables climatiques et des variables issues des couleurs Munsell à l'état humide

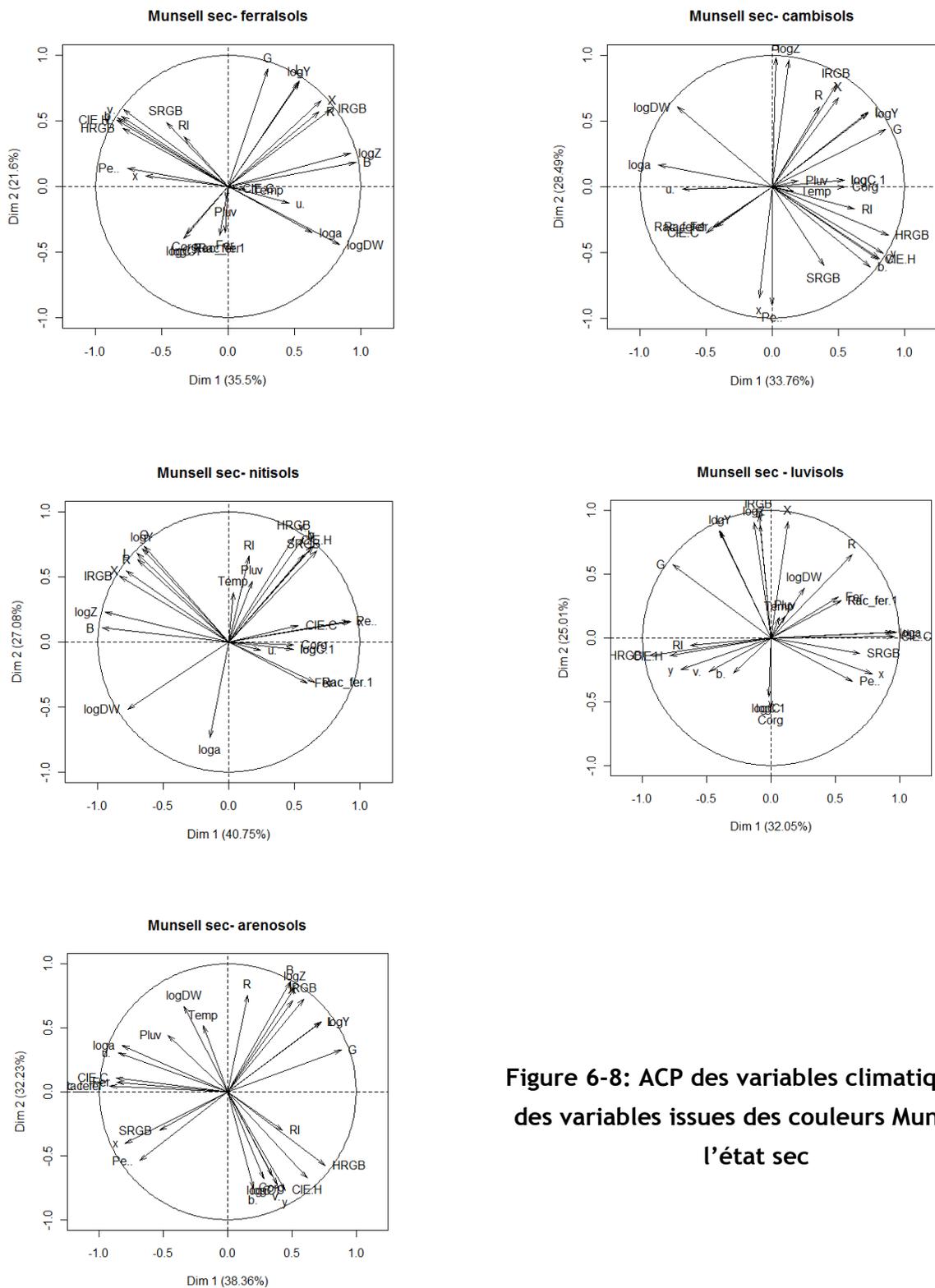


Figure 6-8: ACP des variables climatiques et des variables issues des couleurs Munsell à l'état sec

Avec les modèles de couleur issus des couleurs Munsell à l'état sec, aucune corrélation n'a été constatée entre les variables climatiques et les couleurs pour les ferralsols, les luvisols et les cambisols. La température et la pluviosité sont corrélées positivement à RI, HRGB, SRGB, CIEH,

b* (axe2) et négativement à loga*. Pour le cas des ferralsols, des groupes homogènes ont été appréhendés entre les variables du climat et les modèles de couleurs. La température est corrélée positivement à R, b*, IRGB, γ , G, CIEH, B, Z et négativement avec Dw (axe1). La pluviosité forme un groupe homogène avec les variables loga*, u*, CIEC, x, Pe et SRGB.

3.2.2 Régression entre variables de couleurs et variables climatiques

Par groupe de sol et pour chacune des variables « température » et « pluviosité », des régressions ont été réalisées séparément avec les couleurs RVB et Munsell à l'état sec et humide. Le tableau ci-dessous montre l'importance des relations entre le climat et la couleur du sol par le biais du coefficient de détermination R^2 .

Tableau 6-4: Coefficient de détermination R^2 des PLS entre les variables climatiques et les couleurs du sol

| RGB à l'état humide | | | Munsell à l'état humide | | |
|---------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| | R^2 - température | R^2 - pluviosité | | R^2 - température | R^2 - pluviosité |
| ferralsols | 0,02 | 0,03 | ferralsols | 0,02 | 0,06 |
| cambisols | 0,28 | 0,06 | cambisols | 0,03 | 0,07 |
| nitisols | 0,88 | 0,13 | nitisols | 0,66 | 0,05 |
| arenosols | 0,34 | 0,64 | arenosols | 0,25 | 0,72 |
| luvisols | 0,03 | 0,05 | luvisols | 0,02 | 0,05 |

| RGB à l'état sec | | | Munsell à l'état sec | | |
|------------------|---------------------|--------------------|----------------------|---------------------|--------------------|
| | R^2 - température | R^2 - pluviosité | | R^2 - température | R^2 - pluviosité |
| ferralsols | 0,32 | 0,26 | ferralsols | 0,02 | 0,02 |
| cambisols | 0,28 | 0,24 | cambisols | 0,04 | 0,03 |
| nitisols | 0,14 | 0,56 | nitisols | 0,52 | 0,14 |
| arenosols | 0,71 | 0,83 | arenosols | 0,64 | 0,71 |
| luvisols | 0,22 | 0,10 | luvisols | 0,03 | 0,02 |

Ces résultats confirment ainsi ceux trouvés avec les ACP précédemment. Effectivement, les valeurs de R^2 restent très faibles pour les ferralsols, les cambisols et les luvisols à la fois pour les régressions avec la température et avec la pluviosité. Les coefficients de détermination les plus élevés ont été obtenus avec la PLS entre la température et les couleurs RVB à l'état humide des nitisols ($R^2 = 0,88$) et entre la pluviosité et les couleurs RVB à l'état sec des arenosols ($R^2 = 0,83$). Avec les variables couleurs à l'état sec (RVB et Munsell), les arenosols présentent des valeurs de R^2 élevées tant avec la température qu'avec la pluviosité.

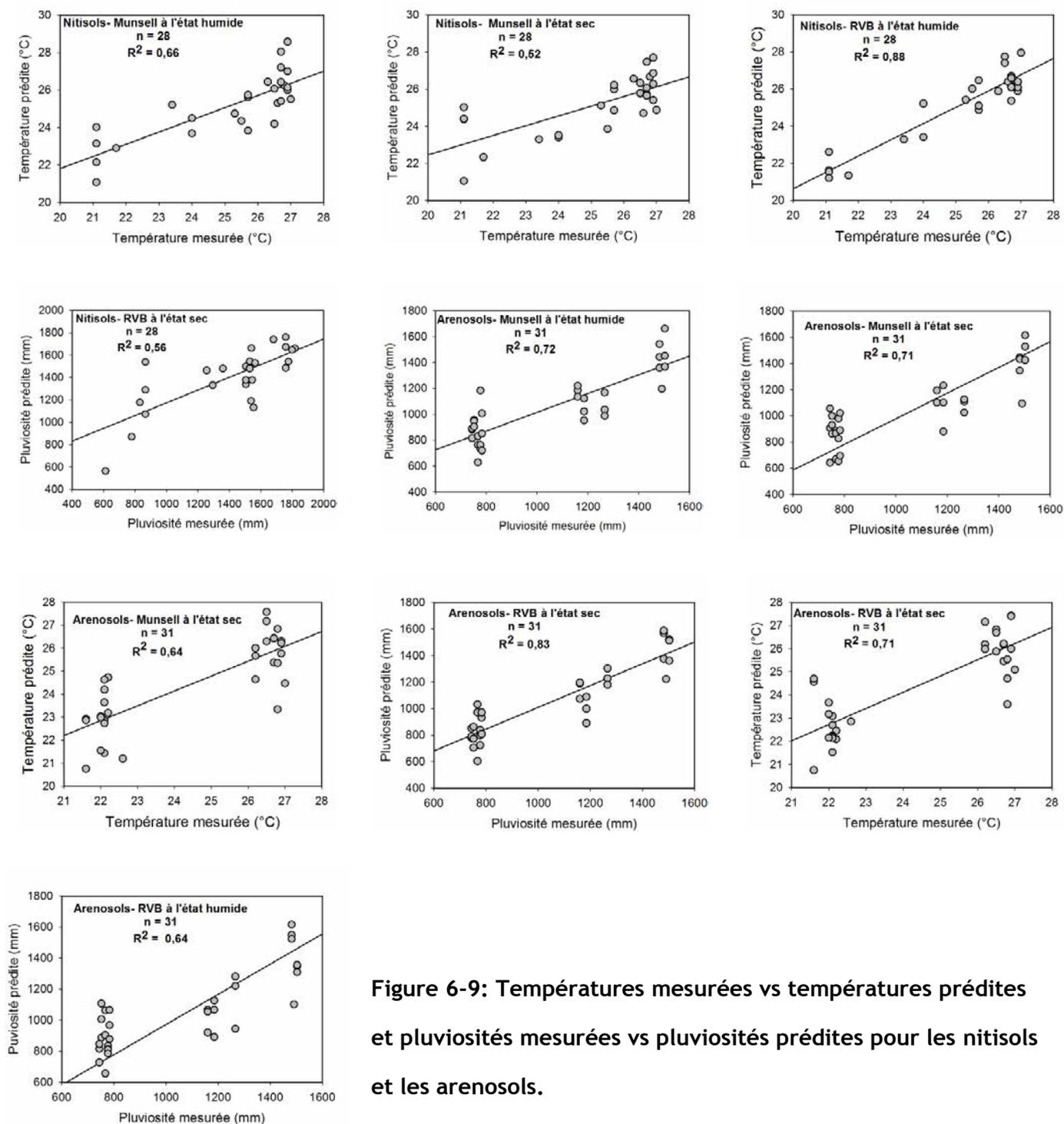


Figure 6-9: Températures mesurées vs températures prédites et pluviosités mesurées vs pluviosités prédites pour les nitroils et les arenosols.

Toutes les analyses qualitatives effectuées ont confirmé l'absence des relations (parfois une très faible corrélation) entre les variables climatiques et les variables « couleurs du sol » pour les ferrasols, cambisols et luvisols. Ces résultats relatent que la couleur du sol ne peut être utilisée

comme « indicateur de sensibilité » des sols au climat pour ces trois groupes de sol. La figure 6-10 montre les PLS qui ont des valeurs de R^2 supérieures à 0,5. Les échantillons sont mieux répartis le long de la courbe de tendance de la régression pour les nitisols (température-couleurs) avec un R^2 égal à 0,88 (RVB à l'état humide). Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les arenosols et les nitisols. Des analyses réalisées sur les résultats des ACP nous ont permis d'avancer que pour ces deux groupes de sol, les corrélations avec les variables climatiques intéressent diverses variables de couleurs essentiellement les chromaticités x et y , les coordonnées de chromaticité a^* , b^* , u^* et v^* , mais également les couleurs RVB et les variables de décorrélation du tristimulus RVB à savoir IRGB, SRGB et HRGB, les valeurs HVC, l'indice de rougeur RI.

Rappelons que les arenosols évoluent sous une pluviosité moyenne annuelle entre 500 et 1200 mm (Segalen, 1994) et une température moyenne annuelle supérieure à 21°C. Le climat constitue l'un des facteurs contribuant à la formation des arenosols. La séparation des sesquioxydes des argiles et leur migration sont liées aux conditions du milieu. L'individualisation du fer est d'autant favorisée que la pluviosité soit faible. Les sesquioxydes de fer confèrent la couleur rouge au sol (Eschenbrenner, 1988). D'après Ben-Dor et Singer (1987) et Levin *et al.*, (2005), le chroma C rougeâtre des arenosols (sols à texture sableuse) proviennent de l'association des oxydes de fer libre avec du quartz. Nous pouvons en déduire ainsi que la couleur des arenosols est très sensible au climat, notamment à la pluviosité. Pour le cas des nitisols, ils se développent surtout entre les domaines des ferralsols-cambisols (sols ferrallitiques) et des arenosols-luvisols (sols ferrugineux). Par rapport au climat, ils évoluent sous une température moyenne annuelle de 21 à 27°C et une pluviosité annuelle inférieure à 1800mm. Ces conditions climatiques sont très proches de celles des arenosols et pourront expliquer l'existence des relations entre les couleurs du sol et les variables climatiques pour les nitisols.

Ces analyses qualitatives n'apportent pas d'informations précises sur les composantes du sol les plus sensibles au climat mais reflètent seulement l'existence des relations entre couleur du sol et climat. Ces relations indiquent que certains groupes de sols via leurs couleurs ont des réponses aux influences des variables climatiques. Ces réponses peuvent être considérées comme une sensibilité au climat.

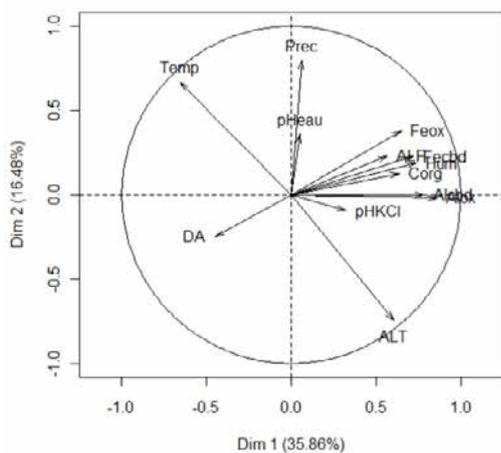
3.3 EVALUATION DE LA SENSIBILITE AVEC LES SIGNATURES SPECTRALES

3.3.1 Analyses en composante principale

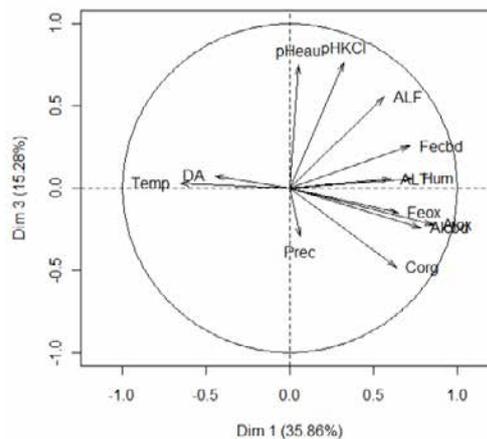
Les ACP entre les constituants du sol, la température et la pluviosité moyenne ainsi que l'altitude ont permis de repérer l'existence des groupes homogènes dans chaque plan factoriel.

La figure ci-dessous montre les corrélations entre ces variables pour les sols à texture argileuse (ferralsols, cambisols, nitisols) et les sols à texture sableuse (arenosols et luvisols).

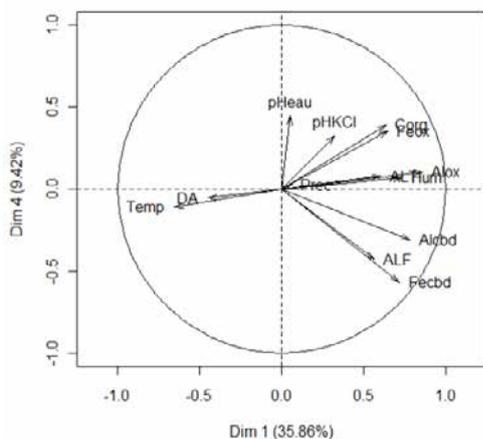
Constituants et variables climatiques (Texture argileuse)



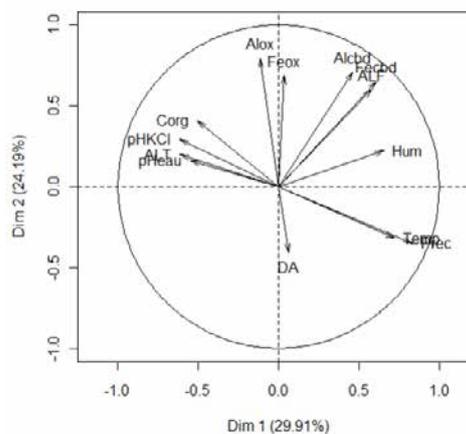
Constituants et variables climatiques (Texture argileuse)



Constituants et variables climatiques (Texture argileuse)



Constituants et variables climatiques (Texture sableuse)



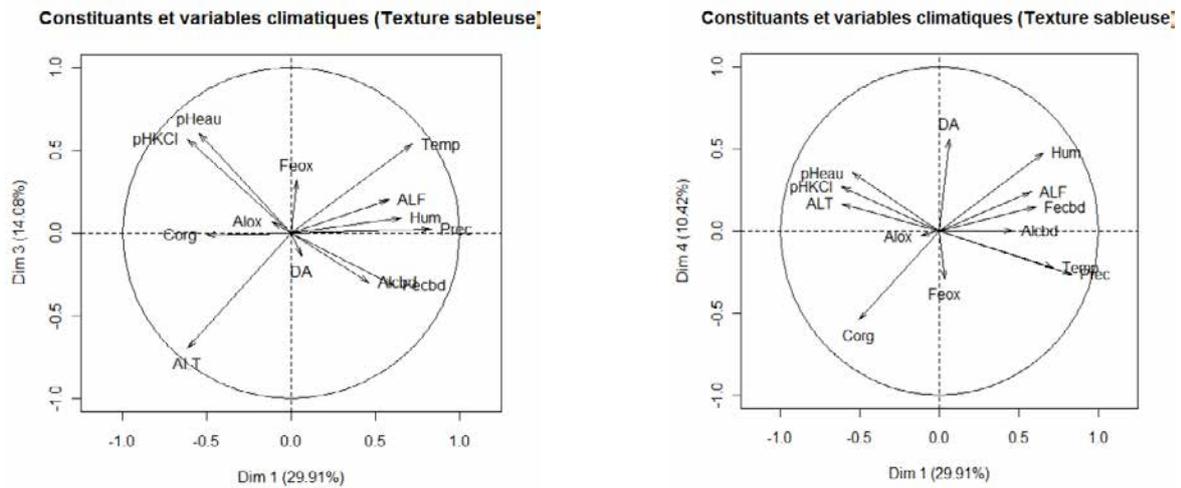


Figure 6-10 : ACP des variables climatiques et des constituants du sol

(Temp : température, Prec : pluviosité, ALT : altitude, DA : Densité apparente, Hum : humidité relative, Corg : COS)

Pour le cas des sols à texture sableuse, le plan 1-2 montre que Al_{OX} , Al_{CBD} , ALF, Humidité et le COS forment un groupe le long de l'axe1 en positive. Ces variables sont à leur tour corrélées négativement à la température qui évolue seule sur l'axe1 en négatif. La pluviosité (Prec) est corrélée négativement aussi à l'altitude. Les pH_{eau} et pH_{KCl} sont groupés suivant l'axe3 en positif.

Pour les sols à texture sableuse, les ACP montrent que les variables température et pluviosité sont corrélées négativement à la teneur en COS et aux pH_{eau} et pH_{KCl} du sol. Les éléments minéraux comme les différentes formes de l'aluminium et du fer, les argiles et les limons fins constituent un groupe homogène sur l'axe2 en positive. L'altitude se trouve seul le long de l'axe3 en négatif.

Ces résultats confirment ceux développés ci-dessus sur les relations entre propriétés des sols et climat : la variable climatique « température » est toujours corrélée négativement à la teneur en COS, quelque soit la texture des sols. La pluviosité intervient plutôt sur les pH et le COS des sols sableux. Le COS est corrélé positivement aussi à la teneur en ALF pour les sols argileux.

Tous ces résultats démontrent que la température et la pluviosité agissent au niveau des propriétés des sols. Il reste à explorer si ces constituants sont sensibles ou non à ces deux variables du climat.

3.3.2 Régression entre signatures spectrales et variables climatiques

Lors des régressions PLS, les valeurs du coefficient de détermination R^2 expriment l'importance des relations entre les différentes bandes qui constituent les spectres et la température et la pluviosité.

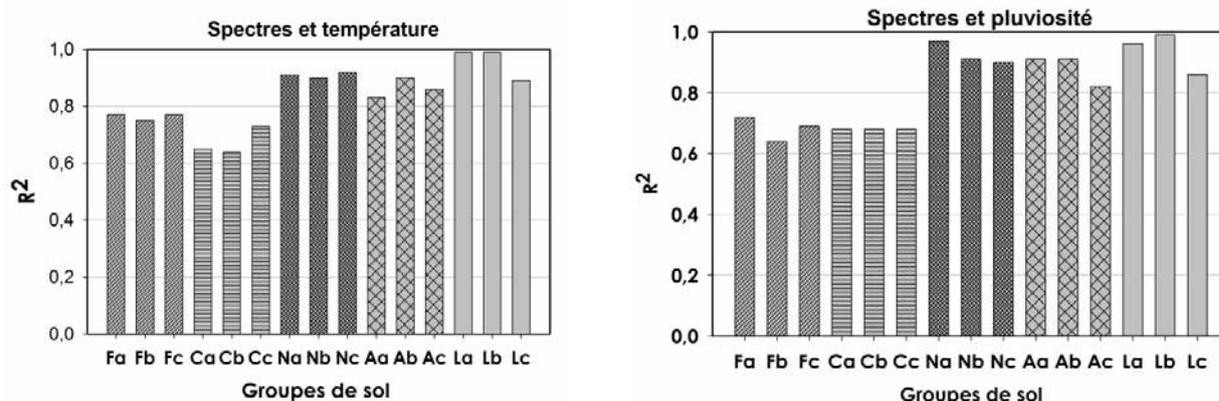
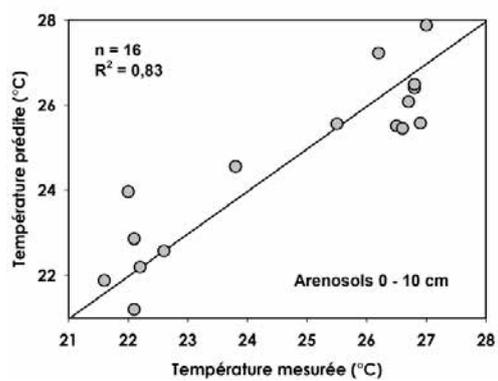
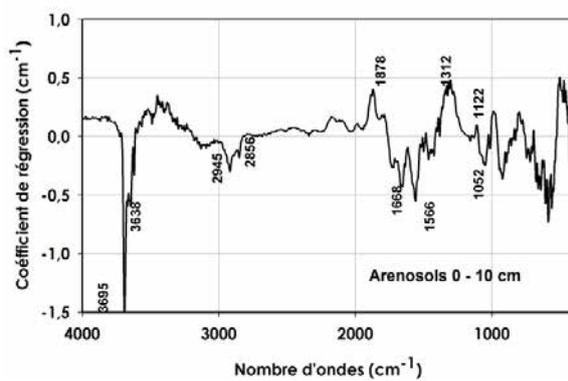
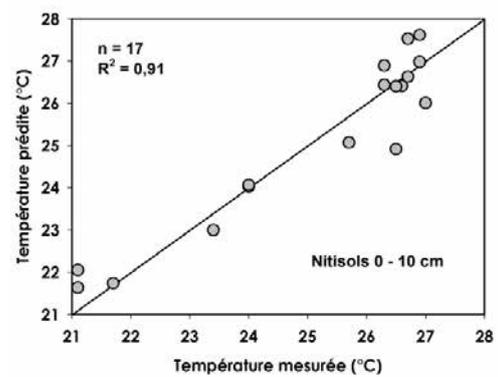
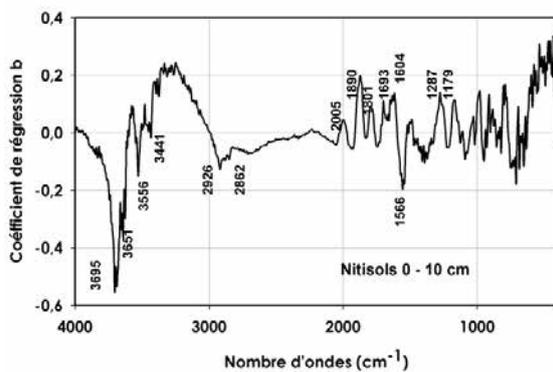
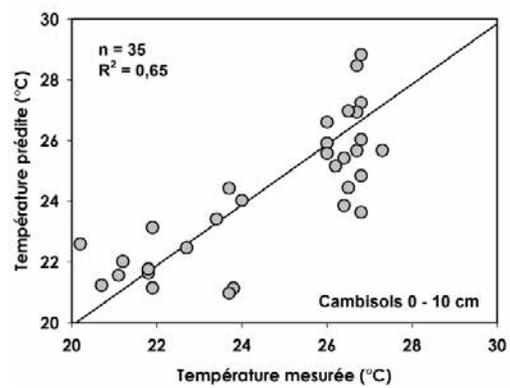
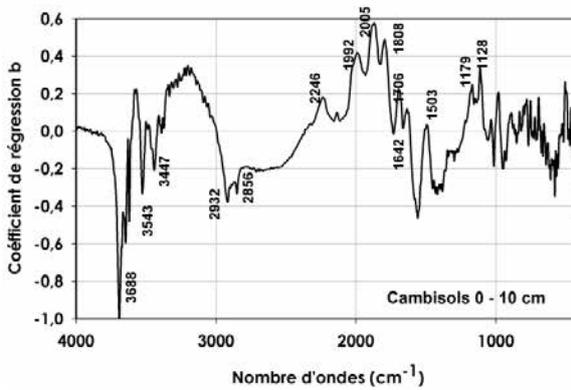
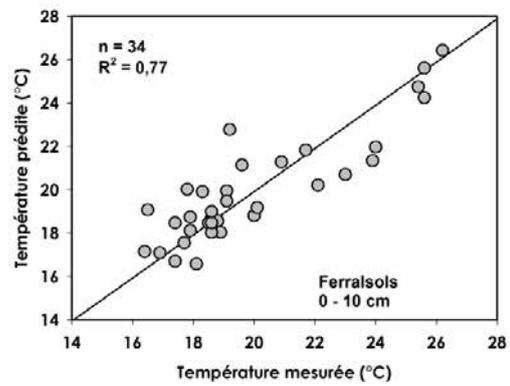
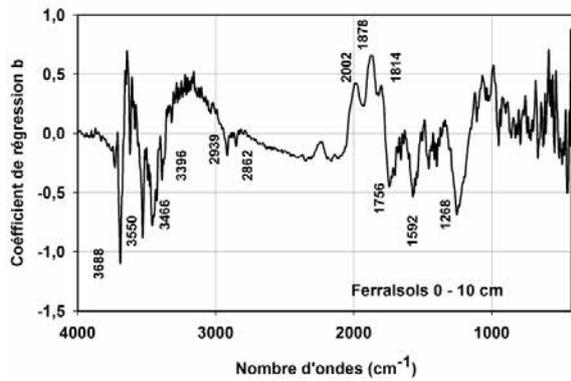


Figure 6-11 : Coefficient de détermination R^2 des PLSR entre « spectres des sols et les variables température et pluviosité moyenne » par groupe de sol et sur 30cm de profondeur (F: ferralsols, C: cambisols, N: nitisols, A: arenosols, L: luvisols/ a: 0-10 cm, b: 10-20 cm, c: 20-30 cm)

Sur la figure 6-11, les valeurs de R^2 ne diffèrent pas sur 30 cm de profondeur. Les ferralsols et les cambisols affichent les valeurs les moins élevées tant avec la température qu'avec la pluviosité. Les R^2 restent en dessous de 0,8 pour ces sols. Les luvisols ont les valeurs les plus élevées pour ces deux variables du climat.

3.3.2.1 Régression avec la température



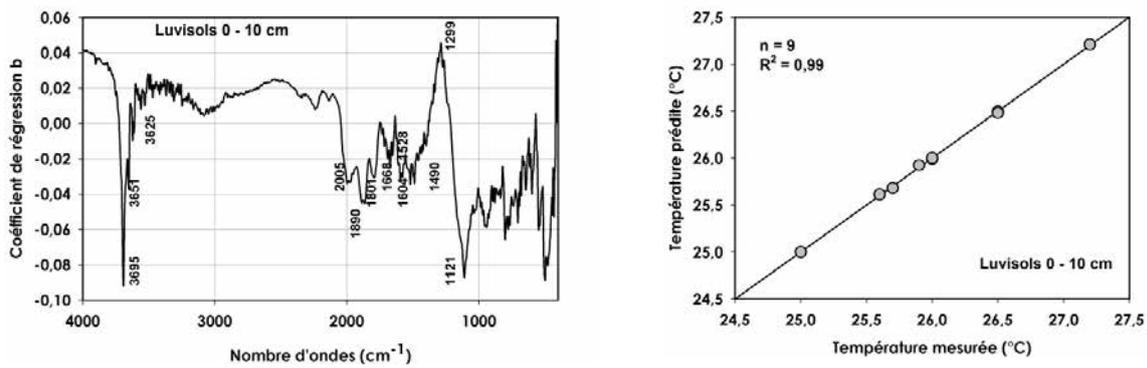


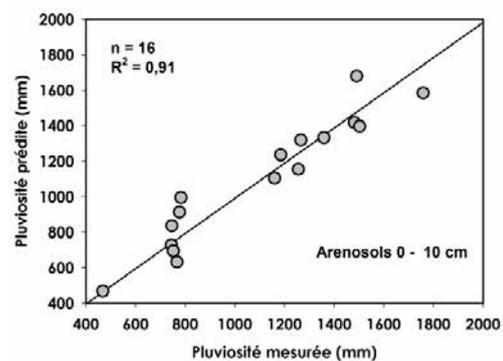
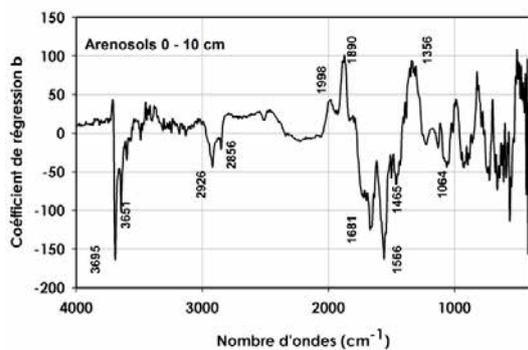
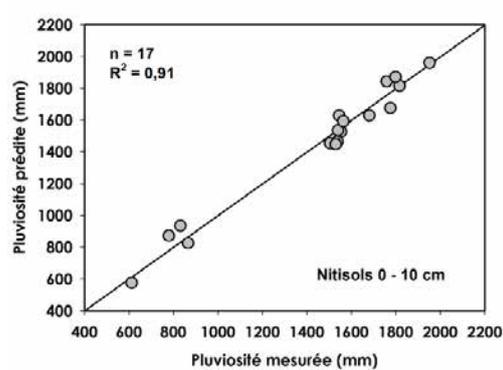
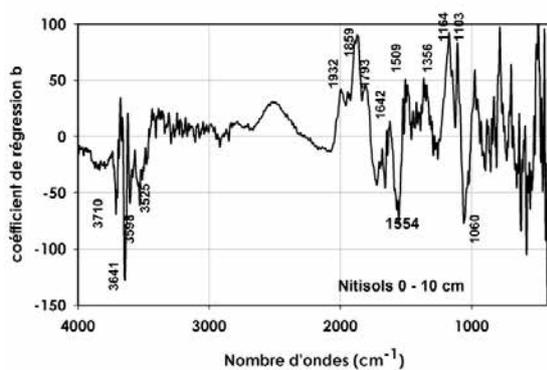
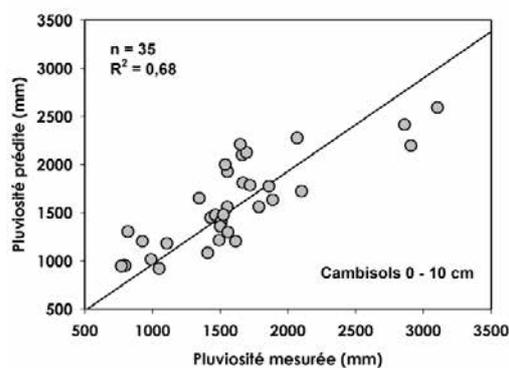
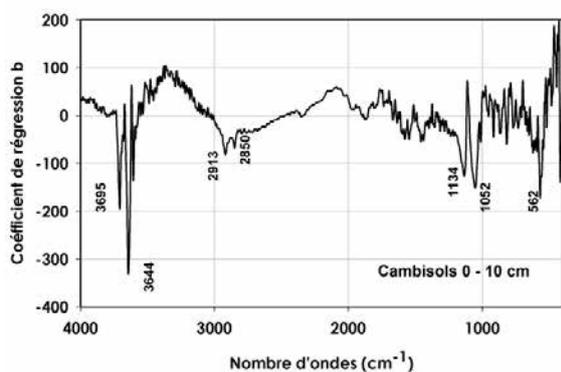
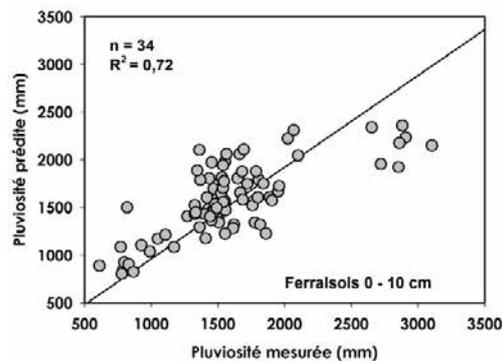
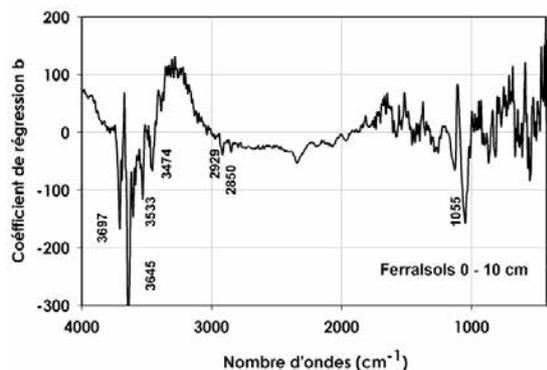
Figure 6-12 : Loading et température mesurée vs température prédite

En moyen infrarouge (MIR), les bandes relatives à la kaolinite se trouvent aux environs de 3694 cm^{-1} , 3655 cm^{-1} , 3622 cm^{-1} , 1116 cm^{-1} , 1105 cm^{-1} , 1020 cm^{-1} et celles correspondant à la gibbsite proches de 3622 cm^{-1} , 3525 cm^{-1} , 3450 cm^{-1} , 3392 cm^{-1} (Nguyen *et al.*, 1991; Balan *et al.*, 2006; Bardy *et al.*, 2008). Sur la partie négative des loadings issus des PLS avec la température (figure 13), les bandes à kaolinite sont présentes dans les loadings de tous les groupes de sol : elles sont aux environs de 3688 cm^{-1} pour les ferralsols, 3695 cm^{-1} et 3638 cm^{-1} pour les cambisols, 3695 cm^{-1} , 3651 cm^{-1} pour les nitisols, 3695 cm^{-1} et 3638 cm^{-1} pour les arenosols et 3695 cm^{-1} , 3651 cm^{-1} et 1121 cm^{-1} pour les luvisols. Les pics de gibsites apparaissent exclusivement pour les sols à texture argileuse : vers 3550 cm^{-1} et 3466 cm^{-1} et 3396 cm^{-1} pour les ferralsols, 3543 cm^{-1} et 3447 cm^{-1} pour les cambisols et 3556 cm^{-1} et 3651 cm^{-1} pour les nitisols. Il a été constaté aussi la présence des bandes à quartz sur le loading des luvisols, en négative, aux environs de 2005 cm^{-1} , 1890 cm^{-1} , 1801 cm^{-1} .

A part les éléments minéraux, des bandes relatives à des composés organiques sont également exprimées sur les loadings. Les bandes proches de 2922 cm^{-1} et 2853 cm^{-1} sont attribuées à des produits aliphatiques, dues au mode d'élongation des $-\text{CH}_2$ (Janik *et al.*, 2007; Bardy *et al.*, 2008). A l'exception des luvisols, ces bandes sont présentes pour tous les groupes de sol : aux environs de 2939 cm^{-1} et 2853 cm^{-1} pour les ferralsols, 2932 cm^{-1} et 2856 cm^{-1} pour les cambisols, 2925 cm^{-1} et 2862 cm^{-1} pour les nitisols, 2945 cm^{-1} et 2856 cm^{-1} pour les luvisols. Les acides carboxyliques $-\text{COOH}$ peuvent être rencontré aux environs de 1756 cm^{-1} , les bandes aux amides I avec les liaisons $\text{C}=\text{O}$ proches de 1653 cm^{-1} , les amides II entre 1653 cm^{-1} et 1600 cm^{-1} et vers 1556 cm^{-1} et la déformation des $-\text{CH}$ des aromatiques proches de 1238 cm^{-1} (Janik *et al.*, 2007; Artz *et al.*, 2008). Les bandes attribuées aux amides sont présentes sur les loadings de ces 5 groupes de sol et les acides carboxyliques seulement pour les ferralsols.

Les coefficients de détermination R^2 les plus élevés ont été obtenus avec les luvisols ($R^2 = 0,99$), les arenosols ($R^2 = 0,83$) et les nitisols ($R^2 = 0,91$).

3.3.2.2 Régression avec la pluviosité



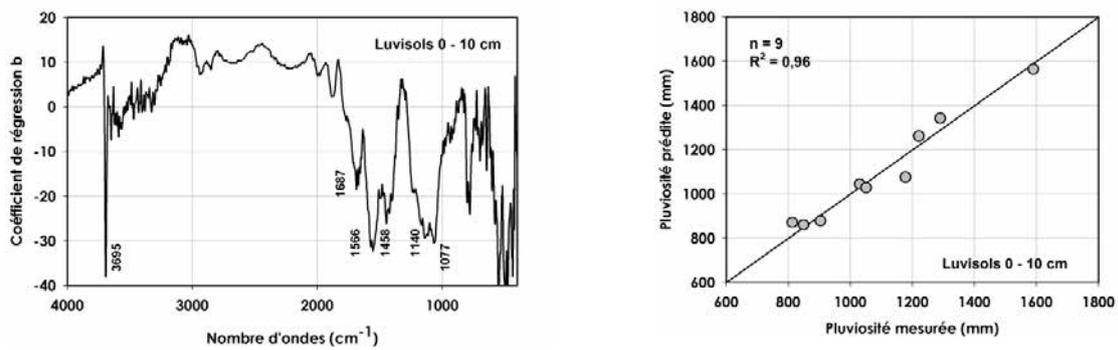


Figure 6- 13 : Loading et pluviosité mesurée vs pluviosité prédite

Dans la même tendance que les résultats avec la température, ce sont les nitisols, les arenosols et les luvisols qui affichent des valeurs de R^2 les plus élevées avec la pluviosité (figure 6-13). Les bandes à kaolinite sont présentes aux environs de 3694 cm^{-1} et de 3655 cm^{-1} pour tous les groupes de sol. D'autres bandes à kaolinite, dues à la vibration de déformation angulaire des Al-OH, ont été identifiées proches de 1105 cm^{-1} et 1116 cm^{-1} (Ip *et al.*, 2008) dues à la vibrations des Al-O-Si aux environs de 1020 cm^{-1} (Nguyen *et al.*, 1991; Viscarra Rossel *et al.*, 2008a). Ces bandes sont présentes sur le loading (figure 6-13) des ferralsols aux environs de 1055 cm^{-1} , 1062 cm^{-1} pour les cambisols, 1064 cm^{-1} pour les arenosols et 1077 cm^{-1} pour les luvisols. Seul les ferralsols et les nitisols ont des bandes à gibbsite, respectivement aux environs de 3533 cm^{-1} , 3474 cm^{-1} et 3598 cm^{-1} , 3525 cm^{-1} . Pour le cas des matières organiques, les régressions entre les spectres et la pluviosité ont montré que les amides I et II son présents uniquement sur le loading des nitisols (1554 cm^{-1}), des arenosols (1681 cm^{-1} , 1566 cm^{-1}) et des luvisols (1687 cm^{-1} , 1566 cm^{-1}). Les bandes attribuées aux produits aliphatiques (proches de 2922 cm^{-1} et 2853 cm^{-1}) ne sont pas significatives pour les sols à texture argileuse : ferralsols, cambisols et nitisols. Ces mêmes bandes sont absentes dans le loading des luvisols. Par contre, le loading des arenosols affichent 2 bandes à alkyl $-\text{CH}_2$ (produits aliphatiques) très nettes aux environs de 2926 cm^{-1} et 2856 cm^{-1} . Toujours pour les arenosols, une bande due à la vibration de déformation angulaire des alkyl $-\text{CH}_2$ a été identifiée aussi vers 1458 cm^{-1} .

Des agents chimiques, biologiques et physiques interviennent lors des processus d'altération des roches mères. Les variables climatiques « température et pluviosité » font partie de ces agents actifs contribuant à la désagrégation des roches. Pourtant, les activités de l'eau varient selon la température (Pedro et Delmas, 1980). D'après Ducauffour (1991), l'eau ne peut agir efficacement que lorsque la température dépasse un certain seuil, ainsi l'altération chimique ne peut se réaliser que dans des climats suffisamment chauds et humides. D'après les processus de formation et d'évolution des sols, les minéraux issus de l'altération se divisent en minéraux primaires et secondaires. Les minéraux primaires dits *hérités* comme le quartz, proviennent directement du complexe d'altération. Les minéraux secondaires proviennent soit d'une

transformation aboutissant à des argiles transformées ou à des gels amorphes après solubilisation (altération biochimique), soit de la néoformation pour le cas des argiles *néoformées* ou la cristallisation pour les oxydes (altération géochimique). Dans des zones tropicales chaudes et humides, les argiles kaolinitiques sont les plus dominantes notamment pour le cas des ferralsols, des cambisols et des nitisols. La monosiallisation et l'allitisation se trouvent accélérer sous ces types de climat, aboutissant à la formation des argiles 1/1 (kaolinites) et des gibbsites (Duchaufour *et al.*, 1991). Dans le cas où le milieu est bien drainé, l'évacuation partielle ou totale de la silice favorise la formation des gibbsites (Segalen, 1956). Ainsi, les gibbsites peuvent apparaître également à l'issue de l'altération des kaolinites suites à une hydrolyse totale. Dans ce même processus de formation et d'évolution des sols, cette phase est appelée « *phase lente* » de l'altération et les minéraux comme les kaolinites et les gibbsites sont dites « *variables lentes* ». Le facteur temps joue un rôle considérable pour l'évolution de ces éléments. Pour les plus vieux sols par exemple, l'altération géochimique date de dizaines de milliers ou de millions d'années.

L'apparition des bandes relatives à la kaolinite et à la gibbsite sur les loadings des régressions signifie qu'il y a des réponses à long terme de la part de ces éléments minéraux vis-à-vis de la température et de la pluviosité. Ce sont surtout les gibbsites qui sont les plus sensibles à la température pour les ferralsols. L'augmentation de la quantité des pluies favorisera l'élimination des silices et par conséquent l'individualisation des hydroxydes d'aluminium pour former les gibbsites. Ceci signifie en d'autres termes qu'une diminution de la pluviosité mène à la diminution de la formation des gibbsites pour ce groupe de sol. La sensibilité des kaolinites par rapport à ces deux variables climatiques peut être expliquée d'une part par la possibilité de lessivage des argiles. C'est le cas par exemple pour les luvisols où le lessivage des argiles est exprimé par l'absence de la bande à 3694 cm^{-1} sur les spectres moyens de ce groupe de sol (voir chapitre 3) et cette même bande est présente sur le loading de la PLS aux environs de 3695 cm^{-1} . Cette bande à kaolinite est donc très sensible à la pluviosité vue la valeur de R^2 (0,96) pour les luvisols. D'autre part, les actions combinées de la température et des eaux de pluies contribuent à l'altération des kaolinites. D'après Pedro (1968), l'alternance des saisons peut modifier la dynamique des sesquioxydes et de la silice. Les argiles kaolinitiques sont détruites pendant la saison pluvieuse. L'aluminium libéré peut se combiner à d'autres éléments pour former les complexes mais ces derniers peuvent être détruits durant la saison sèche et l'aluminium restant s'individualise par la suite (Siefferman, 1969).

Il a été connu que la production primaire nette (PPN), principale source de carbone du sol et de la végétation, est étroitement corrélée à la précipitation annuelle (Williams *et al.*, 2007). La distribution géographique du COS suit la tendance de la pluviosité et régulée par la PPN (Alvarez et Lavado, 1998). En amont, la pluviosité agit sur les matières organiques des sols en tant que facteur déterminant de la production de biomasse, mais elle joue également un grand rôle sur la

décomposition de ces matières dans le sol. La pluviosité intervient indirectement sur la décomposition et la minéralisation des MOS par le biais de la teneur en eau dans le sol. La population microbienne et leur métabolisme, responsable de la décomposition et de la minéralisation, changent avec la teneur en eau du sol. D'après les expérimentations d'Epron *et al.*, (1999), à une température similaire et sur 2 saisons différentes, le flux de CO₂ provenant du sol a connu une variation à cause de la diminution de la teneur en eau du sol, qui a provoqué l'inhibition du flux de CO₂. Ainsi, le COS pourra être sensible à la pluviosité via la teneur en eau du sol.

Les MOS sont qualifiées de « *variables rapides* ». Leurs décompositions et leurs minéralisations peuvent être évaluées à court terme (à l'échelle d'une décennie). La minéralisation des MOS dépend non seulement de leur nature et de leur abondance mais également des facteurs climatiques, en particulier la température et l'humidité (Leiros *et al.*, 1999). D'après Agren et Wetterstedt (2007), tous les mécanismes de décomposition des MOS dépendent de la température. L'effet de la température provoque la stimulation de la décomposition des matières organiques fraîches et humifiées. Sur les loadings des PLS avec la température, les bandes dédiées à des composées organiques sont beaucoup plus importantes. Cette constatation nous permet d'avancer que ces composées sont plus sensibles à la température. Ces bandes identifiées sur les loadings des PLS correspondent surtout à des composées à base de carbone : les amides (groupement fonctionnel -CNO), les produits aliphatiques (vibrations dues à des alkyl -CH₂) et les acides carboxyliques (-COOH). D'après les valeurs de R² sur la figure 6-13, ce sont surtout les sols situés à des températures moyennes annuelles élevées (>21°C) qui sont les plus sensibles à la température : les nitisols (R² = 0,91), les arenosols (R² = 0,83) et les luvisols (R² = 0,99). Cette situation a également été constatée avec la pluviosité, les composés organiques des ferralsols et des cambisols sont moins sensibles. Seul des petits pics attribués à des produits aliphatiques ont été identifiés sur les loadings de ces deux groupes de sol. Pourtant, les arenosols et les luvisols affichent sur leurs loadings avec la pluviosité des bandes très nettes correspondant à d'autres composés organiques : les amides aux environs de 1681 cm⁻¹ et 1566 cm⁻¹. Rappelons que ces deux groupes de sol évoluent sous une faible pluviosité (généralement inférieure à 1600 mm par an). Les arenosols, à texture sableuse, sont les seuls à avoir de la sensibilité à la pluviosité pour les produits aliphatiques : deux bandes très nettes proches de 2926 cm⁻¹ et 2856 cm⁻¹.

3.4 SIMULATION ROTHC

Les dynamiques du stock de carbone du sol des 4 sites choisis ont été étudiées avec le modèle RothC. Les simulations se portaient essentiellement sur 500 ans (2008- 2508) et en comparaison avec le climat actuel: des simulations ont été réalisées avec des parcelles non cultivées et sous *bozaka* (figure 6-14), des parcelles non cultivées sous *bozaka* avec 3 scénarii de changement du climat (figure 6-15 et 6-16), des simulations avec 3 modes de restitution pour la culture de riz pluvial (figure 6-17 et 6-18) et enfin des simulations avec simultanément 3 modes de gestion du riz pluvial et 3 scénarii de changement du climat.

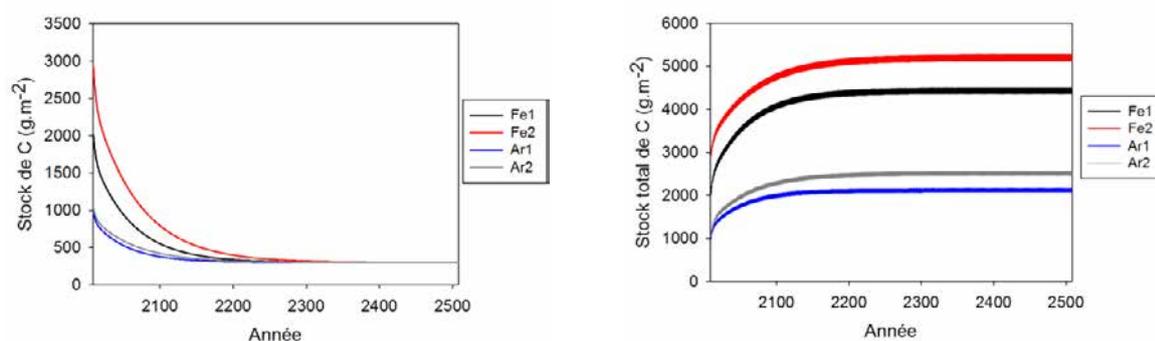


Figure 6-14: Dynamique du stock total de carbone des sols nus (à gauche) et sous « *bozaka* en permanence » (à droite) entre 2008 et 2508 pour les 4 sites

La figure 6-14 montre la dynamique du stock total de carbone du sol : à gauche des sols nus et à droite des parcelles non cultivées et occupées par du *bozaka* entre 2008 et 2508. Rappelons que Fe1 et Fe2 sont des sols à texture argileuse et Ar1 et Ar2 représentent les sols à texture sableuse. Si les parcelles ne présentent aucune couverture végétale, les stocks totaux de carbone du sol tendent vers 0 aux environs de 2200 soit pour une durée de près de 200 ans. Cette disparition progressive du carbone du sol est due à l'absence des couvertures végétales pouvant apporter des matières organiques au sol, à l'absence des apports externes de matière organique et surtout la perte progressive du carbone du sol suite à la décomposition et à la minéralisation des réserves.

Sur 500 ans, les stocks totaux de C ont connu une augmentation pour les 4 sites occupés par du *bozaka* de façon permanente. Cette augmentation a été surtout constatée durant les 200 premières années à partir de 2008 et elle demeure minime au-delà de 2200. Ces résultats montrent que ces sols sont en équilibre et continuent à stocker de la matière organique s'ils restent occupés par du *bozaka* et que ces derniers sont entièrement restitués au sol.

3.4.1 Stock de carbone et changement du climat

Des simulations ont été réalisées afin d'étudier les dynamiques du carbone du sol. Les scénarii relatifs à des changements futurs du climat utilisés étaient au nombre de 4 : le scénario S1 correspond au climat actuel. Avec une diminution de 30% de la pluviosité par rapport à la quantité actuelle, S2 correspond à une augmentation de 1,8°C de la température moyenne, S3 à une augmentation de 2,8°C et S4 à une élévation de 4°C. Ici, les parcelles sont restées non cultivées et sous *bozaka*.

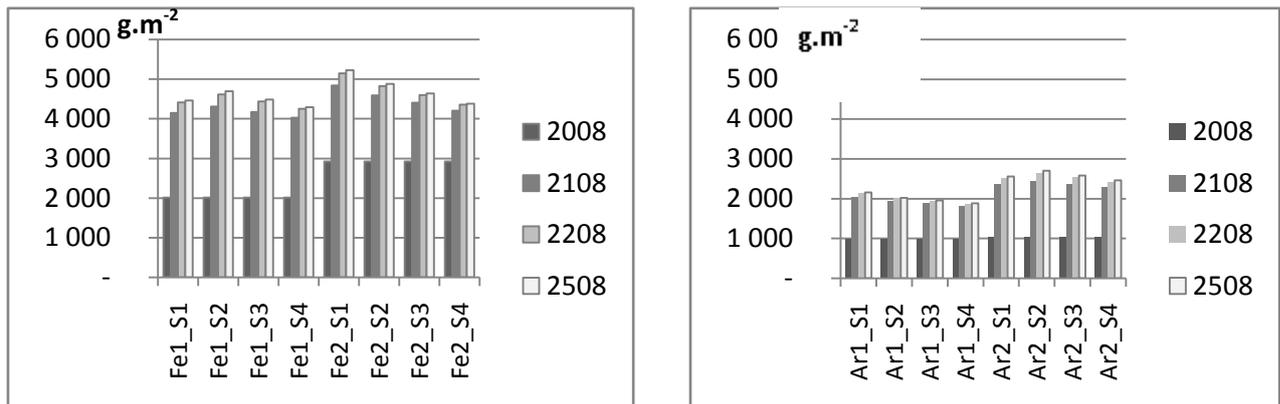


Figure 6-15: Simulations sur le stock total de carbone (g.m^{-2}) suivant les différents scénarii de changement climatique entre 2088 et 2508

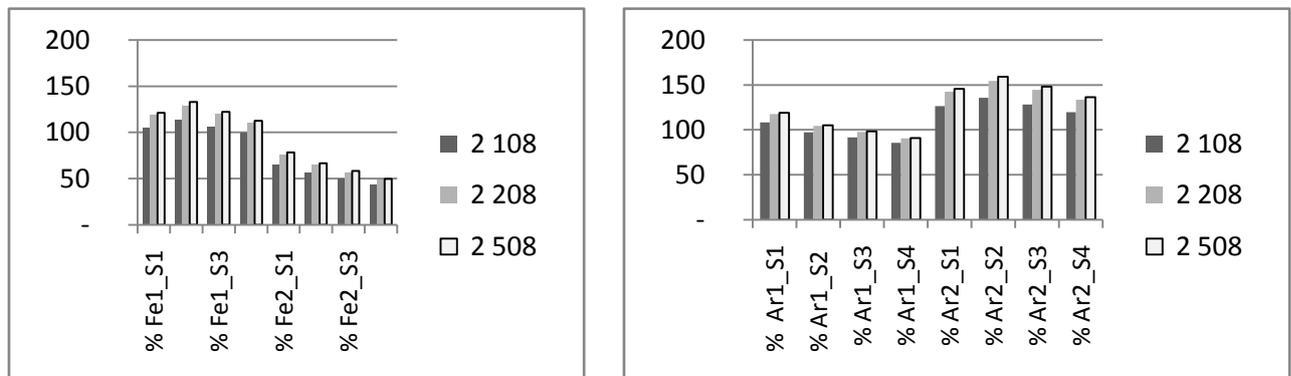


Figure 6-16: Pourcentage d'augmentation des stocks de C avec les scénarii de changement climatique

La figure 6-15 montre que malgré l'augmentation de la température moyenne, les stocks totaux de COS continuent à augmenter sur 500 ans. Par rapport à S1, cette augmentation est de l'ordre de 100 à 130% pour Fe1, de 40 à 80% pour Fe2, de 80 à 120% pour Ar1 et de 120 à 160% pour Ar2 (figure 6-16). Cette situation peut être expliquée par le fait que la quantité de biomasse produite est supérieure à l'équivalent de matière organique décomposée et perdue dans l'atmosphère sous forme de CO₂. D'après Xu *et al.* (2010), l'augmentation de la production primaire nette (PPN) peut compenser la perte en COS. L'augmentation de la température

provoque à la fois l'augmentation de la PPN (qui constitue la principale source de carbone) et l'augmentation du taux de décomposition des matières organiques du sol, un facteur déterminant de la perte en carbone (Kirschbaum, 1995). Pour le Fe1, les stocks de carbone augmentent de 130% avec le scénario S2 (+1,8°C) et diminuent après pour S3 et S4. Pour Fe2, les stocks sont inversement proportionnels à la température. Cette augmentation des stocks pour le cas de Fe1_S2 peut être assimilée à une augmentation de la production de biomasse. En effet, la biomasse totale augmente en général avec l'augmentation de la température du sol et qui descend à une certaine température (Peng et Dang, 2002). La température optimale varie selon les végétations et les espèces considérées. L'augmentation de la respiration des plantes en réponse à l'augmentation de la température est un processus à court terme. A long terme, la respiration des plantes peut s'acclimater à une température élevée (King *et al.*, 2006). Ici pour Fe1 sous *bozaka*, les entrées sont largement supérieures à la quantité de carbone perdue malgré l'augmentation du taux de décomposition des matières organiques du sol suite à l'augmentation de la température moyenne de 1,8°C et de 2,8°C. D'ailleurs, Fe1 se trouve sur les Hautes Terres où la pluviosité annuelle est toujours supérieure à 1300 mm, favorisant ainsi la production de biomasse végétale. Pour le cas des arenosols : les stocks totaux de carbone diminuent avec l'augmentation de la température moyenne. Les stocks avec S2, S3 et S4 demeurent tous inférieurs au stock avec le climat actuel (S1). Ar1 affiche la température moyenne la plus élevée (26,7°C) et une pluviosité annuelle de 1160 mm. Cette température élevée augmente ainsi l'émission de CO₂ dans le sol qui provient essentiellement de la respiration des racines et de la décomposition microbienne des matières organiques (Davidson et Janssens, 2006). Ces CO₂ produits risquent toujours d'être émis et perdus dans l'atmosphère. Les résultats avec Ar2 ressemblent à ceux trouvés avec Fe1 : les stocks augmentent avec le scénario S2 et diminuent avec S3 et S4. Rappelons qu'Ar2 a une température moyenne de 22,1°C et une pluviosité annuelle de 752 mm. La sensibilité à la température de la respiration du sol diminue avec l'augmentation de la température et la diminution de l'humidité du sol (Flanagan et Johnson, 2005). Les scénarii d'augmentation de la température et de diminution de la pluviosité de 30% ne font que favoriser cette baisse de la respiration donc une diminution de la perte en CO₂. L'humidité du sol se trouve très limitée avec une pluviosité annuelle initiale de 752 mm, d'où une augmentation de plus de 120% des stocks de C.

Les résultats des stocks de carbone du sol avec ces différents scénarii de changement du climat (augmentation de la température et diminution de la pluviosité) expliquent que le carbone du sol n'est pas uniquement conditionné par la température et l'humidité mais plutôt par la présence de la végétation en surface et le niveau de restitution de celle-ci. Les simulations ont montré que les augmentations de la température n'ont pas conduit systématiquement à une diminution des stocks de carbone sur une période de 500 ans. L'effet de l'augmentation de la température a été seulement constaté sur le niveau ou le pourcentage d'augmentation des

stocks. Il est moins élevé avec des températures moyennes supérieures à celles qui sévissent actuellement. Ainsi, nous pouvons en déduire que le carbone organique du sol n'est pas sensible aux changements du climat tant que la restitution de biomasse au sol est assurée.

3.4.2 Stock de carbone et changement d'usage des terres

Afin d'évaluer l'importance du changement d'usage des terres sur la dynamique du carbone du sol, 3 scénarii ont été testés pour les simulations. Le scénario SF0 correspond à une culture de riz pluvial sans apport de fertilisant et ni restitution des biomasses aériennes (paille de riz). SF1 représente le scénario d'une mise en place du riz pluvial avec 0% de restitution de la biomasse aérienne et un apport de 5 Mg.ha⁻¹ de fumier, SF2 avec 100% de restitutions des biomasses et un apport de 5 Mg.ha⁻¹ de fumier.

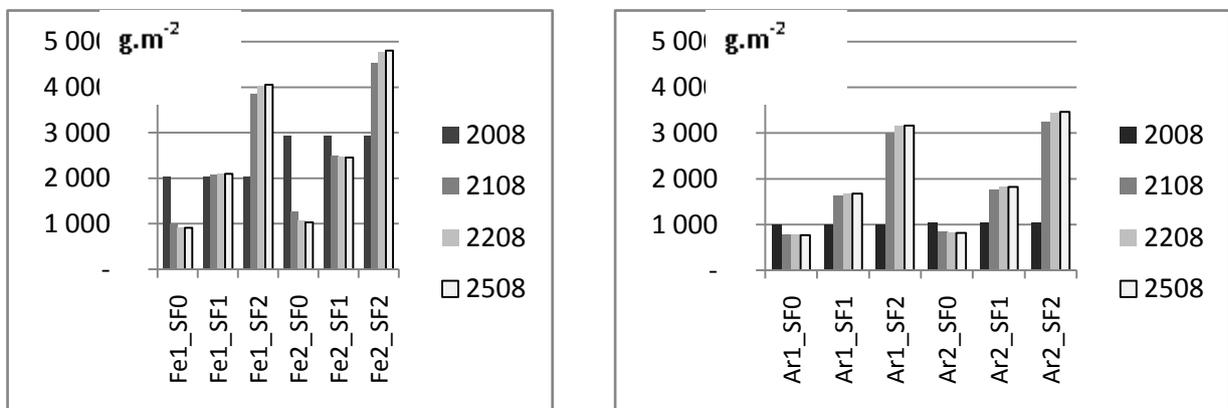


Figure 6-17: Stock total de carbone entre 2008 et 2508 pour les scénarii de changement d'usage des terres

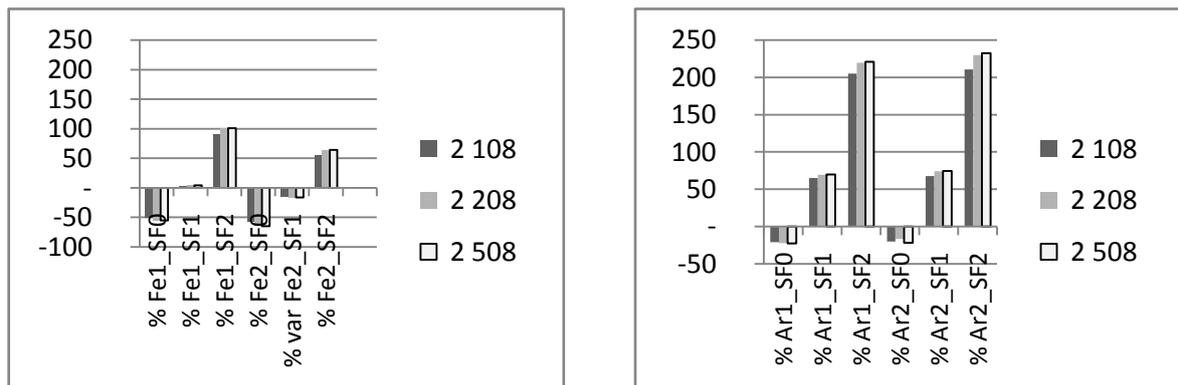


Figure 6-18: Pourcentage de variation des stocks totaux de C pour les scénarii de changement d'usage des terres

Les simulations avec les différents modes d'usage des terres montrent que les stocks totaux de carbone du sol (figure 6-17) diminuent significativement quand il n'y a pas de restitution des

pailles de riz (scénario SF0). Sur la figure 6-17, cette diminution est beaucoup plus importante pour le cas des ferralsols avec un pourcentage de diminution de l'ordre de 60% par rapport au stock initial alors qu'elle est seulement d'environ 22% pour les arenosols. Toujours en privant le sol des biomasses produites mais en apportant 5 Mg.ha⁻¹ de fumier (SF1), une faible augmentation ($\approx 4\%$) a été constatée pour Fe2 et une augmentation de 60 à 70% des stocks de C pour les arenosols. Le bilan reste négatif pour le cas de Fe1. SF2 demeure le scénario idéal qui permet d'accroître significativement les stocks de C du sol de plus de 200% pour les arenosols par rapport à l'état initial (2008) et de 50 à 100% pour les ferralsols.

Ces résultats confirment qu'un apport de 5 Mg.ha⁻¹ de fumier ne suffit pas à faire augmenter les stocks totaux de carbone du sol pour les ferralsols en cas d'absence de restitution des pailles de riz (SF1). Par contre, il a été constaté que les stocks augmentent toujours pour le cas des sols sableux (Ar1 et Ar2) malgré l'absence des restitutions des biomasses aériennes (scenarii SF1 et SF2).

Les stocks affichés sur la figure 6-16 illustrent la sensibilité du carbone du sol aux modes d'usage des terres. Les stocks augmentent avec le niveau de restitution réalisé. Pour les ferralsols, une restitution de la totalité des biomasses produites est la seule option pour éviter une diminution des stocks. Pour le cas des arenosols, le maintien du niveau actuel des stocks peut être réalisé par un apport de 5 Mg.ha⁻¹ de fumier à la place d'une restitution des pailles de riz.

Ces résultats nous permettent de conclure que les zones à pseudo-steppes non cultivées sont en équilibre par rapport aux systèmes cultivés. Les différences au niveau des stocks sur les différents scenarii adoptés entre les 4 sites étudiés sont dues à l'hétérogénéité de la pluviosité annuelle. En effet, la décomposition des matières organiques est beaucoup plus importante pour les zones à la fois humides et chaudes (Fe1 et Fe2). C'est ce qui explique ainsi la faible augmentation des stocks pour les ferralsols par rapport aux arenosols avec le scénario SF2. Cette décomposition est beaucoup plus lente dans les zones moins humides (Ar1 et Ar2) d'où une augmentation significative des stocks de carbone dès qu'il y a eu des restitutions.

3.4.3 Changement du climat et changement d'usage des terres

Les simulations précédentes ont pour but d'étudier séparément l'effet du climat et l'effet du changement d'usage des terres sur le stock total de carbone du sol. Cette fois-ci, l'objectif est d'identifier la sensibilité du carbone du sol par rapport à ces deux types de changement. Des scenarii qui relatent des changements climatiques combinés à des changements d'usage ont été testés pour le cas de la riziculture pluviale. Pour y procéder, les scenarii relatifs au climat S1, S2, S3 et S4 ont été retenus. Ces scenarii ont été croisés avec SF0, SF1 et SF2.

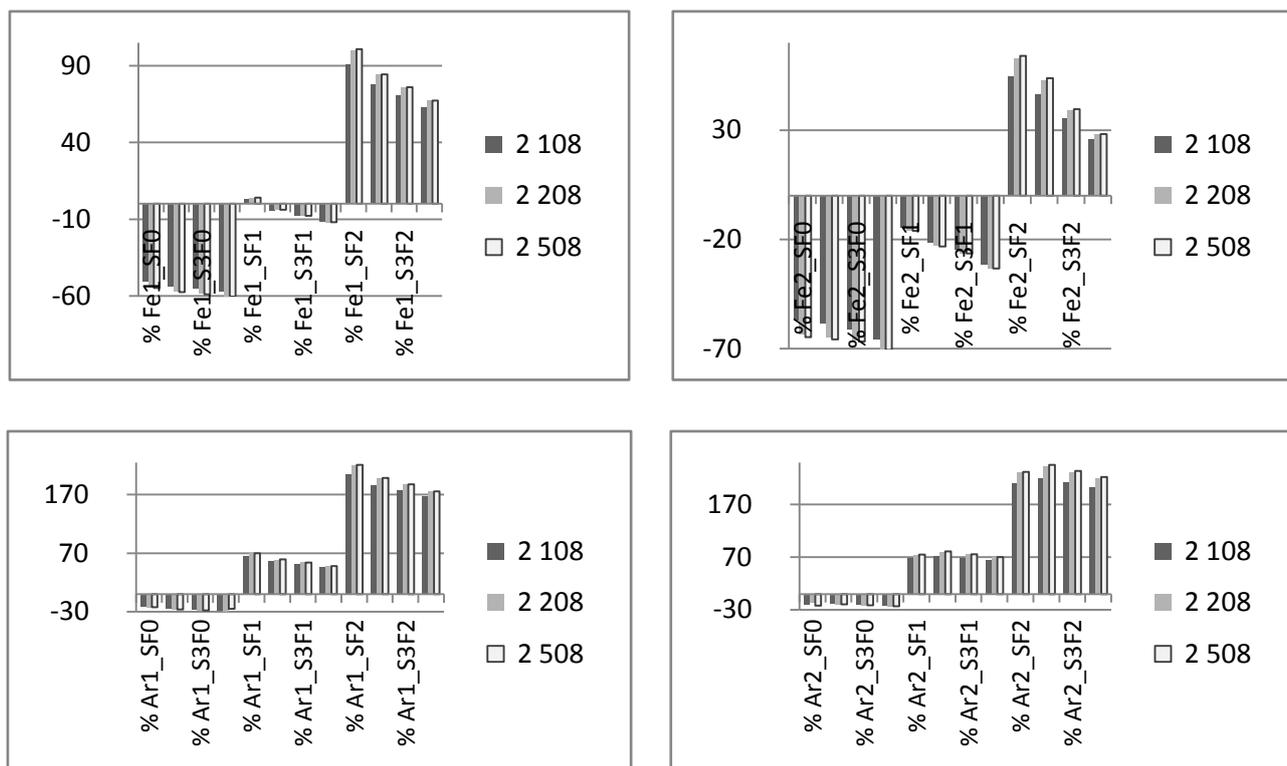


Figure 6-19: Pourcentage de variation des stocks de C pour les scénarii combinés de changement du climat et de changement d’usage des terres

Les tendances suivantes ont été constatées sur les résultats affichés sur la figure 6-19:

- La diminution des stocks de C par rapport à l’état initial s’accroît avec l’augmentation de la température
- Le pourcentage d’augmentation des stocks par rapport au stock initial diminue avec l’augmentation de la température
- Les ferralsols sont plus sensibles aux modes d’usage par rapport aux arenosols, l’augmentation des stocks pour les ferralsols ont été obtenus uniquement avec les scénarii correspondant à la fois à une restitution complète des biomasses aériennes et à un apport de 5 Mg.ha⁻¹ de fumier
- Le pourcentage d’augmentation des stocks de C des arenosols avec les scénarii S1F2, S2F2, S3F2 et S4F2 est deux fois supérieur à celui des ferralsols

En comparant ces résultats avec ceux trouvés avec les scénarii séparés de changement climatique et de changement d’usage, nous avons pu constater que le carbone du sol est plutôt sensible au changement d’usage des terres qu’au changement du climat. Une grande variation des stocks totaux de C apparaît dès qu’on change de mode d’usage. Pourtant, une

augmentation de la température moyenne entre 1,8°C et 4°C et une diminution de 30% de la pluviosité annuelle provoquent toujours une augmentation des stocks.

D'après Lugato et Berti (2008), les pratiques de gestion des terres affectent plus la balance de carbone des agro-écosystèmes que le changement du climat. Les résultats obtenus dans la présente étude avec le modèle RothC confirment que le carbone du sol est largement sensible aux modes d'usage. La sensibilité envers le changement du climat ne se manifeste tant que le sol reste couvert par du *bozaka*.

4- CONCLUSION

Evaluer la sensibilité des sols malgaches au climat a été le principal objectif de la présente étude. La connaissance de la sensibilité actuelle permet de réaliser une prédiction et une projection sur la sensibilité future des sols aux changements climatiques. La sensibilité à la température et à la pluviosité des sols a été analysée d'une part à partir des couleurs du sol et d'autre part avec leurs signatures spectrales. Connaissant l'importance du carbone organique parmi les propriétés des sols, la sensibilité de celui-ci aux changements du climat et aux changements d'usage des terres a été analysée avec le modèle de dynamique de carbone RothC. Les ACP et les régressions PLS réalisées entre les variables transformées de couleurs RVB et Munsell à l'état sec et humide ont permis de constater que la couleur ne peut être utilisée comme indicateur de sensibilité pour les ferralsols, cambisols et luvisols. Par contre des corrélations entre certaines modèles de couleurs et les variables climatiques ont été trouvées pour le cas des nitisols et des arenosols. En utilisant les spectres MIR, les régressions PLS ont présenté l'existence d'éléments minéraux et organiques du sol susceptibles d'être sensibles à ces deux variables climatiques. Les valeurs du coefficient de détermination R^2 ont montré qu'il n'y a pas de grande différence de sensibilité sur 0-30 cm de profondeur. Ce sont surtout les nitisols, les luvisols et les arenosols qui ont des valeurs de R^2 les plus élevées à la fois avec la température et la pluviosité. La présence des bandes relatives à des éléments minéraux (kaolinite et gibbsite) sur les loadings signifient qu'il y a des réponses à long terme pour ces éléments par rapport aux deux variables climatiques. Les gibbsites sont les plus sensibles pour les ferralsols. Les kaolinites sont plutôt sensibles à la pluviosité, suite à la possibilité de présence de lessivage et d'altération éventuelle des argiles, notamment pour les luvisols. La présence d'un grand nombre de bandes relatives à des composés organiques sur les loadings avec la température nous a permis d'avancer que ces composés sont plus sensibles à la température. En analysant la dynamique du carbone du sol vis-à-vis des différents scénarii de changement du climat et des changements d'usage des terres, les simulations avec le modèle RothC ont fait sortir que le carbone du sol n'est pas sensible à une augmentation jusqu'à 4°C par rapport à la température actuelle à condition que les sols

demeurent occupés par du *bozaka* en permanence. La conversion de ces parcelles en culture de riz pluvial fertilisé avec $5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de fumier a montré que le carbone des ferralsols situés dans des zones chaudes et humides est très sensible pour un niveau de restitution des biomasses assez faible. Ces analyses nous a permis de conclure que sur les 4 sites étudiés, le carbone du sol est plutôt sensible aux modes d'usage qu'au changement du climat.

Références bibliographiques

- Adderley, W.P., Simpson, I.A. and Davidson, D.A., 2002. Colour description and quantification in mosaic images of soil thin sections. *Geoderma*, 108: 181-195.
- Agren, G.I. and Bosatta, E., 2002. Reconciling differences in predictions of temperature responses of soil organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 24: 129-132.
- Agren, G.I. and Wetterstedt, J.A.M., 2007. What determines the temperature response of soil organic matter decomposition? *Soil Biology & Biochemistry*, 39: 1794-1798.
- Aïchi, H., Fouad, Y., Walter, C., Viscarra Rossel, R.A., Lili Chabaane, Z. and Sanaa, M., 2009. Regional predictions of soil organic carbon content from spectral reflectance measurements. *Biosystems Engineering*, 104(3): 442-446.
- Alvarez, A. and Lavado, R.S., 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma*, 83: 127-141.
- Artz, R.R.E., Chapman, S.J., Jean Robertson, A.H., Potts, J.M., Laggoun-Défarge, F., Gogo, S., Comont, L., Disnar, J.-R. and Francez, A.-J., 2008. FTIR spectroscopy can be used as a screening tool for organic matter quality in regenerating cutover peatlands. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(2): 515-527.
- Aubert, G. and Bourgeat, F., 1972. Les sols ferrallitiques à Madagascar. *Revue de Géographie de Madagascar*, 20: 1-23.
- Balan, E., Lazzeri, M., Morin, G. and Mauri, F., 2006. First-principles study of the OH-stretching modes of gibbsite. *American Mineralogist*, 91: 115-119.
- Bardy, M., Fritsch, E., Derenne, S., Allard, T., do Nascimento, N.R. and Bueno, G.T., 2008. Micromorphology and spectroscopic characteristics of organic matter in waterlogged podzols of the upper Amazon basin. *Geoderma*, 145(3-4): 222-230.
- Barrett, L.R., 2002. Spectrophotometric color measurement in situ in well drained sandy soils. *Geoderma*, 108: 49-77.
- Barrios, E., 2007. Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics*.
- Barron, V. and Torrent, J., 1984. Influence of aluminum substitution on the color of synthetic hematites. *Clays and Clay Minerals*, 32(2): 157-158.
- Ben-Dor, E. and Singer, A., 1987. Optical density of vertisol clays suspensions in relation to sediment volume and dithionite—citrate—bicarbonate extractable iron. *Clays and Clay Minerals*, 35(311-317).
- Bourgeat, F. and Aubert, G., 1972. Les sols ferrallitiques à Madagascar. *Madagascar revue de géographie*, Université de Madagascar: 1-23.
- Çeşmeci, D. and Güllü, M.K., 2009. Phase-correlation-based hyperspectral image classification using multiple class representatives obtained with k-means clustering. *International Journal of Remote Sensing*, 30(14): 3827-3834.
- Chang, C.-W., Laird, D.A., Mausbach, M.J. and Hurburgh Jr., C.R., 2001. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy—Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 480-490.
- Chang, C.-W., Laird, D.A., Mausbach, M.J. and Hurburgh Jr., C.R., 2011. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy—Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 480-490.
- Churchman, G.J., Slade, P.G., Self, P.G. and Janik, L.J., 1994. Nature of Interstratified Kaolin-smectites in Some Australian Soils. *Australian Journal of Soil Research*, 32: 805-822.

- Cobo, J.G., Dercon, G., Yekeye, T., Chapungu, L., Kadzere, C., Murwira, A., Delve, R. and Cadisch, G., 2010. Integration of mid-infrared spectroscopy and geostatistics in the assessment of soil spatial variability at landscape level. *Geoderma*, 158(3-4): 398-411.
- Coventry, R.J. and Robinson, P.J., 1981a. Colour groups derived from numerical classification of the munsell soil colour chips, pp. 103-112.
- Coventry, R.J. and Robinson, P.J., 1981b. Colour Groups Derived from Numerical Classification of the Munsell Soil Colour Chips. *Australian Journal of Soil Research*, 19: 103-112.
- CPCS, 1967. Classification des sols. Travaux C.P.C.S. Rapp. Mult. 96p.
- Dabin, B., 1984-1985. Les sols tropicaux acides. Cahier ORSTOM, Série Pédologique, XXI(1): 7-19.
- Dabin, B., 1985. Les sols tropicaux acides. Cahier ORSTOM, Série Pédologique, XXI: 7-19.
- Dale, V.H. and Polasky, S., 2007. Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. *Ecological Economics*, 64(2): 286-296.
- Davidson, E.A. and Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440: 165-173.
- Delenne, M.F. and Pelletier, F., 1981. Carte du potentiel des unités Physiques, au 1:1 000 000. ORSTOM. Bondy, France.
- Do Nascimento, N.R., Bueno, G.T., Fritsch, E., Herbillon, A.J., Allard, T., Melfi, A.J., Astolfo, R., Boucher, H. and Li, Y., 2004. Podzolization as a deferralitization process: a study of an Acrisol-Podzol sequence derived from palaeozoic sandstones in the northern upper Amazon Basin. *European Journal of Soil Science*, 55: 523-538.
- Droogers, P., 2004. Adaptation to climate change to enhance food security and preserve environmental quality: example for southern Sri Lanka. *Agricultural Water Management*, 66: 15-33.
- Du, C., Linker, R. and Shaviv, A., 2008. Identification of agricultural Mediterranean soils using mid-infrared photoacoustic spectroscopy. *Geoderma*, 143(1-2): 85-90.
- Duchaufour, P., Souchier, B. and Bonneau, M., 1991. Pédologie. Tome 2 : Constituants et propriétés du sol. Edition Masson (Paris-FRA): 459p.
- Easterling, W. and Apps, M., 2005. Assessing the consequences of climate change for food and forest resources: A view from the IPCC. *Climatic Change* 70: 165-189.
- Ebeid, M.M., Lal, R., Hall, G.F. and Miller, E., 1995. Erosion effects on soil properties and soybean yield of a Miamian soil in Western Ohio in a season with below normal rainfall. *Soil Technology*, 8: 97-108.
- Epron, D., Farque, L., Lucot, É. and Badot, P.-M., 1999. Soil CO₂ efflux in a beech forest: dependence on soil temperature and soil water content. *Ann. For.Sci*, 56: 221-226.
- Eschenbrenner, V., 1988. Les glébules des sols de Côte d'Ivoire. Nature et origine en milieu ferrallitique. Modalités de leur concentration. Rôle des termites. *Thèse de Doc. es Sci.*, 498 p.+ 282 p. Publié en 1988, *ORSTOM*, T.D.M., n°39.
- Falinirina, V., 2010. Valorisation agricole des apports organiques contenus dans les déchets urbains: qualité des matières organiques et service écosystémiques. Thèse de Doctorat. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques- Université d'Antananarivo. 173 pages.
- Falloon, P., Jones, C.D., Cerri, C.E., Al-Adamat, R., Kamoni, P., Bhattacharyya, T., Easter, M., Paustian, K., Killian, K., Coleman, K. and Milne, E., 2007. Climate change and its impact on soil and vegetation carbon storage in Kenya, Jordan, India and Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 122(1): 114-124.

- FAO, 1974. Carte pédologique de Madagascar.
- Farina, R., Seddaiu, G., Orsini, R., Steglich, E., Roggero, P.P. and Francaviglia, R., 2011. Soil carbon dynamics and crop productivity as influenced by climate change in a rainfed cereal system under contrasting tillage using EPIC. *Soil & Tillage Research*, 112: 36-46.
- Feller, C. and Beare, M.H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79: 69-116.
- Feller, C., Fritsch, E., Poss, R. and Valentin, C., 1991. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'ouest, en particulier). *Cahier ORSTOM, Série Pédologique*, XXVI(1): 25-36.
- Fernandez, R.N., Schulze, D.G., Coffin, D.L. and Van Scoyocn, G.E., 1988. Color, organic carbon, and pesticide adsorption relationships in a soil landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52: 1023-1026.
- Flanagan, L.B. and Johnson, B.G., 2005. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130: 237-253.
- Foucart, T., 1997. L'analyse des données, mode d'emploi. Presse Universitaire de Rennes: 188p.
- Fritsch, E., Morin, G., Bedidi, A., Bonnin, A., Balan, E., Caquineau, S. and Calas, G., 2005. Transformation of hematite and Al-poor goethite to Al-rich goethite and associated yellowing in a ferrallitic clay soil profil of the middle Amazon Basin (Manaus, Brazil). *European Journal of Soil Science*, 56: 575-588.
- Grinand, C., Rajaonarivo, A., Bernoux, M., Pajot, V., Brossard, M., Razafimbelo, T.M., Albrecht, A. and Le Martret, H., 2009. Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols*, 16(1): 23-33.
- Guerrero, C., Rossel, R.A.V. and Mouazen, A.M., 2010. Special issue [']Diffuse reflectance spectroscopy in soil science and land resource assessment'. *Geoderma*, 158(1-2): 1-2.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G. and Jarvis, A., 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25: 1965-1978.
- Howden, S.M., Soussana, J.-F., Tubllo, F.N., Chhetri, N., Dunlop, M. and Melnke, H., 2007. Adapting agriculture to climate change. *PNAS*, 104(50): 19691-19696.
- Ip, K.H., Stuart, B.H., Ray, A.S. and Thomas, P.S., 2008. A spectroscopic investigation of the weathering of a heritage Sydney sandstone. *Spectrochimica Acta Part A*, 71: 1032-1035.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, In. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 996.
- Janik, L.J., Forrester, S.T. and Rawson, A., 2009. The prediction of soil chemical and physical properties from mid-infrared spectroscopy and combined partial least-squares regression and neural networks (PLS-NN) analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 97: 179-188.
- Janik, L.J., Merry, R.H. and Skjemstad, J.O., 1998. Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions? *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38: 681-696.

- Janik, L.J. and Skjemstad, J.O., 1995. Characterization and Analysis of Soils Using Mid-infrared Partial Least- Squares. II.* Correlations with Some Laboratory Data. *Australian Journal of Soil Research*, 33: 637-650.
- Janik, L.J., Skjemstad, J.O., Shepherd, K.D. and Spouncer, L.R., 2007. The prediction of soil carbon fractions using mid-infrared-partial least square analysis. *Australian Journal of Soil Research*, 45: 73-81.
- Jenkinson, D.S. and Rayner, J.H., 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, 123: 298-305.
- King, A.W., Gunderson, C.A., Post, W.M., Weston, D.J. and Wullschleger, S.D., 2006. Plant respiration in warmer world. *Science*, 312: 356-357.
- Kirschbaum, M.U.F., 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology & Biochemistry*, 27(6): 753-760.
- Kloprogge, J.T., Mahmutagic, E. and Frost, R.L., 2006. Mid-infrared and infrared emission spectroscopy, of Cu-exchanged montmorillonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 296: 640-646.
- Knorr, W., Prentice, I.C., House, J.I. and Holland, E.A., 2005. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 433: 298-300.
- Konen, M.E., Burras, C.L. and Sandor, J.A., 2003. Organic Carbon, Texture, and Quantitative Color Measurement Relationships for Cultivated Soils in North Central Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67: 1823-1830.
- Lal, R., 2007. World soils and global issues. *Soil & Tillage Research* 97: 1-4.
- Lal, R., 2009. Soils and world food security. *Soil & Tillage Research*, 102: 1-4.
- Leiros, M.C., Trasar-Cepeda, C., Seoane, S. and Gil-Sotres, F., 1999. Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture. *Soil Biology & Biochemistry*, 31: 327-335.
- Levin, N., Ben-Dor and Singer, A., 2005. A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments. *International Journal of Remote Sensing*, 26(24): 5475-5492.
- Linker, R., Shmulevich, I., Kenny, A. and Shaviv, A., 2005. Soil identification and chemometrics for direct determination of nitrate in soils using FTIR-ATR mid-infrared spectroscopy. *Chemosphere*, 61: 652-658.
- Ludwig, B., Nitschke, R., Terhoeven-Urselmans, T., Michel, K. and Flessa, H., 2008. Use of mid-infrared spectroscopy in the diffuse-reflectance mode for the prediction of the composition of organic matter in soil and litter. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 171: 384-391.
- Lugato, E. and Berti, A., 2008. Potential carbon sequestration in a cultivated soil under different climate change scenarios: A modelling approach for evaluating promising management practices in north-east Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 128: 97-103.
- Madari, B.E., Reeves Iii, J.B., Machado, P.L.O.A., Guimarães, C.M., Torres, E. and McCarty, G.W., 2006. Mid- and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferralsols. *Geoderma*, 136(1-2): 245-259.
- Madeira, I., Bédidi, A., Pouget, M., Cervelle, B. and Flay, N., 1995. Spectral (MIR) determination of kaolinite and gibbsite contents in lateritic soils. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 321- Série II a: 119-128.
- Martin, D., Lal, T., Sachdev, C.B. and Sharma, J.P., 2010. Soil organic carbon storage changes with climate change, landform and land use conditions in Garhwal hills of the Indian Himalayan mountains. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 138: 64-73.

- Mathieu, R., Pouget, M., Cervelle, B. and Escadafal, R., 1998. Relationships between Satellite-Based Radiometric Indices Simulated Using Laboratory Reflectance Data and Typic Soil Color of an Arid Environment. *Remote Sensing of Environment*, 66: 17-28.
- McBratney, A.B., Minasny, B. and Viscarra Rossel, R., 2006. Spectral soil analysis and inference systems: A powerful combination for solving the soil data crisis. *Geoderma*, 136(1-2): 272-278.
- Mehra, O.P. and Jackson, M.L., 1960a. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.*, 7: 317-327.
- Mehra, O.P. and Jackson, M.L., 1960b. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 7: 317-327.
- Michel, K., Terhoeven-Urselmans, T., Nitschke, R., Steffan, P. and Ludwig, B., 2009. Use of near- and mid-infrared spectroscopy to distinguish carbon and nitrogen originating from char and forest-floor material in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 172: 63-70.
- Minasny, B., Tranter, G., McBratney, A.B., Brough, D.M. and Murphy, B.W., 2009. Regional transferability of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopic prediction for soil chemical properties. *Geoderma*, 153: 155-162.
- Mouazen, A.M., Karoui, R., Deckers, J., De Baerdemaeker, J. and Ramon, H., 2007. Potential of visible and near-infrared spectroscopy to derive colour groups utilising the Munsell soil colour charts. *Biosystems Engineering*, 97: 131-143.
- Munsell Color Company, 2000. *Munsell Soil Color Charts, 2000 Revised Washable Edition*. Gretagmacbeth, New Windsor, NY.
- Nguyen, T., Janik, L.J. and Raupach, M., 1991. Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform (DRIFT) Spectroscopy in Soil Studies. *Australian Journal of Soil Research*, 29: 49-67.
- Pedro, G., 1968. Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. *Revue Géog. Phys. Géol. Dyn.*, X(5): 457-470.
- Pedro, G. and Delmas, A.-B., 1980. Regards actuels sur les phénomènes d'altération hydrolytique. Leur nature, leur diversité et leur place au cours de l'évolution géochimique superficielle. *Cahier ORSTOM, Série Pédologique*, XVIII(n° 3-4): 217-234.
- Peng, Y.Y. and Dang, Q.-L., 2002. Effects of soil temperature on biomass production and allocation in seedlings of four boreal tree species. *Forest Ecology and Management*, 180: 1-9.
- Petit, S., Decarreau, A. and Righi, D., 2003. Utilisation de dépôts d'argile sur lame de verre pour leur étude en spectroscopie infrarouge. *C. R. Geoscience*, 335: 735-741.
- Pirie, A., Singht, B. and Islam, K., 2005. Ultraviolet, visible, near-infrared and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopic techniques to predict several soil properties. *Australian Journal of Soil Research*, 43: 713-721.
- Pontes, M.J.C., Cortez, J., Galvão, R.K.H., Pasquini, C., Araújo, M.C.U., Coelho, R.M., Chiba, M.K., Ferreira de Abreu, M. and Madari, B.E., 2009. Classification of Brazilian soils by using LIBS and variable selection in the wavelet domain. *Analytica Chimica Acta* 642: 12-18.
- Poulenard, J., Perrette, Y., Fanget, B., Quetin, P., Trevisan, D. and Dorioz, J.M., 2009. Infrared spectroscopy tracing of sediment sources in a small rural watershed (French Alps). *Science of The Total Environment*, 407(8): 2808-2819.
- Rabeharisoa, L., 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Faculté des Sciences- Université d'Antananarivo, Madagascar. 202 pages.

- Raunet, M., 1997. Les Ensembles Morpho-pédologiques de Madagascar, Projet Conservation des sols, Cirad, Madagascar. 76p.
- Razafimbelo, T., 2005. Stockage et protection du carbone dans un sol sous système en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres Malgaches. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier – Ecole Doctorale Biologique des systèmes intégrés –agronomie –environnement, 162 pp.
- Razafindramanana, N.C., 2006. Afforestation et stockage de carbone en lisière Ouest du corridor forestier de Fianarantsoa (Madagascar). Mémoire de DEA. Département des eaux et Forêts- Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques- Université d'Antananarivo. , 78 pp.
- Reeves III, J.B., 2010. Near- versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: Where are we and what needs to be done? *Geoderma*, In Press, Corrected Proof.
- Reeves, J.B., 2009. Near- versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: Where are we and what needs to be done? *Geoderma*, doi:10.1016/j.geoderma.2009.04.005.
- Riquier, J., 1966. Les sols ferrallitiques. *Cahier ORSTOM, Série Pédologique*, 4(4): 33-37.
- Roederer, P., 1971. Les sols de Madagascar, ORSTOM.
- Rumpel, C., Janik, L.J., Skjemstad, J.O. and Kögel-Knabner, I., 2001. Quantification of carbon derived from lignite in soils using mid-infrared spectroscopy and partial least squares. *Organic Geochemistry*, 32: 831-839.
- Russell, J.D. and Fraser, A.R., 1971. I.R. spectroscopic evidence for interaction between hydronium ions and lattice OH groups in montmorillonite. *Clays and Clay Minerals*, 19: 55-59.
- Sánchez-Marañón, M., Huertas, R. and Melgosa, M., 2005. Colour variation in standard soil-colour charts. *Australian Journal of Soil Research*, 43(827-837).
- Sanchez, P.A., Palm, C.A. and Buol, S.W., 2003. Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma*, 114: 157-185.
- Scheinost, A.C. and Schwertmann, U., 1999. Color Identification of Iron Oxides and Hydroxysulfates: Use and Limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63: 1463-1471.
- Schulze, D.G., Nagel, J.L., Von Scoyoc, G.E., Henderson, T.L., Steinwand, M.F., Baumgardner, A.L. and Stott, D.E., 1993. Significance of organic carbon in determining soil colors. p. 71–90. In J.M. Bigham and E.J. Ciol- kosz (ed.) *Soil Color*. SSSA Spec. Publ. 31, SSSA, Madison, WI.
- Segalen, P., 1956. la gibbsite dans les sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. *Fond documentaire ORSTOM*.
- Segalen, P., 1994. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique: Tome I,II,III. 579.
- Sellitto, V.M., Fernandes, R.B.A., Barrón, V. and Colombo, C., 2009. Comparing two different spectroscopic techniques for the characterization of soil iron oxides: Diffuse versus bi-directional reflectance. *Geoderma*, 149: 2-9.
- Shields, J.A., Paul, E.A., Arnaud, R.J.S. and Head, W.K., 1968. Spectrophotometric measurement of soil color and its relationship to moisture and organic matter. *Canadian Journal of Soil Science*, 48(271-280).
- Siefferman, G., 1969. Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial au milieu tropical., 6, Thèse Sciences nat. - Strasbourg, 290 pp.

- Singleton, P.L., 1991. Water Tables and Soil Colour as an Indicator of Saturation in Some Soils of the Waikato, New Zealand. *Australian Journal of Soil Research*, 29: 467-481.
- Skjemstad, J.O. and Dalal, R.C., 1987. Spectroscopic and Chemical Differences in Organic Matter of Two Vertisols Subjected to Long Periods of Cultivation. *Australian Journal of Soil Research*, 25: 323-335.
- Smidt, E. and Parravicini, V., 2009. Effect of sewage sludge treatment and additional aerobic post-stabilization revealed by infrared spectroscopy and multivariate data analysis. *Bioresource Technology*, 100(5): 1775-1780.
- Smith, P. and Fang, C., 2010. A warm response by soils. *Nature*, 464: 499-500.
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M. and Wetterlind, J., 2010. Visible and NIR Infrared Spectroscopy in Soil Science. *Advances in Agronomy*, 107: 163-215.
- Swinton, S.M., Lupi, F., Robertson, G.P. and Hamilton, S.K., 2007. Ecosystem services and agriculture: Cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits. *Ecological Economics* 64: 245-252.
- Torrent, J., Schwertmann, U., Fechter, H. and Alferez, F., 1983. Quantitative relationships between soil colour and hematite content. *Soil Science*, 136: 354-358.
- Viscarra Rossel, R.A., 2004. ColoSol. Executable Software to Perform Colour Space Model Transformations for Soil Colour. <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/people/rvrossel/soft02.htm>.
- Viscarra Rossel, R.A., Fouad, Y. and Walter, C., 2008a. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. *Biosystems Engineering*, 100(2): 149-159.
- Viscarra Rossel, R.A., Jeon, Y.S., Odeh, I.O.A. and McBratney, A.B., 2008b. Using a legacy soil sample to develop a mid-IR spectral library. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46: 1-16.
- Viscarra Rossel, R.A., Minasny, B., Roudier, P. and McBratney, A.B., 2006a. Colour space models for soil science. *Geoderma*, 133: 320-337.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J. and 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.
- Volkoff, B., Melfi, A.J. and Pedro, G., 1989. Nature des oxydes de fer dans les sols du Brésil , répartition et fonction du climat. *Sci. Géol., Bull.*, 42(1): 15-25.
- Walkley, A. and Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(29-38).
- Williams, C.A., Hanan, N.P., Neff, J.C., Scholes, R.J., Berry, J.A., Denning, A.S. and Baker, D.F., 2007. Africa and the global carbon cycle. *Carbon Balance and Management*, 2(3): 1-13.
- Wyszecki, G. and Stiles, W.S., 1982. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, Second Edition Wiley, New York.
- Xu, X., Liu, W. and Kiely, G., 2011. Modeling the change in soil organic carbon of grassland in response to climate change: Effects of measured versus modelled carbon pools for initializing the Rothamsted Carbon model. *Agriculture, Ecosystems and Environment*: doi:10.1016/j.agee.2010.12.018.
- Zimmermann, M., Leifeld, J. and Fuhrer, J., 2007. Quantifying soil organic carbon fractions by infrared-spectroscopy. *Soil Biology & Biochemistry*, 39: 224-231.

**CONCLUSION GENERALE, LIMITES ET PERSPECTIVES DE
L'ETUDE**

1- RAPPELS SUR LES OBJECTIFS

Dans l'optique d'une atténuation des impacts des changements climatiques sur l'écosystème et sur les systèmes agraires en particulier et dans la recherche des stratégies d'adaptation à ces événements futurs, l'évaluation de la sensibilité des différentes composantes de l'écosystème est devenue une priorité en matière de recherche. L'objectif du présent travail est d'évaluer la sensibilité des propriétés des sols aux climats en utilisant des nouveaux outils et des nouvelles approches de recherche. Il s'agit de (i) développer une méthode de classification des principaux groupes de sol de Madagascar à partir de leurs signatures spectrales dans le moyen infrarouge et d'utiliser cette technique de spectrométrie infrarouge pour la prédiction des propriétés des sols, (ii) modéliser la couleur des sols afin de prédire la teneur en fer et en carbone organique et enfin (iii) analyser d'une part les relations entre les propriétés des sols et les variables climatiques et d'autre part, identifier les constituants sensibles à la température et à la pluviosité par le biais des couleurs et des signatures spectrales des sols.

2- CONCLUSION

2.1 DISTRIBUTION DES SOLS SOUS DIFFERENTS TYPES DE CLIMAT

Toutes les publications et les cartes élaborées par les pédologues (ex. Segalen, 1956; Riquier, 1966; Roederer, 1971; Aubert et Bourgeat, 1972; Delenne et Pelletier, 1981) qui ont travaillé à Madagascar évoquent que les ferralsols et les cambisols, groupes de sol correspondant aux sols ferrallitiques de la classification CPCS, occupent essentiellement les Hautes Terres et la partie Est de l'île. Les nitisols se retrouvent dans la partie Nord et sur le versant Ouest, considérés comme des zones de transition entre les domaines ferrallitiques et ferrugineux. Les luvisols et les arenosols, équivalents des sols ferrugineux de la CPCS, se situent sur la partie Ouest, Sud et dans certaines zones du Nord de Madagascar. Les vertisols se trouvent dans des endroits assez exigu et très localisés de la partie Ouest et Nord tandis que les calcaric regosols sont localisés sur des roches sédimentaires près des côtes Ouest et Sud Ouest. Ces descriptions concordent parfaitement aux différents groupes de sol que nous avons identifié lors des travaux d'échantillonnage sur le terrain. Les résultats des descriptions aux champs ont été ensuite affinés avec les différentes méthodes statistiques de classification développées dans le chapitre 3.

Par rapport au climat, la carte des régions climatiques de Raunet (1998) affiche des classes de climat basées sur l'importance de la pluviosité : les régions perhumides concernant tout le littoral Est et le Sambirano dans le Nord, les régions humides étalées sur les versants Est et les Hautes Terres centrales, les régions subhumides situées sur les versants et le littoral Ouest, les régions subarides pour la partie Sud Ouest et enfin les régions arides situées à l'extrême Sud de

l'île. Ainsi, Madagascar présente à la fois une grande diversité de sols et de climats. Ces contextes expliquent la distribution d'un même groupe de sol dans des zones climatiques différentes. Par exemple, les ferralsols se distribuent entre 1174 mm et 2882 mm de pluie et 16,4 °C et 26,2°C de température, les cambisols entre 754 mm et 3104 mm et 16,9 °C et 27,3°C, les nitisols entre 612 mm et 1952 mm et 21,1°C et 27°C. Diverses situations pédoclimatiques ont pu être considérées à partir de ces données afin d'analyser les relations entre les propriétés des sols et les variables climatiques. Ces données et ces approches ont été présentées et développées dans le chapitre matériels et méthodes.

2.2 APPLICATION DE LA SPECTROMETRIE INFRAROUGE EN SCIENCE DU SOL

Auparavant, la technique utilisant la spectrométrie infrarouge intéressait essentiellement les chercheurs dans le domaine de la chimie. Plus tard, cette technique a été appliquée à d'autres domaines, entre autres la science du sol et a connu un important progrès durant ces deux dernières décennies (Pirie *et al.*, 2005; Viscarra Rossel *et al.*, 2006b). Pour le cas de la spectrométrie dans le moyen infrarouge (MIR), les recherches se focalisaient surtout sur les analyses qualitatives pour la caractérisation des constituants minéraux et organiques des signatures spectrales des sols (ex. Nguyen *et al.*, 1991; Madeira *et al.*, 1995; Bardy *et al.*, 2008) et sur la prédictions des propriétés des sols (ex. Viscarra Rossel *et al.*, 2006b; Janik *et al.*, 2007; Minasny *et al.*, 2009). Récemment, certains auteurs ont commencé à s'intéresser à l'utilisation des spectres MIR pour la classification des sols (ex. Du *et al.*, 2008). Dans notre travail, nous avons essayé de classifier et de caractériser les principaux groupes de sol de Madagascar et ensuite de prédire leurs propriétés physico-chimiques à partir des signatures spectrales.

2.2.1 Spectres MIR : outils pour la classification et la caractérisation des sols

Le nombre de sites de prélèvement de sols s'élève à 119 suivant les deux axes Est-Ouest et Nord-Sud, un prélèvement étant distant de 20 km du suivant. Les descriptions des profils pédologiques effectuées sur le terrain constituent une base de la classification des sols prélevés. Nous avons classifié les échantillons prélevés avec leurs signatures spectrales. Deux méthodes statistiques ont été testées : le K-means clustering, une méthode non supervisée et la PLS-DA qui est une méthode supervisée. Sur le terrain, nous avons pu découvrir 7 groupes de sol, selon la classification FAO : les ferralsols, les cambisols, les nitisols, les luvisols et les arenosols. La PLS-DA a correctement classifié les 88% des échantillons en calibration et 87% en validation. Les cambisols-nitisols ont été classés à 100% et seulement 50% des arenosols. Ces résultats ne sont pas loin de ceux trouvés par Du *et al.* (2008) sur les sols méditerranéens avec 96% des biens classés en validation sur les 77 échantillons testés. Le nombre d'échantillons correspondant aux sols à texture argileuse (ferralsols, cambisols et nitisols) est largement supérieur à celui des sols à texture sableuse (arenosols et luvisols). Nous considérons que cette disproportion a eu des

impacts sur la robustesse des modèles construits avec la PLS-DA. C'est ce qui explique ainsi le résultat assez mitigé avec les arenosols.

Les analyses qualitatives des spectres moyens des classes de sol issues du k-means d'une part et de chacun des 7 groupes de sol en PLS-DA d'autre part, ont permis de développer leurs caractéristiques respectives. Les bandes identifiées sur ces spectres moyens et qui les différencient entre eux correspondent essentiellement à des éléments minéraux. Les tests de corrélation effectués entre les clusters de la classification non supervisée et les groupes de sol en PLS-DA ont montré l'existence d'une très forte corrélation. Nous avons pu conclure que chaque cluster correspond à l'un des groupes de sol identifiés. D'ailleurs, les caractérisations minéralogiques des spectres ont prouvé que les ferralsols et le cluster qui le correspond ont été discriminés par la présence des bandes à gibbsites aux environs de 3622 cm^{-1} , 3525 cm^{-1} , 3450 cm^{-1} , 3392 cm^{-1} et 3376 cm^{-1} . Le spectre moyen des vertisols et son équivalent en cluster est caractérisé par les bandes à smectite proche de 3620 cm^{-1} et 1630 cm^{-1} , ceux des calcaric regosols par les bandes à calcites localisées aux environs de 2988 cm^{-1} , 2880 cm^{-1} , 2517 cm^{-1} , 1800 cm^{-1} et 875 cm^{-1} . Les arenosols et les luvisols sont caractérisés par des importantes bandes à quartz proches de 2000 cm^{-1} , 1870 cm^{-1} , 1790 cm^{-1} et plusieurs bandes en dessous de 1000 cm^{-1} .

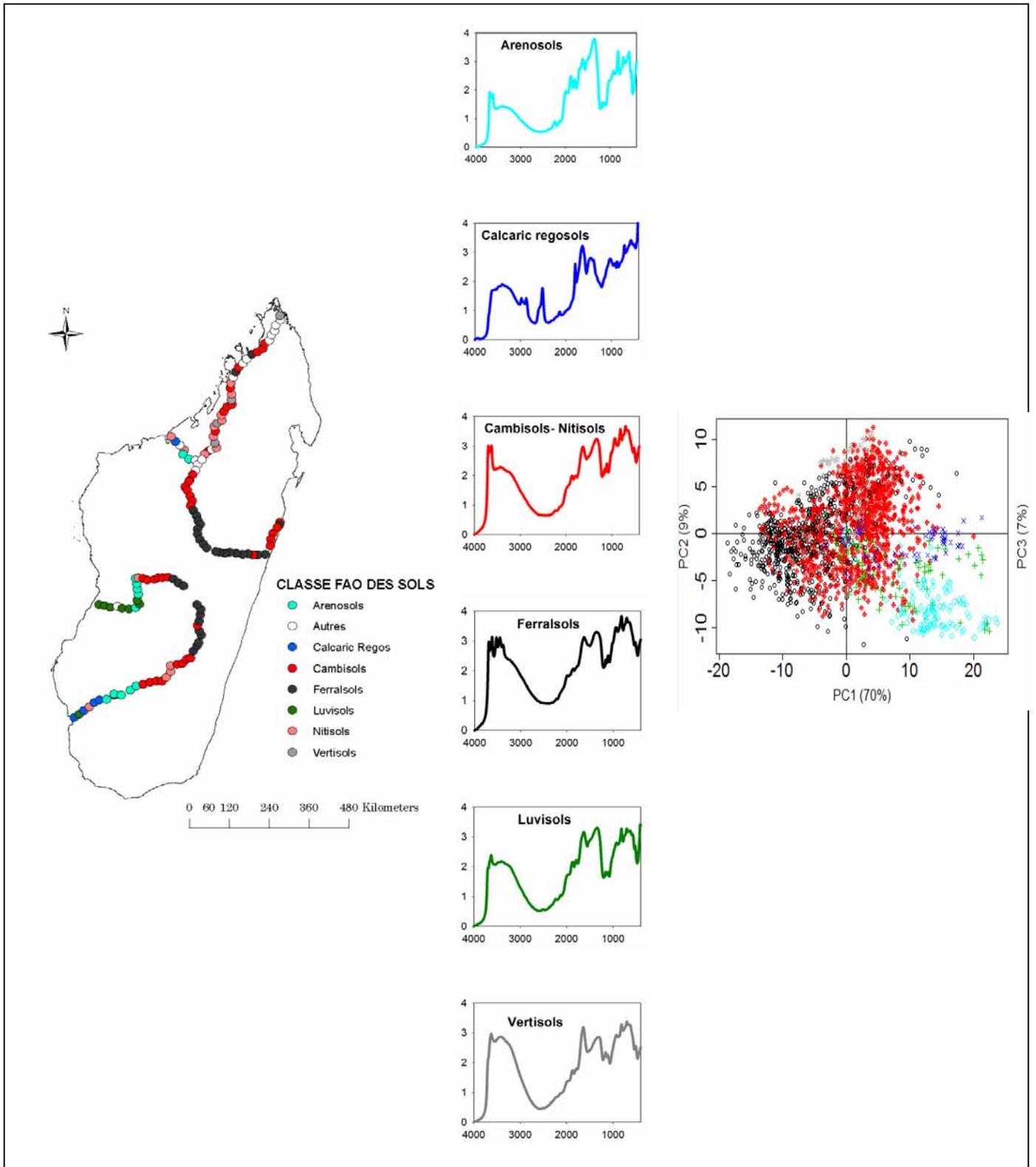


Figure 7-1 : Localisation des sites d'étude, spectres moyens par groupe de sol et résultat des ACP

Ces résultats nous ont permis de conclure qu'avec les deux méthodes de classification utilisées, les spectres ont été discriminés suivant leurs caractéristiques minéralogiques. Il est ainsi justifié

d'affirmer que les sols de Madagascar sont des modèles minéralogiques. Ceci est lié à la pédogenèse de ces différents groupes de sol. Les deux méthodes sont complémentaires pour des travaux de classification à partir des spectres : la méthode non supervisée informe sur la tendance des clusters en fonction du nombre de classes et les bandes qui les caractérisent et la méthode supervisée discrimine les échantillons selon les modèles utilisés. Le développement d'une telle méthode suscite un grand intérêt pour les chercheurs qui travaillent dans le domaine de la science du sol mais qui ne se sont pas spécialisés en pédologie appliquée. Une fois les modèles établis et validés par groupe de sol, il suffira de les utiliser pour prédire l'appartenance des nouveaux échantillons à l'un d'eux. Un tel outil permettra également de diminuer considérablement les coûts des travaux sur le terrain ainsi que le temps alloué.

Les résultats trouvés dans le présent travail confirment donc notre première hypothèse qui stipule que la spectrométrie moyen infrarouge permet une caractérisation et une classification des sols tropicaux de Madagascar.

2.2.2 Spectres MIR : outils de prédiction des propriétés des sols

Les coûts des analyses en laboratoire et les temps nécessaires aux manipulations constituent toujours une contrainte majeure à l'évaluation de la fertilité des sols via leurs propriétés physico-chimiques. Cette contrainte est de plus en plus importante dès qu'il s'agit de travailler sur un grand nombre d'échantillons. L'utilisation des signatures spectrales dans le moyen infrarouge pour prédire divers constituants du sol est une alternative aux méthodes d'analyse conventionnelle (Pirie *et al.*, 2005; Viscarra Rossel *et al.*, 2006b; Janik *et al.*, 2007). Pour pouvoir étudier la sensibilité des sols au climat, il faut en premier lieu analyser leurs propriétés physico-chimiques. Dans le cadre de cette étude, le nombre d'échantillons prélevés s'élève à 2317 d'où l'intérêt de recourir à la spectrométrie infrarouge. Les constituants suivants ont été mesurés ou analysés : la texture (argile, limon, sable), la densité apparente, l'humidité, le carbone organique, le pH_{eau} et le pH_{KCl} , les bases échangeables (Na, K, Ca, Mg), le Fe_{CBD} , l' Al_{CBD} , le Fe_{Ox} et l' Al_{Ox} . Les prédictions ont été réalisées sur l'ensemble des échantillons puis par groupe de sol en utilisant les résultats de la classification obtenus dans le chapitre 3. Pour le cas des sols tropicaux, plusieurs études ont déjà été réalisées avec les spectres MIR. A titre d'exemple, nous pouvons citer les travaux de Janik et Skjemstad (1995), Minasny *et al.* (2009), Janik *et al.* (2009) et Combo *et al.* (2010) sur la prédiction des diverses propriétés des sols. Leurs résultats ont mentionné que l'argile, le sable, le carbone, les pH, l' Al_{CBD} et encore d'autres éléments peuvent très bien être prédites avec les spectres MIR. Nos résultats avec les sols de Madagascar semblent en concordance avec cette tendance sur les autres sols tropicaux. Le coefficient de détermination R^2 et le ratio RPD sont les principaux critères adoptés pour l'évaluation des modèles et des résultats de la validation. Chang *et al.* (2001) ont classé la prédiction comme excellente pour un RPD supérieure à 2, acceptable s'il est entre 1,4 et 2 et mauvaise pour des valeurs inférieures à

1,4. Sur l'ensemble des échantillons sans distinction de groupe de sol, des excellentes prédictions ont été obtenues avec la teneur en argile ($R^2= 0,8$ et $RPD= 2,23$), en sable ($R^2= 0,8$ et $RPD= 2,26$), en argile+ limon fin ($R^2= 0,88$ et $RPD= 2,85$), en Al_{CBD} ($R^2= 0,85$ et $RPD= 2,48$), en carbone ($R^2= 0,79$ et $RPD= 2,14$) et le pH_{KCl} ($R^2= 0,76$ et $RPD= 2,05$). Les plus mauvaises prédictions ont été obtenues avec les bases échangeables avec des $RPD < 1,4$ mais les prédictions demeurent acceptables ($1,4 < RPD < 2$) pour les autres constituants. Par groupe de sol, seul le carbone organique a été bien prédit avec un R^2 de 0,83 et un RPD de 2,33 pour les ferralsols et un R^2 égal à 0,81 et un RPD de 2,23 pour l'association ferralsols-cambisols-nitisols (Chapitre 4). L'argile, le sable et l'aluminium font partie des principaux constituants minéraux des sols malgaches. Comme il a été évoqué dans le paragraphe précédent, les sols tropicaux de Madagascar sont des modèles minéralogiques. L'argile et le sable déterminent en général la texture du sol étant donné que les limons fins ont les mêmes caractéristiques et sont considérés comme des argiles grossières. D'ailleurs, ces deux éléments sont très bien exprimés sur les spectres ce qui facilite ainsi leur modélisation. Les composés organiques s'expriment également sur les loadings des PLS, notamment les alkyls $-CH_2$ aux environs de 2922 cm^{-1} et 2853 cm^{-1} . C'est ce qui explique en partie l'obtention des bons résultats pour la prédiction du carbone organique.

Nous pouvons en déduire que l'existence d'une grande diversité des échantillons de sol a influé les résultats de prédiction. Dans le cas où les échantillons sont beaucoup plus homogènes du point de vue « site de prélèvement », nous estimons qu'il est encore possible d'améliorer ces résultats surtout pour les constituants ayant donné des RPD inférieure à 2. Mais pour cette thèse, ces résultats démontrent que la spectrométrie moyen infrarouge arrive à prédire un grand nombre de propriété des sols, ce qui confirme encore une fois l'hypothèse 1.

2.3 UTILISATION DES COULEURS POUR LA PREDICTION DES PROPRIETES DES SOLS

L'utilisation des couleurs en science du sol s'est toujours limitée à une description morphologique des sols. La technique visant à prédire les propriétés à partir des couleurs n'est pas encore très développée à part quelques études réalisées par Viscarra Rossel *et al.* (2006a), Levin *et al.* (2005) et Viscarra Rossel *et al.* (2008a). Deux mesures de couleurs ont été réalisées dans la présente étude: identification des couleurs Munsell et numérisation des échantillons à l'aide d'un appareil photo numérique. Les données de couleur obtenues ont été ensuite transformées vers différents modèles spatiaux de couleur avec le logiciel COLOSOL. Sachant que la teneur en fer et en carbone organique ont des influences sur la couleur du sol, les tests de corrélation entre les variables transformées de couleur et ces deux constituants du sol ont montré des coefficients de corrélation pouvant aller jusqu'à 0,8. Ces mêmes résultats ont ressorti que le fer et le carbone sont plutôt corrélés aux couleurs RVB qu'aux couleurs Munsell. Le fer est plus corrélé aux couleurs de l'échantillon sec et le carbone aux couleurs à l'état humide. En calibration et avec les couleurs RVB, les meilleurs résultats ont été obtenus pour le

Fe_{CBD} avec les arenosols et la variable CIE C ($R^2= 0,95$ et RMSE= 2,88‰) et avec les luvisols et la chromaticité x ($R^2= 0,86$ et RMSE= 4,82‰). Pour le cas du carbone organique, c'est toujours avec les arenosols et le chroma C qu'un meilleur résultat a été obtenu : $R^2= 0,72$ et RMSE= 1,34‰. Avec les ferralsols et les nitisols, la modélisation de u^* et du chroma C ont respectivement donné un R^2 égal à 0,63 et 0,61 ainsi que des RMSE de 4,99‰ et 2,9‰. Ces résultats sont proches de ceux trouvés par Viscarra Rossel *et al.* (2006a) et Viscarra Rossel *et al.* (2008a): un R^2 égal à 0,7 et un RMSE de 0,5‰ entre le Fe_{CBD} et l'indice de rougeur RI, entre C_{org} et R Munsell ($R^2= 0,66$ et RMSE = 5,3‰), entre C_{org} et u^* Munsell ($R^2= 0,52$ et RMSE= 5,8‰) et entre C_{org} et v^* RVB ($R^2= 0,88$ et RMSE= 4,8‰).

Avec les données de couleur et d'analyse de sol à notre disposition durant ce travail, il a été prouvé que les couleurs RVB prises avec un appareil photo numérique sont les mieux adaptées pour la prédiction de la teneur fer et en carbone. En effet, les couleurs Munsell sont assujetties à plusieurs facteurs externes comme la variation de la lumière du jour, la subjectivité de l'observateur...ce qui les rendent moins pertinentes par rapport aux RVB prises dans des conditions homogènes. L'individualisation beaucoup plus importante des sesquioxydes de fer dans les arenosols et les luvisols (sols ferrugineux), qui donnent à ces sols une teinte rouge assez accentuée explique en grande partie la capacité des modèles spatiaux de couleurs à prédire la teneur en Fe_{CBD}. Cette comportement du fer offre ainsi au sol un chroma plus rouge d'où l'obtention des meilleurs modèles avec le chroma C, CIE C ou les chromaticités (a^* , b^* , u^* , v^* , $x...$) ou encore avec l'indice de rougeur RI. Nous nous attendons également à des meilleurs résultats pour la prédiction de la teneur en fer dans le cas des sols argileux (ferralsols, cambisols, nitisols) mais il nous semble que la présence significative des goethites, responsables de la couleur jaune, dans ces sols a réduit l'importance de la valeur du chroma qui correspond à la couleur rouge. Les horizons A des ferralsols, des cambisols et des nitisols ont une teneur en carbone organique supérieure à ceux des arenosols et des luvisols. La matière organique donne au sol une couleur sombre. L'opération d'humectation rend encore la couleur des échantillons plus sombre, uniforme et beaucoup plus stable. La modélisation de la teneur en carbone à partir des couleurs devient facile avec certaines variables liées au chroma. L'insuffisance du nombre d'échantillons analysé nous a contraint à nous arrêter au stade de la calibration. Pourtant, si la validation avait eu lieu, nous aurions pu sélectionner les modèles les plus pertinents pour la prédiction de ces deux constituants. Néanmoins, nous pouvons conclure que l'hypothèse 2 est confirmée pour certains groupes de sol à condition que les modèles soient valides. Rappelons que cette seconde hypothèse propose que la couleur du sol constitue un outil adéquat pour la prédiction de la teneur en fer et en carbone organique du sol.

2.4 SENSIBILITE DES PROPRIETES DES SOLS A LA TEMPERATURE ET A LA PLUVIOSITE

La démarche et les outils utilisés pour l'analyse et l'évaluation de la sensibilité des sols malgaches au climat sont complètement nouveaux et non encore développés. Il s'agit d'une démarche exploratoire et innovatrice qui cherche à étudier les impacts du climat sur les propriétés des sols par le biais de leurs couleurs et de leurs signatures spectrales. D'après nos recherches bibliographiques, aucune étude similaire n'a encore été publiée, du moins jusqu'au moment de la rédaction du présent travail. Ce sont les approches méthodologiques adoptés et les outils utilisés qui font l'originalité de cette étude. Les résultats ont été obtenus grâce à l'application des connaissances acquises en pédologie, associée à l'utilisation des nouvelles techniques appliquées en sciences du sol à savoir la spectrométrie infrarouge et la modélisation des couleurs du sol. Les outils statistiques et l'utilisation du système d'information géographique nous ont permis d'exploiter les données de terrain et d'analyse. Les analyses qualitatives des relations entre les variables climatiques et les propriétés des sols ont montré une tendance très nette pour le cas de la teneur en carbone. La teneur en carbone organique est inversement proportionnelle à la température et proportionnelle à la pluviosité. En effet, les respirations des racines et la décomposition des matières organiques, deux facteurs provoquant la perte de CO₂ par émission, sont des processus étroitement dépendants à la température (Davidson et Janssens, 2006). En conséquence, l'élévation de la température provoque l'augmentation de la minéralisation des matières organiques.

Les ACP et les régressions PLS sur les couleurs n'ont donné aucune relation pour les ferralsols, les cambisols et les luvisols. Par contre pour les arenosols et les nitisols, des coefficients de corrélation R² entre 0,52 et 0,88 ont été trouvés avec la température et la pluviosité. Les résultats trouvés indiquent que les variables couleurs sont plus sensibles à la pluviosité pour ces deux groupes de sol. Les couleurs Munsell des arenosols et des nitisols se trouvent dans la gamme du « rouge », elles varient entre 2,5YR et 10YR à l'état sec et entre 7,5R à 7,5YR à l'état humide pour les arenosols, et entre 5YR et 10YR à l'état sec et entre 2,5YR et 7,5YR à l'état humide pour les nitisols (chapitre 5). Ce sont les oxydes cristallisés (hématites) issues de l'individualisation des sesquioxides de fer qui confèrent la couleur rouge aux sols (Eschenbrenner, 1988). Pourtant, ce processus est lié à la condition du milieu, notamment à l'abondance des pluies.

Ces analyses qualitatives avec les couleurs renseignent seulement sur la sensibilité des arenosols et des luvisols aux variables climatiques via leurs couleurs mais elles ne permettent pas une identification plus précise des constituants du sol potentiellement sensibles. Par conséquent, nous estimons que la couleur ne constitue pas un outil très adapté pour l'évaluation de la sensibilité des sols au climat. Ces propos rejettent par conséquent l'hypothèse 3 avancée au début qui considère que la couleur peut être utilisée comme indicateur de sensibilité des sols.

Les approches pour l'évaluation de la sensibilité des sols utilisant la spectrométrie infrarouge ont donné des résultats plus pertinents et plus détaillés. Effectivement, les régressions PLS entre les deux variables climatiques étudiées et les spectres du sol ont permis d'obtenir des coefficients de régression R^2 supérieurs à 0,8 pour les nitisols, les luvisols et les arenosols. Ces coefficients se situent entre 0,6 et 0,8 pour les ferralsols et les cambisols. Après avoir analysé les corrélations entre les variables du climat et les spectres, les analyses qualitatives réalisées avec les loadings des PLSR ont permis d'identifier les constituants du sol les plus sensibles. Les bandes sensibles exprimées par les loadings correspondent à deux groupes de constituants du sol : les constituants minéraux et les constituants organiques. Deux éléments ont été identifiés comme les plus sensibles pour le cas des constituants minéraux. Il s'agit de la gibbsite dont les bandes caractéristiques se situent aux alentours de 3525 cm^{-1} , 3450 cm^{-1} , 3392 cm^{-1} , 3376 cm^{-1} et de la kaolinite proches de 3691 cm^{-1} , 3655 cm^{-1} , 3622 cm^{-1} , 1116 cm^{-1} , 1105 cm^{-1} et 1020 cm^{-1} des loadings (Chapitre 6). Ce sont des variables lentes pour lesquelles les processus liés à la sensibilité se déroulent durant une très longue durée. La sensibilité de ces deux éléments se manifeste particulièrement par le lessivage et l'altération. Les gibbsites se trouvent en quantité importante dans les ferralsols. Ce groupe de sol reste donc le plus sensible au climat pour le cas de la gibbsite. Pour la kaolinite, des valeurs de R^2 égal à 0,99 avec la température et 0,96 avec la pluviosité des luvisols, associées à l'absence de la bande à kaolinite vers 3694 cm^{-1} sur le spectre moyen prouvent que ce groupe de sol est la plus sensible au climat pour ce type d'argile, suite aux processus de lessivage.

Sur les loadings des PLSR avec la température, nous avons pu constater la présence importante des bandes relatives à des composés organiques. Les bandes les plus fréquentes sont celles des amides (-CNO) proches de 1653 cm^{-1} , 1600 cm^{-1} et 1556 cm^{-1} , des produits aliphatiques (-CH₂) aux environs de 2922 cm^{-1} et 2853 cm^{-1} et celles des acides carboxyliques (-COOH) proches de 1756 cm^{-1} . Les ferralsols et les cambisols sont moins sensibles à la pluviosité. Cette constatation a été appuyée par la quasi-absence des bandes correspondantes à ces 3 composés sur les loadings des PLS avec la pluviosité de ces 2 groupes de sol. Les arenosols, les luvisols et les nitisols restent les plus sensibles avec des R^2 supérieure à 0,8. La minéralisation des matières organiques dépend en grande partie des facteurs climatiques, particulièrement la température et l'humidité (Leiros *et al.*, 1999). La température a été souvent avancée comme un facteur qui stimule la décomposition de la matière organique. Ces bandes identifiées comme les plus sensibles sont toutes à base de carbone. Par opposition aux éléments minéraux, les constituants organiques sont des variables rapides : leur évolution se produit sur une courte durée. Tous ces résultats conduisent donc à la validation des hypothèses 4 et 5 qui stipulent que les effets du climat sur les propriétés des sols peuvent être appréhendés à travers leurs signatures spectrales d'une part et que le carbone organique et ses produits dérivés constituent les principaux constituants du sol les plus sensibles à la variabilité climatique.

Etant donné l'importance que tiennent les composés à base de carbone organique dans le sol, des analyses plus poussées ont été effectuées sur la sensibilité de cet élément au climat avec l'utilisation du modèle RothC. Ce dernier permet d'analyser la dynamique du carbone du sol sur une longue durée tout en simulant différents types de scénario. Des scénarii relatifs aux changements climatiques et aux changements d'usage des terres ont été testés pour une durée de 500 ans dans cette thèse. Les simulations ont été effectuées sur 2 sites de ferralsols (texture argileuse) et 2 sites d'arenosols (texture sableuse). Les scénarii correspondants à une augmentation de la température de 1,8°C (S2), de 2,8°C (S2) et de 4°C (S4) avec une diminution de 30% de la pluviosité annuelle ont été appliqués sur des parcelles non cultivées et sous *bozaka* en permanence. Les résultats ont montré que les stocks de carbone augmentent de façon significative sur environ 200 ans. Cette augmentation devient faible au-delà de cette période et le système demeure en équilibre. Sous ces conditions (non cultivées, sous *bozaka*) où les racines et les biomasses aériennes sont entièrement restituées au sol, nous avons pu constater que le carbone de ces deux groupes de sol n'est pas sensible à la température. Par contre, l'installation du riz pluvial a fait varier significativement les stocks de carbone. Avec le scénario « sans apport de fumier et sans restitution de biomasse aérienne », les stocks de carbone ont diminué de près de 60% pour les ferralsols et environ 22% pour les arenosols. Ces résultats indiquent que les ferralsols sont beaucoup plus sensibles au changement d'usage que les arenosols. Avec une restitution totale des biomasses produites et avec un apport de 5 Mg.ha⁻¹ de fumier, les stocks augmentent considérablement et peut atteindre 200% pour les arenosols et 50 à 100% pour les ferralsols. Nous considérons que les ferralsols sont plus sensibles car la décomposition des matières organiques est beaucoup plus importante pour les zones à la fois humides et chaudes. Des scénarii combinant les deux types de changements ont été utilisés pour d'autres simulations. Les résultats ont montré que les impacts du changement d'usage sur le carbone du sol sont largement supérieurs à ceux relatifs au changement du climat.

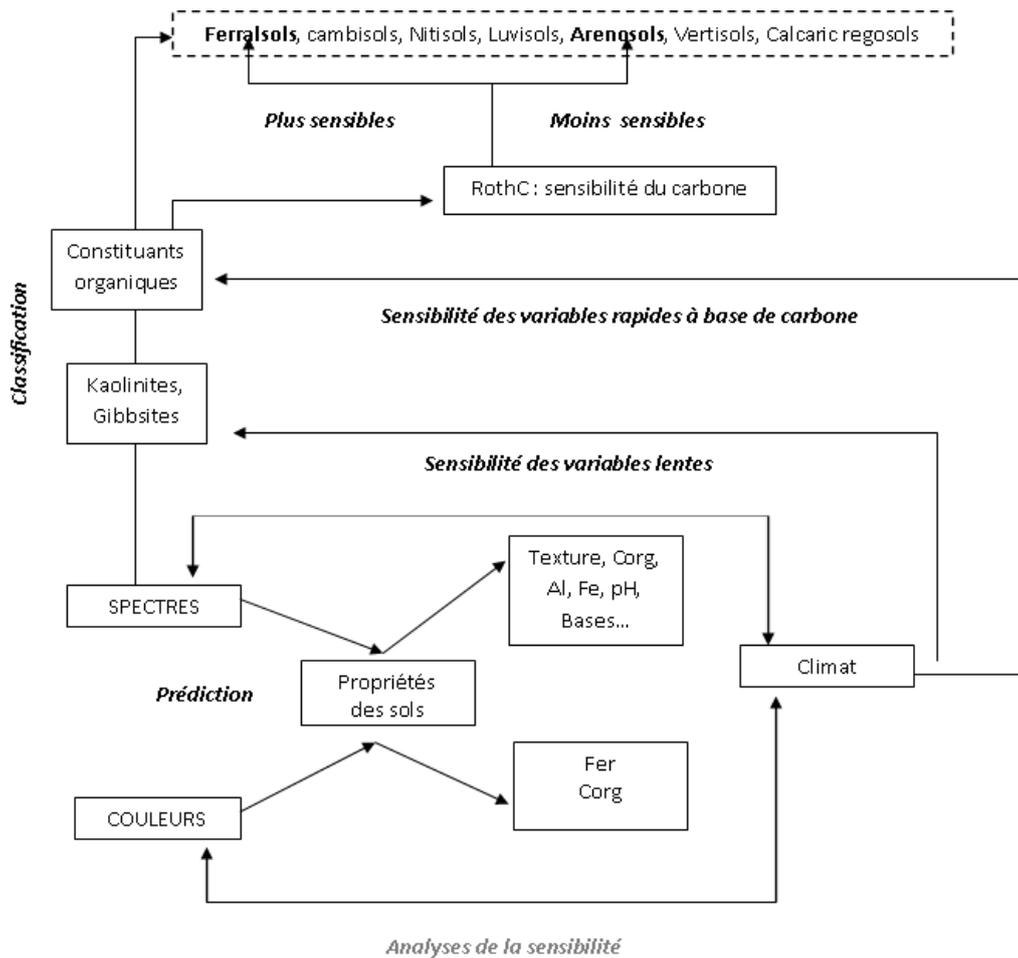


Figure 7-2 : Synthèse de l'analyse de la sensibilité des sols au climat

3- LIMITES ET PERSPECTIVES DE L'ETUDE

3.1 LIMITES DE L'ETUDE

Etant donné qu'il s'agit d'un travail à l'échelle du pays et essentiellement basé sur des méthodes exploratoires, des limites s'imposaient sur divers points des différentes démarches aboutissant à la réalisation de cette thèse. Nous avons classé ces limites dans 3 catégories d'activité:

3.1.1 Travaux sur le terrain

L'objectif initial des travaux d'échantillonnage était de couvrir les différents gradients de température et de pluviosité de Madagascar. Les prélèvements systématiques tous les 20 km suivant les axes Antananarivo-Majunga, Antananarivo-Tamatave, Antananarivo-Morondava, Antsirabe-Tuléar et Ambondromamy-Diégo nécessitaient plusieurs mois de travail de terrain. Le nombre de sites de prélèvement s'élève à 131 dont 119 ont été retenus pour la suite des études.

Cette contrainte temps ne nous a pas permis d'effectuer des fosses pour les descriptions pédologiques. Nous avons réalisé les descriptions avec les carottes prélevées sur 1m de profondeur. Par conséquent, nous estimons que ces descriptions sont approximatives par rapport à celles obtenues si l'utilisation des fosses pédologiques a eu lieu.

En outre, un des objectifs a été d'uniformiser le mode d'usage des terres des parcelles de prélèvement en choisissant celles non encore cultivées et occupées par du *bozaka* tout au long de l'année. Cette situation a été difficile à trouver sur le trajet Antananarivo-Tamatave. Dans certains sites, nous étions obligés d'échantillonner sur des parcelles sous eucalyptus ou encore sous d'autres types de forêt. Ces conditions ont pu influencer sur l'estimation de la teneur en carbone organique du sol pour ces sites.

Echantillonner uniquement sur les zones de *tanety* nous a permis d'identifier 7 groupes de sol. Pourtant, le nombre de sites a été très limité pour les vertisols et les calcaric regosols. Le nombre d'échantillon prélevé était insuffisant pour la prédiction des propriétés par groupe de sol avec les signatures spectrales pour ces deux groupes de sol.

3.1.2 Travaux d'analyse en laboratoire

Les analyses des formes du fer et de l'aluminium avec les méthodes CBD et d'extraction à l'oxalate ont été entièrement réalisées à Madagascar avec un spectromètre d'absorption atomique. Les formes de la silice n'ont pas pu être analysées car le laboratoire ne dispose pas encore de la lampe nécessaire à la lecture des résultats en cet élément. Cependant, le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ serait un indicateur pertinent lors des travaux de caractérisation et de classification des sols.

Pour le cas de la prédiction de la teneur en fer et en carbone organique à partir des variables de couleur, nous étions contraints à nous arrêter au stade calibration. Ceci est dû à l'insuffisance des échantillons analysés en laboratoire pour former un lot de calibration et un lot de validation. Les coûts des analyses en ces deux éléments en sont la principale raison.

3.1.3 Travaux de traitement des données

Comme il a été énoncé précédemment, les exploitations des données d'analyse des vertisols et des calcaric regosols ont été très limitées à cause du nombre insuffisant des échantillons. Les échantillons utilisés pour les prédictions des diverses propriétés des sols avec les signatures spectrales sont très hétérogènes et proviennent de divers sites avec des conditions pédoclimatiques très différentes. Cette hétérogénéité a eu des impacts sur la performance obtenue sur les prédictions à partir des spectres MIR.

Pour les analyses de la sensibilité des sols aux climats, les démarches adoptées consistaient uniquement en des analyses qualitatives. Les résultats obtenus identifient les constituants

sensibles sans pour autant donner des estimations quantitatives sur l'importance de la sensibilité.

Pour le cas des études de la dynamique du carbone du sol avec le modèle RothC, les données sur l'ETP ne sont pas disponibles pour chaque site d'études. Nous avons dû recourir à une extraction de ces ETP à partir de la base de données mondiale de la FAO. Nous estimons que les valeurs pour chaque site, si des mesures ont eu lieu, et les valeurs obtenues avec le logiciel de la FAO pourraient présenter de légères différences.

3.2 PERSPECTIVES POUR LES RECHERCHES FUTURES

En tant que travail exploratoire sur l'analyse de la sensibilité des sols aux climats à l'échelle du pays, plusieurs points méritent encore d'être affinés et analysés de manière détaillée. Tout en tenant compte des limites évoquées ci-dessus, les orientations suivantes pourront être développées pour des pistes de recherche émanant des résultats déjà obtenus dans la présente thèse :

3.2.1 Affinage des résultats obtenus

- Identifier et choisir quelques sites jugés représentatifs de la diversité climatique et de la diversité des sols à Madagascar et réaliser des études de terrain plus détaillées dans ces sites : identification et analyses des éléments minéraux, affinage des descriptions sur des fosses pédologiques, collecte des données nécessaires pour les traitements des données (exemple : les *inputs* pour le calcul de l'ETP)...
- Augmenter le nombre d'échantillons analysés avec les méthodes conventionnelles pour: avoir des modèles de prédiction plus robustes avec les spectres de sol, pouvoir effectuer des validations sur les modèles de prédiction de la teneur en fer et en carbone organique obtenus en calibration avec les couleurs.

3.2.2 Constitution d'une base de données spectrales des sols de Madagascar

- Séparation de la fraction minérale et organique : analyses spectrales sur chaque fraction
- Essais de chauffage des échantillons à différentes températures pour étudier le passage de la goethite en hématite afin d'identifier les bandes relatives à ces deux constituants sur les spectres
- Analyses spectrales sur les extraits des analyses en fer et en aluminium CBD et oxalate pour étudier l'existence d'une éventuelle relation entre Al_{CBD} et gibbsite d'une part et pour identifier les bandes et les constituants ayant des liaisons avec le Fe et l'Al.

3.2.3 Cartographie de la sensibilité des sols aux climats

Ce travail nécessite encore de nombreux travaux de terrain pour collecter un maximum de données (échantillons). Dans un premier temps, la cartographie pourra être réalisée à l'échelle régionale. Les éléments suivants sont à considérer pour y parvenir :

- Mise à jour de la carte pédologique des zones d'études
- Elaboration des indicateurs de sensibilité des sols
- Analyses détaillées de la sensibilité
- Prédiction de la sensibilité future en fonction des scénarii de changement climatique
- Spatialisation et cartographie de la sensibilité

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adderley, W.P., Simpson, I.A. and Davidson, D.A., 2002. Colour description and quantification in mosaic images of soil thin sections. *Geoderma*, 108: 181-195.
- Agren, G.I. and Bosatta, E., 2002. Reconciling differences in predictions of temperature responses of soil organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 24: 129-132.
- Agren, G.I. and Wetterstedt, J.A.M., 2007. What determines the temperature response of soil organic matter decomposition? *Soil Biology & Biochemistry*, 39: 1794-1798.
- Aïchi, H., Fouad, Y., Walter, C., Viscarra Rossel, R.A., Lili Chabaane, Z. and Sanaa, M., 2009. Regional predictions of soil organic carbon content from spectral reflectance measurements. *Biosystems Engineering*, 104(3): 442-446.
- Alvarez, A. and Lavado, R.S., 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma*, 83: 127-141.
- Artz, R.R.E., Chapman, S.J., Jean Robertson, A.H., Potts, J.M., Laggoun-Défarge, F., Gogo, S., Comont, L., Disnar, J.-R. and Francez, A.-J., 2008. FTIR spectroscopy can be used as a screening tool for organic matter quality in regenerating cutover peatlands. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(2): 515-527.
- Aubert, G. and Bourgeat, F., 1972. Les sols ferrallitiques à Madagascar. *Revue de Géographie de Madagascar*, 20: 1-23.
- Balan, E., Lazzeri, M., Morin, G. and Mauri, F., 2006. First-principles study of the OH-stretching modes of gibbsite. *American Mineralogist*, 91: 115-119.
- Bardy, M., Fritsch, E., Derenne, S., Allard, T., do Nascimento, N.R. and Bueno, G.T., 2008. Micromorphology and spectroscopic characteristics of organic matter in waterlogged podzols of the upper Amazon basin. *Geoderma*, 145(3-4): 222-230.
- Barrett, L.R., 2002. Spectrophotometric color measurement in situ in well drained sandy soils. *Geoderma*, 108: 49-77.
- Barrios, E., 2007. Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics*.
- Barron, V. and Torrent, J., 1984. Influence of aluminum substitution on the color of synthetic hematites. *Clays and Clay Minerals*, 32(2): 157-158.
- Ben-Dor, E. and Singer, A., 1987. Optical density of vertisol clays suspensions in relation to sediment volume and dithionite—citrate—bicarbonate extractable iron. *Clays and Clay Minerals*, 35(311-317).

- Bourgeat, F. and Aubert, G., 1972. Les sols ferrallitiques à Madagascar. Madagascar revue de géographie, Université de Madagascar: 1-23.
- Çeşmeci, D. and Güllü, M.K., 2009. Phase-correlation-based hyperspectral image classification using multiple class representatives obtained with k-means clustering. International Journal of Remote Sensing, 30(14): 3827-3834.
- Chang, C.-W., Laird, D.A., Mausbach, M.J. and Hurburgh Jr., C.R., 2001. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy—Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. Soil Sci. Soc. Am. J., 65: 480-490.
- Chang, C.-W., Laird, D.A., Mausbach, M.J. and Hurburgh Jr., C.R., 2011. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy—Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. Soil Sci. Soc. Am. J., 65: 480-490.
- Churchman, G.J., Slade, P.G., Self, P.G. and Janik, L.J., 1994. Nature of Interstratified Kaolin-smectites in Some Australian Soils. Australian Journal of Soil Research, 32: 805-822.
- Cobo, J.G., Dercon, G., Yekeye, T., Chapungu, L., Kadzere, C., Murwira, A., Delve, R. and Cadisch, G., 2010. Integration of mid-infrared spectroscopy and geostatistics in the assessment of soil spatial variability at landscape level. Geoderma, 158(3-4): 398-411.
- Cornet, A., 1973. Essai de cartographie bioclimatique à Madagascar. Terre malgache n°15. Université de Madagascar- Ecole Supérieure Nationale Agronomique. 14 pages.
- Coventry, R.J. and Robinson, P.J., 1981a. Colour Groups Derived from Numerical Classification of the Munsell Soil Colour Chips. Australian Journal of Soil Research, 19: 103-112.
- CPCS, 1967. Classification des sols. Travaux C.P.C.S. Rapp. Mult. 96p.
- Dabin, B., 1985. Les sols tropicaux acides. Cahier ORSTOM, Série Pédologique, XXI: 7-19.
- Dale, V.H. and Polasky, S., 2007. Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. Ecological Economics, 64(2): 286-296.
- Davidson, E.A. and Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature, 440: 165-173.
- Delenne, M.F. and Pelletier, F., 1981. Carte du potentiel des unités Physiques, au 1:1 000 000. ORSTOM. Bondy, France.
- Do Nascimento, N.R., Bueno, G.T., Fritsch, E., Herbillon, A.J., Allard, T., Melfi, A.J., Astolfo, R., Boucher, H. and Li, Y., 2004. Podzolization as a deferrallitization process: a study of an Acrisol-Podzol sequence derived from palaeozoic sandstones in the northern upper Amazon Basin. European Journal of Soil Science, 55: 523-538.

- Droogers, P., 2004. Adaptation to climate change to enhance food security and preserve environmental quality: example for southern Sri Lanka. *Agricultural Water Management*, 66: 15-33.
- Du, C., Linker, R. and Shaviv, A., 2008. Identification of agricultural Mediterranean soils using mid-infrared photoacoustic spectroscopy. *Geoderma*, 143(1-2): 85-90.
- Duchaufour, P., Souchier, B. and Bonneau, M., 1991. *Pédologie. Tome 2 : Constituants et propriétés du sol.* Edition Masson (Paris-FRA): 459p.
- Easterling, W. and Apps, M., 2005. Assessing the consequences of climate change for food and forest resources: A view from the IPCC. *Climatic Change* 70: 165-189.
- Ebeid, M.M., Lal, R., Hall, G.F. and Miller, E., 1995. Erosion effects on soil properties and soybean yield of a Miamian soil in Western Ohio in a season with below normal rainfall. *Soil Technology*, 8: 97-108.
- Epron, D., Farque, L., Lucot, É. and Badot, P.-M., 1999. Soil CO₂ efflux in a beech forest: dependence on soil temperature and soil water content. *Ann. For.Sci*, 56: 221-226.
- Eschenbrenner, V., 1988. Les glébules des sols de Côte d'Ivoire. Nature et origine en milieu ferrallitique. Modalités de leur concentration. Rôle des termites. Thèse de Doc. es Sci., 498 p.+ 282 p. Publié en 1988, ORSTOM, T.D.M., n°39.
- Falinirina, V., 2010. Valorisation agricole des apports organiques contenus dans les déchets urbains: qualité des matières organiques et service écosystémiques. Thèse de Doctorat. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques- Université d'Antananarivo. 173 pages.
- Falloon, P., Jones, C.D., Cerri, C.E., Al-Adamat, R., Kamoni, P., Bhattacharyya, T., Easter, M., Paustian, K., Killian, K., Coleman, K. and Milne, E., 2007. Climate change and its impact on soil and vegetation carbon storage in Kenya, Jordan, India and Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 122(1): 114-124.
- FAO, 1974. Carte pédologique de Madagascar.
- FAO, 2007. Adaptation to climate change in agriculture, forestry and fisheries: perspective, framework and priorities. Rome (24p).
- Farina, R., Seddaiu, G., Orsini, R., Steglich, E., Roggero, P.P. and Francaviglia, R., 2011. Soil carbon dynamics and crop productivity as influenced by climate change in a rainfed cereal system under contrasting tillage using EPIC. *Soil & Tillage Research*, 112: 36-46.
- Feller, C. and Beare, M.H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79: 69-116.

- Feller, C., Fritsch, E., Poss, R. and Valentin, C., 1991. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'ouest, en particulier). *Cahier ORSTOM, Série Pédologique*, XXVI(1): 25-36.
- Fernandez, R.N., Schulze, D.G., Coffin, D.L. and Van Scoyocn, G.E., 1988. Color, organic carbon, and pesticide adsorption relationships in a soil landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52: 1023-1026.
- Flanagan, L.B. and Johnson, B.G., 2005. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130: 237-253.
- Foucart, T., 1997. L'analyse des données, mode d'emploi. *Presse Universitaire de Rennes*: 188p.
- Fritsch, E., Morin, G., Bedidi, A., Bonnin, A., Balan, E., Caquineau, S. and Calas, G., 2005. Transformation of hematite and Al-poor goethite to Al-rich goethite and associated yellowing in a ferralitic clay soil profil of the middle Amazon Basin (Manaus, Brazil). *European Journal of Soil Science*, 56: 575-588.
- Grinand, C., Rajaonarivo, A., Bernoux, M., Pajot, V., Brossard, M., Razafimbelo, T.M., Albrecht, A. and Le Martret, H., 2009. Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols*, 16(1): 23-33.
- Guerrero, C., Rossel, R.A.V. and Mouazen, A.M., 2010. Special issue [']Diffuse reflectance spectroscopy in soil science and land resource assessment'. *Geoderma*, 158(1-2): 1-2.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G. and Jarvis, A., 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25: 1965-1978.
- Howden, S.M., Soussana, J.-F., Tubiello, F.N., Chhetri, N., Dunlop, M. and Melnke, H., 2007. Adapting agriculture to climate change. *PNAS*, 104(50): 19691-19696.
- INSTAT, 2009. Poids des secteurs dans le PIB. *Direction des synthèses économiques*.
- Ip, K.H., Stuart, B.H., Ray, A.S. and Thomas, P.S., 2008. A spectroscopic investigation of the weathering of a heritage Sydney sandstone. *Spectrochimica Acta Part A*, 71: 1032-1035.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, In. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 996.

- Janik, L.J. and Skjemstad, J.O., 1995. Characterization and Analysis of Soils Using Mid-infrared Partial Least- Squares. II.* Correlations with Some Laboratory Data. *Australian Journal of Soil Research*, 33: 637-650.
- Janik, L.J. and Skjemstad, J.O., 1995. Characterization and Analysis of Soils Using Mid-infrared Partial Least- Squares. II.* Correlations with Some Laboratory Data. *Australian Journal of Soil Research*, 33: 637-650.
- Janik, L.J., Forrester , S.T. and Rawsonb, A., 2009. The prediction of soil chemical and physical properties from mid-infrared spectroscopy and combined partial least-squares regression and neural networks (PLS-NN) analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 97: 179-188.
- Janik, L.J., Merry, R.H. and Skjemstad, J.O., 1998. Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions? *Australian Journal of Experimental Agriculture*,, 38: 681-696.
- Janik, L.J., Skjemstad, J.O., Shepherd, K.D. and Spouncer, L.R., 2007. The prediction of soil carbon fractions using mid-infrared-partial least square analysis. *Australian Journal of Soil Research*, 45: 73-81.
- Jenkinson, D.S. and Rayner, J.H., 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, 123: 298-305.
- King, A.W., Gunderson, C.A., Post, W.M., Weston, D.J. and Wullschleger, S.D., 2006. Plant respiration in warmer world. *Science*, 312: 356-357.
- Kirschbaum, M.U.F., 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology & Biochemistry*, 27(6): 753-760.
- Kloprogge, J.T., Mahmutagic, E. and Frost, R.L., 2006. Mid-infrared and infrared emission spectroscopy,of Cu-exchanged montmorillonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 296: 640-646.
- Knorr, W., Prentice, I.C., House, J.I. and Holland, E.A., 2005. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 433: 298-300.
- Konen, M.E., Burras, C.L. and Sandor, J.A., 2003. Organic Carbon, Texture, and Quantitative Color Measurement Relationships for Cultivated Soils in North Central Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67: 1823-1830.
- Lal, M., Singh, K.K., Rathore, L.S., Srinivasan, G. and Saseendran, S.A., 1998. Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 89: 101-114.

- Lal, R., 2007. World soils and global issues. *Soil & Tillage Research* 97: 1-4.
- Lal, R., 2009. Soils and world food security. *Soil & Tillage Research*, 102: 1-4.
- Leemans, R. and Eickhout, B., 2004. Another reason for concern: regional and global impacts on ecosystems for different levels of climate change. *Global Environmental Change*, 14: 219-228.
- Leiros, M.C., Trasar-Cepeda, C., Seoane, S. and Gil-Sotres, F., 1999. Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture. *Soil Biology & Biochemistry*, 31: 327-335.
- Levin, N., Ben-Dor and Singer, A., 2005. A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments. *International Journal of Remote Sensing*, 26(24): 5475-5492.
- Linker, R., Shmulevich, I., Kenny, A. and Shaviv, A., 2005. Soil identification and chemometrics for direct determination of nitrate in soils using FTIR-ATR mid-infrared spectroscopy. *Chemosphere*, 61: 652-658.
- Ludwig, B., Nitschke, R., Terhoeven-Urselmans, T., Michel, K. and Flessa, H., 2008. Use of mid-infrared spectroscopy in the diffuse-reflectance mode for the prediction of the composition of organic matter in soil and litter. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 171: 384-391.
- Luers, A.L., 2005. The surface of vulnerability: An analytical framework for examining environmental change. *Global Environmental Change*, 15: 214-223.
- Lugato, E. and Berti, A., 2008. Potential carbon sequestration in a cultivated soil under different climate change scenarios: A modelling approach for evaluating promising management practices in north-east Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 128: 97-103.
- Madari, B.E., Reeves Iii, J.B., Machado, P.L.O.A., Guimarães, C.M., Torres, E. and McCarty, G.W., 2006. Mid- and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferralsols. *Geoderma*, 136(1-2): 245-259.
- Martin, D., Lal, T., Sachdev, C.B. and Sharma, J.P., 2010. Soil organic carbon storage changes with climate change, landform and land use conditions in Garhwal hills of the Indian Himalayan mountains. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 138: 64-73.
- Mathieu, R., Pouget, M., Cervelle, B. and Escadafal, R., 1998. Relationships between Satellite-Based Radiometric Indices Simulated Using Laboratory Reflectance Data and Typic Soil Color of an Arid Environment. *Remote Sensing of Environment*, 66: 17-28.

- McBratney, A.B., Minasny, B. and Viscarra Rossel, R., 2006. Spectral soil analysis and inference systems: A powerful combination for solving the soil data crisis. *Geoderma*, 136(1-2): 272-278.
- Mehra, O.P. and Jackson, M.L., 1960. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite–citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 7: 317-327.
- Michel, K., Terhoeven-Urselmans, T., Nitschke, R., Steffan, P. and Ludwig, B., 2009. Use of near- and mid-infrared spectroscopy to distinguish carbon and nitrogen originating from char and forest-floor material in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 172: 63-70.
- Millenium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystem and human well being: a framework for assessment*.
- Minasny, B., Tranter, G., McBratney, A.B., Brough, D.M. and Murphy, B.W., 2009. Regional transferability of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopic prediction for soil chemical properties. *Geoderma*, 153: 155-162.
- Ministère de l'agriculture, 2004. *Recensement général de l'agriculture*. Madagascar.
- Mouazen, A.M., Karoui, R., Deckers, J., De Baerdemaeker, J. and Ramon, H., 2007. Potential of visible and near-infrared spectroscopy to derive colour groups utilising the Munsell soil colour charts. *Biosystems Engineering*, 97: 131-143.
- Munsell Color Company, 2000. *Munsell Soil Color Charts, 2000 Revised Washable Edition*. Gretagmacbeth, New Windsor, NY.
- Nguyen, T., Janik, L.J. and Raupach, M., 1991. Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform (DRIFT) Spectroscopy in Soil Studies. *Australian Journal of Soil Research*, 29: 49-67.
- Pedro, G. and Delmas, A.-B., 1980. Regards actuels sur les phénomènes d'altération hydrolytique. Leur nature, leur diversité et leur place au cours de l'évolution géochimique superficielle. *Cahier ORSTOM, Série Pédologique*, XVIII(n° 3-4): 217-234.
- Pedro, G., 1968. Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. *Revue Géog. Phys. Géol. Dyn.*, X(5): 457-470.
- Peng, Y.Y. and Dang, Q.-L., 2002. Effects of soil temperature on biomass production and allocation in seedlings of four boreal tree species. *Forest Ecology and Management*, 180: 1-9.
- Petit, S., Decarreau, A. and Righi, D., 2003. Utilisation de dépôts d'argile sur lame de verre pour leur étude en spectroscopie infrarouge. *C. R. Geoscience*, 335: 735-741.
- Pirie, A., Singht, B. and Islam, K., 2005. Ultraviolet, visible, near-infrared and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopic techniques to predict several soil properties *Australian Journal of Soil Research*, 43: 713-721.

- Polsky, C., Neft, R. and Yarnal, B., 2007. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram. *Global Environmental Change*, 17: 472-485.
- Pontes, M.J.C., Cortez, J., Galvão, R.K.H., Pasquini, C., Araújo, M.C.U., Coelho, R.M., Chiba, M.K., Ferreira de Abreu, M. and Madari, B.E., 2009. Classification of Brazilian soils by using LIBS and variable selection in the wavelet domain. *Analytica Chimica Acta* 642: 12-18.
- Poulenard, J., Perrette, Y., Fanget, B., Quetin, P., Trevisan, D. and Dorioz, J.M., 2009. Infrared spectroscopy tracing of sediment sources in a small rural watershed (French Alps). *Science of The Total Environment*, 407(8): 2808-2819.
- Rabeharisoa, L., 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Faculté des Sciences- Université d'Antananarivo, Madagascar. 202 pages.
- Raunet, M., 1997. Les Ensembles Morpho-pédologiques de Madagascar, Projet Conservation des sols, Cirad, Madagascar. 76p.
- Razafimbelo, T., 2005. Stockage et protection du carbone dans un sol sous système en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres Malgaches. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier – Ecole Doctorale Biologique des systèmes intégrés –agronomie –environnement, 162 pp.
- Razafimbelo, T.M., Albrecht, A., Oliver, R., Chevallier, T., Chapuis-Lardy, L. and Feller, C., 2008. Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. *Soil & Tillage Research*, 98: 140-149.
- Razafindramanana, N.C., 2006. Afforestation et stockage de carbone en lisière Ouest du corridor forestier de Fianarantsoa (Madagascar). Mémoire de DEA. Département des eaux et Forêts- Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques- Université d'Antananarivo. , 78 pp.
- Reeves III, J.B., 2010. Near- versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: Where are we and what needs to be done? *Geoderma*, In Press, Corrected Proof.
- Reeves, J.B., 2009. Near- versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: Where are we and what needs to be done? *Geoderma*, doi:10.1016/j.geoderma.2009.04.005.
- Riquier, J., 1966. Les sols ferrallitiques. *Cahier ORSTOM, Série Pédologique*, 4(4): 33-37.
- Roederer, P., 1971. Les sols de Madagascar, ORSTOM.
- Rumpel, C., Janik, L.J., Skjemstad, J.O. and Kögel-Knabner, I., 2001. Quantification of carbon derived from lignite in soils using mid-infrared spectroscopy and partial least squares. *Organic Geochemistry*, 32: 831-839.

- Russell, J.D. and Fraser, A.R., 1971. I.R. spectroscopic evidence for interaction between hydronium ions and lattice OH groups in montmorillonite. *Clays and Clay Minerals*, 19: 55-59.
- Sanchez, P.A., Palm, C.A. and Buol, S.W., 2003. Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma*, 114: 157-185.
- Sánchez-Marañón, M., Huertas, R. and Melgosa, M., 2005. Colour variation in standard soil-colour charts. *Australian Journal of Soil Research*, 43(827-837).
- Scheinost, A.C. and Schwertmann, U., 1999. Color Identification of Iron Oxides and Hydroxysulfates: Use and Limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63: 1463-1471.
- Schulze, D.G., Nagel, J.L., Von Scoyoc, G.E., Henderson, T.L., Steinwand, M.F., Baumgardner, A.L. and Stott, D.E., 1993. Significance of organic carbon in determining soil colors. p. 71-90. In J.M. Bigham and E.J. Ciolkosz (ed.) *Soil Color*. SSSA Spec. Publ. 31, SSSA, Madison, WI.
- Segalen, P., 1956. la gibbsite dans les sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. *Fond documentaire ORSTOM*.
- Segalen, P., 1994. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique: Tome I,II,III. 579.
- Sellitto, V.M., Fernandes, R.B.A., Barrón, V. and Colombo, C., 2009. Comparing two different spectroscopic techniques for the characterization of soil iron oxides: Diffuse versus bidirectional reflectance. *Geoderma*, 149: 2-9.
- Shields, J.A., Paul, E.A., Arnaud, R.J.S. and Head, W.K., 1968. Spectrophotometric measurement of soil color and its relationship to moisture and organic matter. *Canadian Journal of Soil Science*, 48(271-280).
- Siefferman, G., 1969. Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial au milieu tropical., 6, Thèse Sciences nat. - Strasbourg, 290 pp.
- Singleton, P.L., 1991. Water Tables and Soil Colour as an Indicator of Saturation in Some Soils of the Waikato, New Zealand. *Australian Journal of Soil Research*, 29: 467-481.
- Skjemstad, J.O. and Dalal, R.C., 1987. Spectroscopic and Chemical Differences in Organic Matter of Two Vertisols Subjected to Long Periods of Cultivation. *Australian Journal of Soil Research*, 25: 323-335.
- Smidt, E. and Parravicini, V., 2009. Effect of sewage sludge treatment and additional aerobic post-stabilization revealed by infrared spectroscopy and multivariate data analysis. *Bioresource Technology*, 100(5): 1775-1780.
- Smith, P. and Fang, C., 2010. A warm response by soils. *Nature*, 464: 499-500.

- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M. and Wetterlind, J., 2010. Visible and NIR Infrared Spectroscopy in Soil Science. *Advances in Agronomy*, 107: 163-215.
- Swinton, S.M., Lupi, F., Robertson, G.P. and Hamilton, S.K., 2007. Ecosystem services and agriculture: Cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits. *Ecological Economics* 64: 245-252.
- Torrent, J., Schwertmann, U., Fechter, H. and Alferez, F., 1983. Quantitative relationships between soil colour and hematite content. *Soil Science*, 136: 354-358.
- Turner II, B.L., Kasperson, R.E., Matson, P.A., MacCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A.L., Martello, M.L., Polsky, C., Pulsipher, A. and Schilller, A., 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *PNAS*, 100(14): 8074-8079.
- Viscarra Rossel, R.A., 2004. ColoSol. Executable Software to Perform Colour Space Model Transformations for Soil Colour. <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/people/rvrossel/soft02.htm>.
- Viscarra Rossel, R.A., Fouad, Y. and Walter, C., 2008. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. *Biosystems Engineering*, 100(2): 149-159.
- Viscarra Rossel, R.A., Fouad, Y. and Walter, C., 2008. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. *Biosystems Engineering*, 100(2): 149-159.
- Viscarra Rossel, R.A., Jeon, Y.S., Odeh, I.O.A. and McBratney, A.B., 2008b. Using a legacy soil sample to develop a mid-IR spectral library. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46: 1-16.
- Viscarra Rossel, R.A., Jeon, Y.S., Odeh, I.O.A. and McBratney, A.B., 2008. Using a legacy soil sample to develop a mid-IR spectral library. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46: 1-16.
- Viscarra Rossel, R.A., Minasny, B., Roudier, P. and McBratney, A.B., 2006. Colour space models for soil science. *Geoderma*, 133: 320-337.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J. and 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.
- Volkoff, B., Melfi, A.J. and Pedro, G., 1989. Nature des oxydes de fer dans les sols du Brésil , répartition et fonction du climat. *Sci. Géol., Bull.*, 42(1): 15-25.

Walkley, A. and Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(29-38).

Williams, C.A., Hanan, N.P., Neff, J.C., Scholes, R.J., Berry, J.A., Denning, A.S. and Baker, D.F., 2007. Africa and the global carbon cycle. *Carbon Balance and Management*, 2(3): 1-13.

Wyszecki, G. and Stiles, W.S., 1982. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*,. Second Edition Wiley, New York.

Xu, X., Liu, W. and Kiely, G., 2011. Modeling the change in soil organic carbon of grassland in response to climate change: Effects of measured versus modelled carbon pools for initializing the Rothamsted Carbon model. *Agriculture, Ecosystems and Environment*: doi:10.1016/j.agee.2010.12.018.

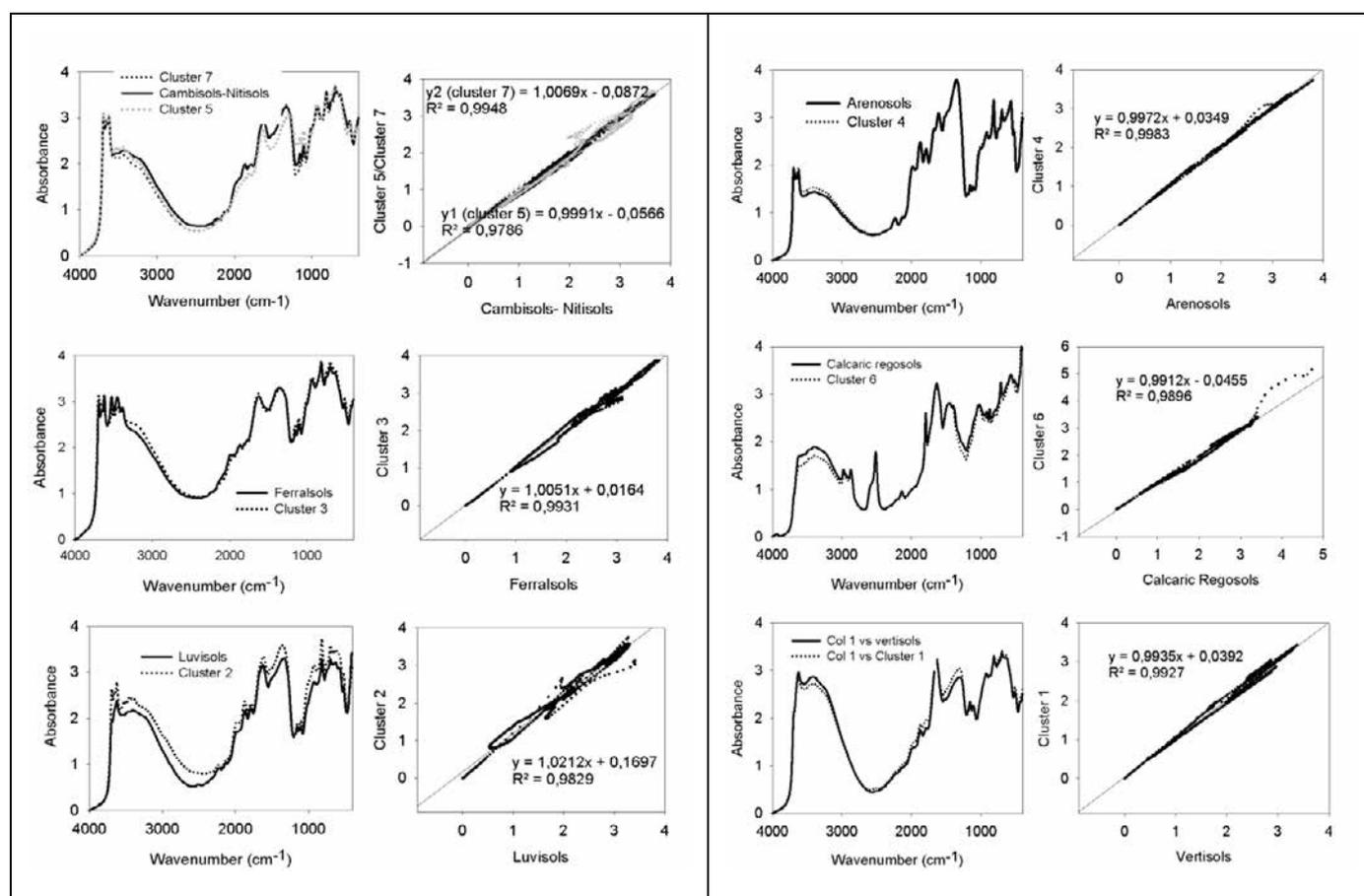
Zimmermann, M., Leifeld, J. and Fuhrer, J., 2007. Quantifying soil organic carbon fractions by infrared-spectroscopy. *Soil Biology & Biochemistry*, 39: 224-231.

ANNEXES

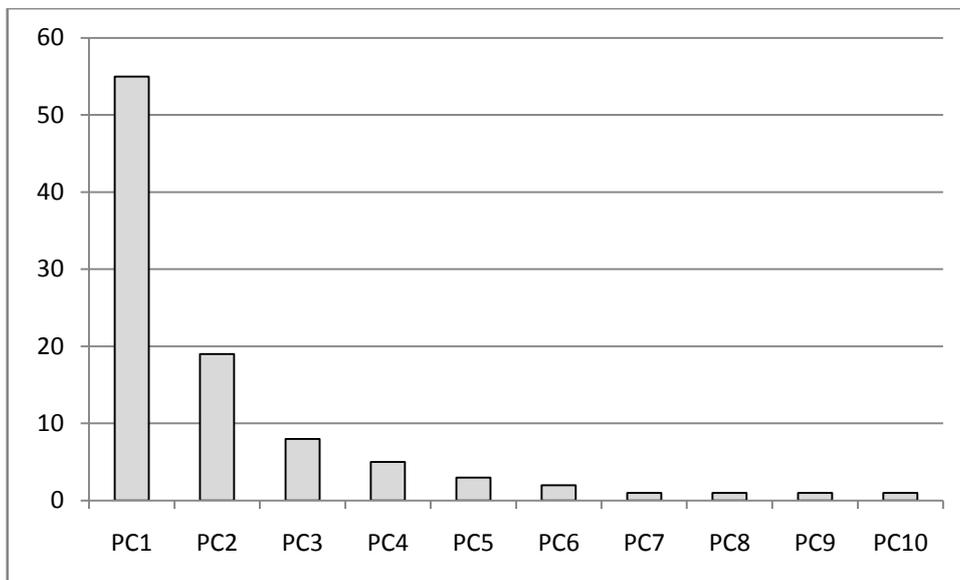
Annexe 2.1 : Echantillonnage sur des zones de tanety sous bozaka



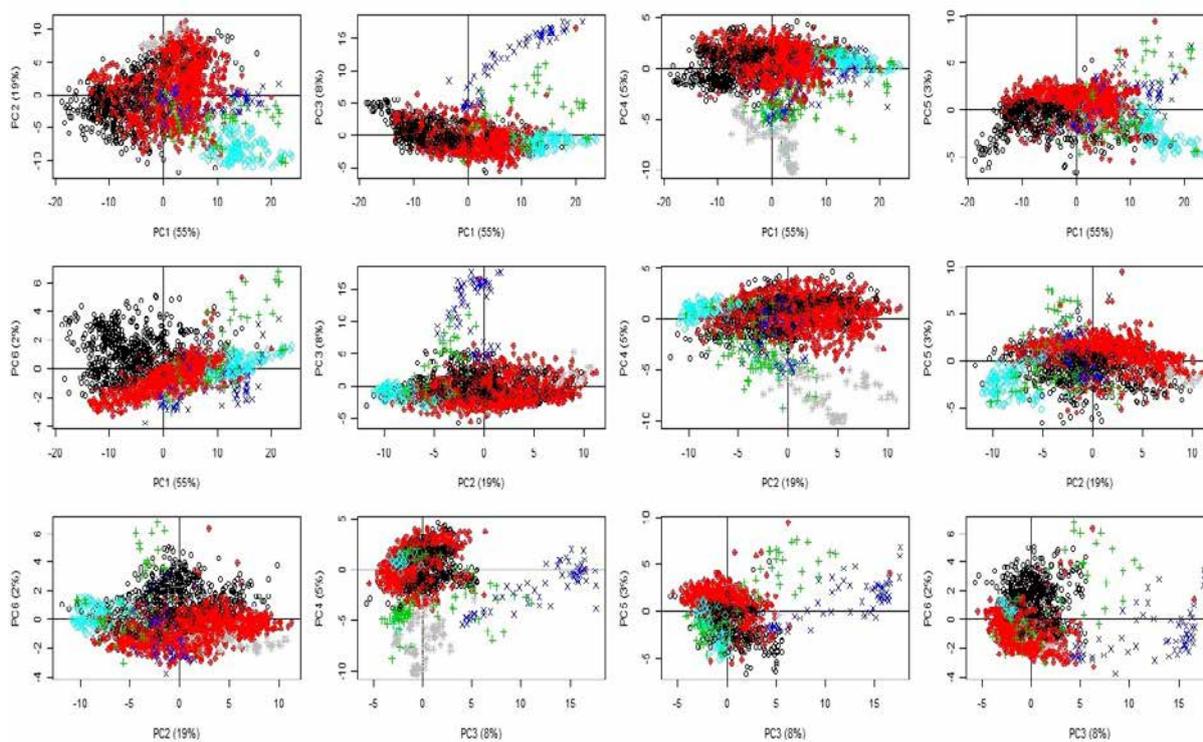
Annexe 3.1 : Corrélations entre clusters et spectres moyens en PLS-DA



Annexe 3.2 : Contributions des axes (valeurs propres) en % pour les ACP en classification supervisée



Annexe 3.3 : ACP des spectres en classification PLS-DA



Annexe 4.1 : Résultats des analyses en laboratoire sur 0-10 cm : Al_{CBD}, Fe_{CBD}, Fe_{OX}, Al_{OX}, C_{org}

| Code | Sol | Al _{CBD} (g.kg ⁻¹) | Fe _{CBD} (g.kg ⁻¹) | Al _{OX} (g.kg ⁻¹) | Fe _{OX} (g.kg ⁻¹) | C _{org} (g.kg ⁻¹ sol) |
|--------|------------|---|---|--|--|---|
| 2_03a | Cambisols | 4,78 | 26,67 | 1,74 | 2,56 | 28,26 |
| 2_05a | Ferralsols | 6,28 | 46,41 | 0,40 | 3,66 | 39,45 |
| 2_08a | Ferralsols | 3,32 | 13,36 | 1,96 | 3,70 | 30,29 |
| 2_10a | Ferralsols | 7,99 | 45,31 | 3,52 | 4,74 | 35,99 |
| 2_12a | Ferralsols | 9,35 | 38,03 | 3,22 | 2,05 | 35,30 |
| 2_13a | Ferralsols | 12,39 | 32,68 | 4,25 | 3,59 | 43,54 |
| 2_14a | Ferralsols | 5,82 | 28,22 | 3,50 | 2,17 | 34,69 |
| 2_15a | Ferralsols | 15,37 | 41,00 | 9,58 | 2,54 | 46,46 |
| 2_16a | Ferralsols | 5,82 | 25,44 | 2,28 | 1,68 | 36,86 |
| 2_17a | Ferralsols | 6,34 | 29,16 | 1,61 | 1,46 | 23,93 |
| 34_02a | Luvisols | 0,37 | 2,41 | 0,48 | 2,62 | 14,90 |
| 34_03a | Luvisols | 0,31 | 0,83 | | | 21,76 |
| 34_04a | Luvisols | 4,67 | 12,15 | 2,13 | 0,96 | 17,96 |
| 34_05a | Luvisols | 0,53 | 28,51 | 0,56 | 4,54 | 14,41 |
| 34_06a | Luvisols | 0,92 | 27,32 | 0,74 | 1,64 | 11,51 |
| 34_07a | Arenosols | 0,39 | 0,83 | | | 8,61 |
| 34_08a | Luvisols | 0,52 | 1,23 | 0,64 | 0,73 | 10,05 |
| 34_09a | Luvisols | 0,37 | 1,75 | 0,62 | 0,47 | 13,64 |
| 34_10a | Arenosols | 0,59 | 1,17 | 0,73 | 0,51 | 6,44 |
| 34_11a | Arenosols | 0,49 | 1,21 | 1,16 | 0,28 | 12,06 |
| 34_18a | Cambisols | 3,87 | 42,50 | 2,39 | 2,35 | 8,81 |
| 34_19a | Cambisols | 1,61 | 18,20 | 1,57 | 0,91 | 19,87 |
| 34_21a | Ferralsols | 0,64 | 24,35 | 1,94 | 1,98 | 23,06 |
| 34_22a | Ferralsols | 2,70 | 64,14 | 2,18 | 1,31 | 15,76 |
| 34_23a | Ferralsols | 5,34 | 74,79 | 3,96 | 1,78 | 33,00 |
| 4_04a | Nitisols | 5,40 | 75,06 | 2,00 | 3,34 | 19,74 |
| 4_05a | Arenosols | 0,69 | 29,89 | 0,75 | 0,33 | 2,87 |
| 4_06a | Arenosols | 3,06 | 62,30 | 2,14 | 0,86 | 6,16 |
| 4_13a | Cambisols | 1,88 | 69,05 | 0,61 | 2,24 | 12,53 |
| 4_14a | Cambisols | 2,56 | 97,15 | 0,89 | 2,39 | 10,73 |
| 4_15a | Nitisols | 3,43 | 31,18 | 0,91 | 1,59 | 16,88 |
| 4_18a | Ferralsols | 2,83 | 91,29 | 3,05 | 2,81 | 20,99 |
| 4_19a | Ferralsols | 14,14 | 55,01 | 5,12 | 6,94 | 28,46 |
| 4_21a | Ferralsols | 7,68 | 34,86 | 2,04 | 2,01 | 34,83 |
| 4_23a | Ferralsols | 4,19 | 70,94 | 1,43 | 1,05 | 19,74 |
| 4_24a | Ferralsols | 5,79 | 32,17 | 1,43 | 3,19 | 23,25 |
| 4_25a | Ferralsols | 6,71 | 28,99 | 1,73 | 1,40 | 21,34 |
| 4_26a | Ferralsols | 5,52 | 27,70 | 1,68 | 1,26 | 19,32 |
| 6_01a | Vertisols | 2,30 | 40,67 | 1,68 | 6,21 | 20,62 |

| | | | | | | |
|-------|------------|-------|-------|------|------|-------|
| 6_06a | Cambisols | 1,33 | 14,44 | 0,81 | 4,25 | 18,43 |
| 6_13a | Cambisols | 5,04 | 31,70 | 2,45 | 2,98 | 26,48 |
| 6_14a | Ferralsols | 9,80 | 49,69 | 1,42 | 1,19 | 24,05 |
| 6_19a | Vertisols | 0,72 | 4,85 | 0,63 | 0,45 | 5,07 |
| 6_26a | Cambisols | 1,44 | 6,79 | 1,49 | 1,41 | 22,49 |
| 6_27a | Cambisols | 1,25 | 18,10 | 0,65 | 1,42 | 12,46 |
| 6_29a | Vertisols | 0,68 | 4,78 | 1,25 | 1,70 | 13,91 |
| 6_30a | Nitisols | 0,49 | 5,12 | 0,58 | 1,20 | 10,35 |
| 7_02a | Luvisols | 0,84 | 3,43 | 1,14 | 0,50 | 18,98 |
| 7_07a | Arenosols | 0,88 | 5,55 | 1,15 | 0,29 | 6,06 |
| 7_08a | Luvisols | 0,46 | 3,16 | 0,98 | 0,29 | 9,57 |
| 7_09a | Arenosols | 0,51 | 3,87 | 1,26 | 0,24 | 7,08 |
| 7_10a | Arenosols | 1,26 | 7,26 | 1,44 | 0,49 | 10,98 |
| 7_11a | Arenosols | 0,45 | 0,88 | 0,63 | 0,73 | 9,69 |
| 7_12a | Arenosols | 0,90 | 4,93 | 0,88 | 0,91 | 12,47 |
| 7_14a | Cambisols | 1,48 | 16,66 | 0,62 | 0,72 | 11,03 |
| 7_15a | Cambisols | 2,11 | 10,02 | 0,58 | 0,50 | 15,21 |
| 7_19a | Nitisols | 1,31 | 12,56 | 0,87 | 0,90 | 12,10 |
| 7_23a | Cambisols | 1,95 | 27,56 | 1,05 | 1,21 | 13,31 |
| 7_24a | Ferralsols | 5,10 | 16,54 | 1,56 | 1,43 | 23,93 |
| 7_25a | Ferralsols | 11,12 | 44,55 | 1,52 | 2,03 | 28,09 |
| 7_26a | Ferralsols | 7,04 | 23,04 | 3,88 | 1,73 | 29,06 |
| 7_28a | Ferralsols | 3,82 | 11,33 | 1,25 | 1,04 | 23,35 |
| 7_32a | Ferralsols | 6,67 | 31,80 | 1,76 | 3,90 | 27,88 |

Annexe 4.2 : Résultats de l'analyse granulométrique sur 20-30 cm

| Code | Sol | Argile | Limon | Sable |
|-------|------------|--------|-------|-------|
| 2_01c | Cambisols | 38,08 | 16,41 | 45,52 |
| 2_02c | Ferralsols | 13,52 | 4,71 | 81,77 |
| 2_03c | Cambisols | 40,48 | 8,39 | 51,13 |
| 2_04c | Cambisols | 34,44 | 11,67 | 53,90 |
| 2_05c | Ferralsols | 43,59 | 9,18 | 47,23 |
| 2_06c | Cambisols | 18,47 | 8,97 | 72,56 |
| 2_08c | Ferralsols | 17,87 | 13,31 | 68,82 |
| 2_09c | Ferralsols | 30,80 | 11,43 | 57,77 |
| 2_10c | Ferralsols | 31,56 | 28,68 | 39,76 |
| 2_11c | Ferralsols | 28,67 | 11,87 | 59,45 |
| 2_12c | Ferralsols | 51,90 | 12,78 | 35,32 |
| 2_13c | Ferralsols | 53,88 | 29,76 | 16,36 |
| 2_14c | Ferralsols | 37,93 | 18,59 | 43,48 |
| 2_15c | Ferralsols | 31,78 | 25,47 | 42,74 |

| | | | | |
|--------|-------------------|-------|-------|-------|
| 2_16c | Ferralsols | 15,65 | 4,12 | 80,23 |
| 2_17c | Ferralsols | 50,83 | 8,67 | 40,50 |
| 34_02c | Luvisols | 18,13 | 10,82 | 71,05 |
| 34_03c | Luvisols | 20,43 | 12,77 | 66,80 |
| 34_04c | Luvisols | 41,25 | 14,19 | 44,57 |
| 34_05c | Luvisols | 14,38 | 14,69 | 70,92 |
| 34_06c | Luvisols | 25,18 | 14,57 | 60,26 |
| 34_07c | Arenosols | 7,15 | 4,76 | 88,09 |
| 34_08c | Luvisols | 19,40 | 18,15 | 62,45 |
| 34_09c | Luvisols | 8,85 | 11,71 | 79,44 |
| 34_10c | Arenosols | 3,39 | 9,81 | 86,80 |
| 34_11c | Arenosols | 10,36 | 6,39 | 83,25 |
| 34_12c | Nitisols | 14,55 | 9,35 | 76,09 |
| 34_14c | Nitisols | 29,34 | 20,37 | 50,29 |
| 34_15c | Cambisols | 47,15 | 15,32 | 37,53 |
| 34_16c | Cambisols | 47,66 | 24,78 | 27,56 |
| 34_17c | Cambisols | 40,33 | 23,13 | 36,54 |
| 34_18c | Cambisols | 53,96 | 19,44 | 26,60 |
| 34_19c | Cambisols | 29,78 | 10,53 | 59,69 |
| 34_20c | Cambisols | 55,29 | 11,60 | 33,11 |
| 34_21c | Ferralsols | 45,34 | 19,71 | 34,95 |
| 34_22c | Ferralsols | 49,18 | 16,38 | 34,44 |
| 34_23c | Ferralsols | 49,67 | 22,95 | 27,38 |
| 4_01c | Arenosols | 24,93 | 5,78 | 69,30 |
| 4_03c | Calcaric regosols | 15,37 | 76,02 | 8,61 |
| 4_04c | Nitisols | 56,05 | 22,06 | 21,89 |
| 4_05c | Arenosols | 14,75 | 7,75 | 77,50 |
| 4_06c | Arenosols | 10,16 | 12,12 | 77,72 |
| 4_10c | Cambisols | 29,76 | 16,87 | 53,37 |
| 4_11c | Cambisols | 28,88 | 24,93 | 46,19 |
| 4_12c | Cambisols | 32,03 | 27,68 | 40,29 |
| 4_13c | Cambisols | 31,77 | 43,08 | 25,14 |
| 4_14c | Cambisols | 45,26 | 22,15 | 32,59 |
| 4_15c | Nitisols | 46,26 | 18,43 | 35,30 |
| 4_16c | Nitisols | 41,73 | 13,02 | 45,26 |
| 4_17c | Nitisols | 30,39 | 33,73 | 35,88 |
| 4_18c | Ferralsols | 38,82 | 13,66 | 47,52 |
| 4_19c | Ferralsols | 27,52 | 28,21 | 44,27 |
| 4_20c | Ferralsols | 32,87 | 21,82 | 45,31 |
| 4_21c | Ferralsols | 45,49 | 10,58 | 43,93 |
| 4_22c | Ferralsols | 27,33 | 12,47 | 60,21 |
| 4_23c | Ferralsols | 41,54 | 13,98 | 44,48 |
| 4_24c | Ferralsols | 38,09 | 16,20 | 45,72 |
| 4_25c | Ferralsols | 35,18 | 17,37 | 47,45 |

| | | | | |
|-------|-------------------|-------|-------|-------|
| 4_26c | Ferralsols | 31,88 | 6,30 | 61,83 |
| 6_01c | Vertisols | 47,41 | 28,25 | 24,34 |
| 6_02c | Nitisols | 40,41 | 44,30 | 15,28 |
| 6_05c | Cambisols | 38,20 | 24,05 | 37,75 |
| 6_06c | Cambisols | 18,41 | 28,88 | 52,71 |
| 6_08c | Cambisols | 32,45 | 9,03 | 58,52 |
| 6_10c | Ferralsols | 11,34 | 5,71 | 82,95 |
| 6_11c | Cambisols | 52,73 | 30,74 | 16,52 |
| 6_13c | Cambisols | 35,54 | 43,25 | 21,21 |
| 6_14c | Ferralsols | 52,37 | 9,25 | 38,38 |
| 6_15c | Ferralsols | 33,79 | 6,08 | 60,13 |
| 6_16c | Nitisols | 56,86 | 13,28 | 29,87 |
| 6_18c | Nitisols | 35,63 | 25,69 | 38,68 |
| 6_19c | Vertisols | 40,83 | 26,80 | 32,37 |
| 6_20c | Cambisols | 14,31 | 16,01 | 69,68 |
| 6_21c | Cambisols | 19,56 | 6,80 | 73,64 |
| 6_22c | Cambisols | 38,36 | 32,59 | 29,05 |
| 6_23c | Nitisols | 28,11 | 36,26 | 35,64 |
| 6_24c | Nitisols | 57,74 | 17,67 | 24,59 |
| 6_26c | Cambisols | 9,79 | 2,05 | 88,16 |
| 6_27c | Cambisols | 25,84 | 21,72 | 52,44 |
| 6_28c | Nitisols | 39,29 | 55,60 | 5,11 |
| 6_29c | Vertisols | 59,38 | 28,41 | 12,21 |
| 6_30c | Nitisols | 17,13 | 14,13 | 68,75 |
| 6_32c | Cambisols | 29,44 | 15,70 | 54,86 |
| 6_33c | Nitisols | 67,66 | 24,91 | 7,43 |
| 6_34c | Nitisols | 31,64 | 17,99 | 50,37 |
| 7_01c | Calcaric regosols | 21,96 | 27,06 | 50,99 |
| 7_02c | Luvisols | 12,56 | 6,68 | 80,76 |
| 7_04c | Nitisols | 25,70 | 13,36 | 60,94 |
| 7_07c | Arenosols | 9,93 | 4,69 | 85,38 |
| 7_08c | Luvisols | 7,20 | 10,24 | 82,56 |
| 7_09c | Arenosols | 9,95 | 4,81 | 85,24 |
| 7_10c | Arenosols | 3,97 | 7,94 | 88,09 |
| 7_11c | Arenosols | 7,80 | 1,94 | 90,26 |
| 7_12c | Arenosols | 30,63 | 23,74 | 45,63 |
| 7_13c | Cambisols | 36,00 | 7,85 | 56,15 |
| 7_14c | Cambisols | 30,76 | 9,28 | 59,96 |
| 7_15c | Cambisols | 29,52 | 8,77 | 61,70 |
| 7_16c | Cambisols | 20,67 | 10,49 | 68,84 |
| 7_17c | Nitisols | 28,66 | 9,77 | 61,56 |
| 7_18c | Nitisols | 34,86 | 18,03 | 47,11 |
| 7_19c | Nitisols | 35,29 | 13,85 | 50,86 |
| 7_20c | Cambisols | 27,32 | 17,67 | 55,01 |

| | | | | |
|-------|------------|-------|-------|-------|
| 7_21c | Cambisols | 46,24 | 25,07 | 28,69 |
| 7_22c | Cambisols | 38,25 | 15,80 | 45,95 |
| 7_23c | Cambisols | 56,78 | 10,40 | 32,82 |
| 7_24c | Ferralsols | 53,84 | 6,73 | 39,43 |
| 7_25c | Ferralsols | 9,66 | 62,40 | 27,94 |
| 7_26c | Ferralsols | 49,40 | 7,10 | 43,50 |
| 7_27c | Ferralsols | 46,15 | 19,76 | 34,08 |
| 7_28c | Ferralsols | 40,68 | 10,74 | 48,58 |
| 7_29c | Cambisols | 42,23 | 29,81 | 27,96 |
| 7_30c | Ferralsols | 33,91 | 14,22 | 51,87 |
| 7_31c | Ferralsols | 40,97 | 11,56 | 47,47 |
| 7_32c | Ferralsols | 54,49 | 31,09 | 14,42 |
| 7_33c | Ferralsols | 52,18 | 16,76 | 31,06 |

Annexe 4.3 : Résultats de la densité apparente et des pH du sol

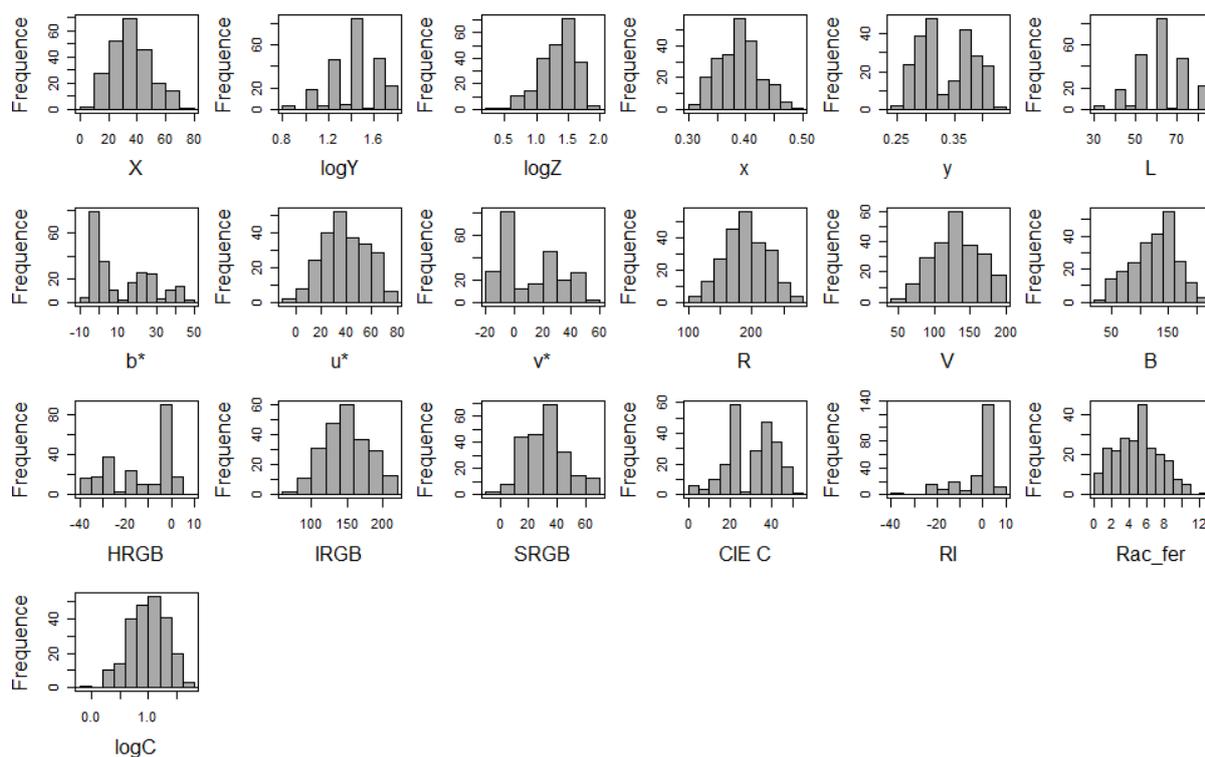
| Numéro | Code | Sol | DA (g.cm ⁻³) | pH eau | pH KCl |
|---------|--------|------------|--------------------------|--------|--------|
| RN2_04 | 2_01a | Cambisols | 1,15 | 5,66 | 4,37 |
| RN2_05 | 2_02a | Ferralsols | 1,48 | 5,64 | 4,46 |
| RN2_06 | 2_03a | Cambisols | 1,17 | 5,48 | 4,57 |
| RN2_07 | 2_04a | Cambisols | 0,66 | 5,43 | 4,08 |
| RN2_08 | 2_05a | Ferralsols | 0,94 | 5,64 | 4,46 |
| RN2_09 | 2_06a | Cambisols | 1,31 | 5,52 | 4,54 |
| RN2_11 | 2_08a | Ferralsols | 1,19 | 5,9 | 4,62 |
| RN2_12 | 2_09a | Ferralsols | 1,09 | 5,45 | 4,31 |
| RN2_13 | 2_10a | Ferralsols | 0,67 | 6,24 | 5,06 |
| RN2_14 | 2_11a | Ferralsols | 0,83 | 5,49 | 4,43 |
| RN2_15 | 2_12a | Ferralsols | 1,00 | 4,98 | 4,4 |
| RN2_16 | 2_13a | Ferralsols | 0,79 | 5,04 | 4,68 |
| RN2_17 | 2_14a | Ferralsols | 1,10 | 4,98 | 4,46 |
| RN2_18 | 2_15a | Ferralsols | 0,99 | 5,79 | 4,81 |
| RN2_19 | 2_16a | Ferralsols | 1,09 | 5,63 | 4,62 |
| RN2_20 | 2_17a | Ferralsols | 1,04 | 5,14 | 4,62 |
| RN34_69 | 34_01a | Luvisols | 1,39 | 6,91 | 6,08 |
| RN34_70 | 34_02a | Luvisols | 1,49 | 7,21 | 6,66 |
| RN34_71 | 34_03a | Luvisols | 1,56 | 6,30 | 5,52 |
| RN34_72 | 34_04a | Luvisols | 1,02 | 4,80 | 4,43 |
| RN34_73 | 34_05a | Luvisols | 1,47 | 6,06 | 5,90 |
| RN34_74 | 34_06a | Luvisols | 1,49 | 6,53 | 5,28 |
| RN34_75 | 34_07a | Arenosols | 1,66 | 5,66 | 4,67 |
| RN34_76 | 34_08a | Luvisols | 1,26 | 5,53 | 4,57 |
| RN34_77 | 34_09a | Luvisols | 1,62 | 5,76 | 4,91 |

| | | | | | |
|----------|--------|------------|------|------|------|
| RN34_79 | 34_11a | Arenosols | 1,52 | 5,78 | 4,79 |
| RN34_80 | 34_12a | Nitisols | 1,66 | 5,76 | 4,67 |
| RN34_81 | 34_13a | Nitisols | 1,36 | 5,75 | 4,48 |
| RN34_82 | 34_14a | Nitisols | 1,31 | 6,04 | 5,15 |
| RN34_83 | 34_15a | Cambisols | 1,31 | 5,93 | 5,02 |
| RN34_84 | 34_16a | Cambisols | 1,30 | 5,53 | 4,65 |
| RN34_85 | 34_17a | Cambisols | 1,08 | 6,18 | 4,73 |
| RN34_117 | 34_18a | Cambisols | 1,12 | 5,83 | 4,84 |
| RN34_118 | 34_19a | Cambisols | 1,43 | 4,72 | 4,26 |
| RN34_119 | 34_20a | Cambisols | 1,27 | 5,45 | 4,46 |
| RN34_120 | 34_21a | Ferralsols | 1,26 | 5,39 | 4,35 |
| RN34_121 | 34_22a | Ferralsols | 1,28 | 5,55 | 4,53 |
| RN34_122 | 34_23a | Ferralsols | 1,12 | 5,29 | 4,41 |
| RN4_125 | 4_01a | Arenosols | 1,54 | 5,88 | 4,29 |
| RN4_128 | 4_04a | Nitisols | 1,18 | 6,84 | 5,48 |
| RN4_129 | 4_05a | Arenosols | 1,13 | 5,36 | 4,40 |
| RN4_130 | 4_06a | Arenosols | 1,38 | 5,50 | 4,36 |
| RN4_134 | 4_10a | Cambisols | 1,21 | 5,98 | 5,20 |
| RN4_135 | 4_11a | Cambisols | 1,67 | 6,44 | 4,78 |
| RN4_136 | 4_12a | Cambisols | 1,34 | 6,31 | 5,52 |
| RN4_137 | 4_13a | Cambisols | 1,51 | 6,44 | 5,16 |
| RN4_138 | 4_14a | Cambisols | 1,36 | 6,31 | 4,94 |
| RN4_139 | 4_15a | Nitisols | 1,26 | 5,86 | 4,64 |
| RN4_140 | 4_16a | Nitisols | 1,22 | 5,61 | 4,69 |
| RN4_141 | 4_17a | Nitisols | 1,27 | 5,75 | 4,88 |
| RN4_142 | 4_18a | Ferralsols | 1,11 | 5,58 | 4,58 |
| RN4_143 | 4_19a | Ferralsols | 1,02 | 5,50 | 4,89 |
| RN4_144 | 4_20a | Ferralsols | 1,06 | 5,37 | 4,60 |
| RN4_145 | 4_21a | Ferralsols | 1,07 | 5,58 | 4,53 |
| RN4_146 | 4_22a | Ferralsols | 1,31 | 5,36 | 4,51 |
| RN4_147 | 4_23a | Ferralsols | 1,51 | 5,22 | 4,74 |
| RN4_148 | 4_24a | Ferralsols | 1,44 | 5,17 | 4,43 |
| RN4_149 | 4_25a | Ferralsols | 1,12 | 5,16 | 4,60 |
| RN4_150 | 4_26a | Ferralsols | 1,30 | 5,62 | 4,68 |
| RN6_116 | 6_01a | Vertisols | 1,28 | 6,05 | 4,38 |
| RN6_115 | 6_02a | Nitisols | 0,99 | 5,83 | 4,33 |
| RN6_111 | 6_06a | Cambisols | 1,14 | 6,20 | 4,54 |
| RN6_110 | 6_07a | Cambisols | 1,78 | 5,69 | 4,28 |
| RN6_109 | 6_08a | Cambisols | 1,68 | 4,95 | 3,92 |
| RN6_108 | 6_09a | Cambisols | 1,44 | 4,97 | 3,82 |
| RN6_107 | 6_10a | Ferralsols | 1,44 | 5,58 | 4,39 |
| RN6_106 | 6_11a | Cambisols | 1,17 | 5,96 | 4,01 |
| RN6_104 | 6_13a | Cambisols | 1,17 | 4,93 | 3,83 |
| RN6_103 | 6_14a | Ferralsols | 1,28 | 5,28 | 4,13 |

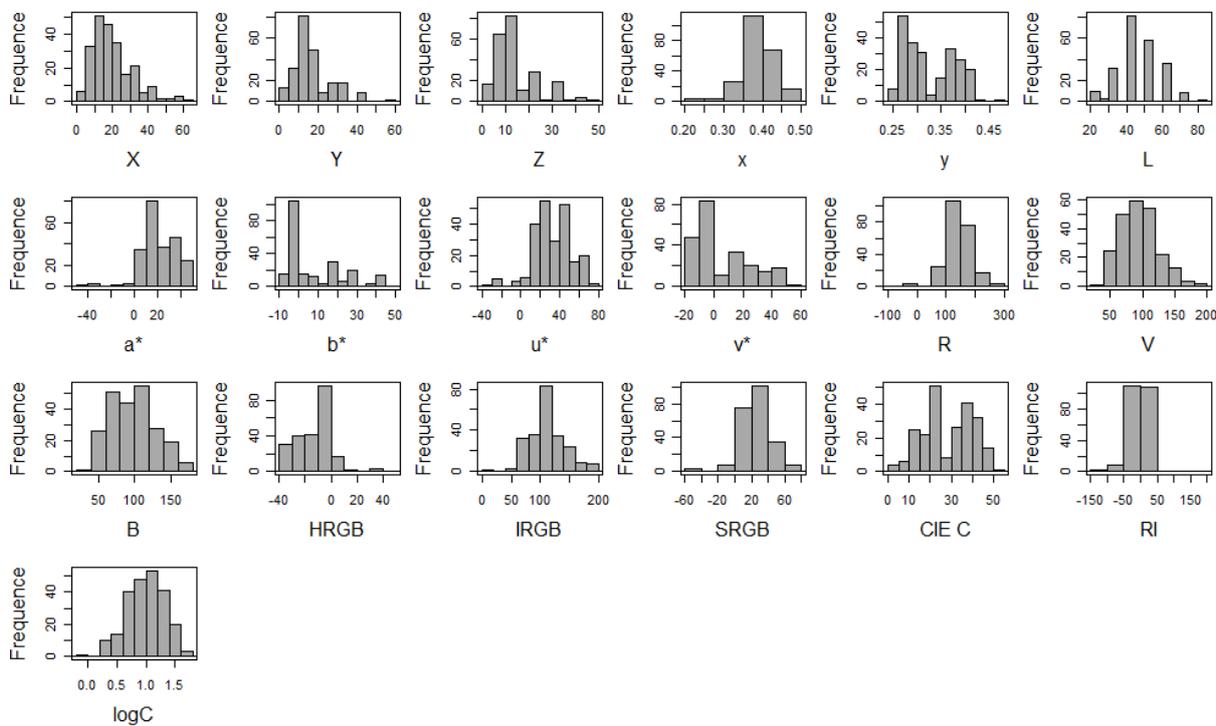
| | | | | | |
|---------|-------|-------------------|------|------|------|
| RN6_102 | 6_15a | Ferralsols | 1,15 | 5,41 | 4,41 |
| RN6_101 | 6_16a | Nitisols | 1,36 | 5,10 | 3,87 |
| RN6_100 | 6_17a | Cambisols | 1,31 | 5,15 | 4,02 |
| RN6_99 | 6_18a | Nitisols | 1,38 | 5,30 | 3,96 |
| RN6_98 | 6_19a | Vertisols | 1,47 | 8,05 | 6,52 |
| RN6_97 | 6_20a | Cambisols | 1,50 | 5,63 | 4,10 |
| RN6_96 | 6_21a | Cambisols | 1,55 | 5,73 | 4,76 |
| RN6_95 | 6_22a | Cambisols | 1,59 | 5,06 | 4,10 |
| RN6_94 | 6_23a | Nitisols | 1,76 | 5,50 | 3,88 |
| RN6_93 | 6_24a | Nitisols | 1,75 | 5,29 | 3,93 |
| RN6_92 | 6_25a | Vertisols | 1,35 | 6,21 | 4,17 |
| RN6_91 | 6_26a | Cambisols | 1,35 | 5,45 | 4,26 |
| RN6_90 | 6_27a | Cambisols | 1,14 | 5,31 | 3,92 |
| RN6_89 | 6_28a | Nitisols | 1,16 | 5,20 | 4,16 |
| RN6_88 | 6_29a | Vertisols | 1,49 | 7,51 | 6,13 |
| RN6_87 | 6_30a | Nitisols | 1,46 | 6,05 | 4,46 |
| RN6_86 | 6_31a | Cambisols | 1,63 | 7,48 | 6,38 |
| RN6_65 | 6_32a | Cambisols | 1,63 | 5,86 | 4,32 |
| RN6_66 | 6_33a | Nitisols | 1,30 | 5,43 | 4,13 |
| RN6_67 | 6_34a | Nitisols | 1,53 | 5,81 | 3,66 |
| RN7_30 | 7_02a | Luvisols | 1,27 | 7,97 | 7,21 |
| RN7_31 | 7_03a | Calcaric regosols | 1,08 | 8,59 | 7,25 |
| RN7_32 | 7_04a | Nitisols | 1,46 | 6,02 | 5,13 |
| RN7_33 | 7_05a | Calcaric regosols | 0,92 | 7,85 | 7,05 |
| RN7_35 | 7_07a | Arenosols | 1,71 | 6,65 | 5,13 |
| RN7_36 | 7_08a | Luvisols | 1,43 | 6,93 | 5,02 |
| RN7_37 | 7_09a | Arenosols | 1,47 | 6,50 | 5,52 |
| RN7_38 | 7_10a | Arenosols | 1,42 | 6,07 | 4,64 |
| RN7_40 | 7_11a | Arenosols | 0,68 | 6,06 | 4,62 |
| RN7_41 | 7_12a | Arenosols | 1,64 | 5,62 | 4,93 |
| RN7_42 | 7_13a | Cambisols | 1,64 | 5,27 | 4,97 |
| RN7_43 | 7_14a | Cambisols | 1,45 | 4,75 | 4,58 |
| RN7_44 | 7_15a | Cambisols | 1,37 | 4,86 | 4,66 |
| RN7_45 | 7_16a | Cambisols | 1,51 | 5,27 | 4,61 |
| RN7_46 | 7_17a | Nitisols | 1,18 | 4,98 | 4,71 |
| RN7_47 | 7_18a | Nitisols | 1,49 | 5,35 | 4,82 |
| RN7_48 | 7_19a | Nitisols | 1,62 | 5,30 | 4,80 |
| RN7_49 | 7_20a | Cambisols | 1,45 | 5,75 | 4,58 |
| RN7_50 | 7_21a | Cambisols | 1,24 | 5,94 | 5,17 |
| RN7_51 | 7_22a | Cambisols | 1,39 | 5,46 | 4,50 |
| RN7_52 | 7_23a | Cambisols | 1,09 | 5,86 | 4,70 |
| RN7_53 | 7_24a | Ferralsols | 0,97 | 4,93 | 4,48 |
| RN7_54 | 7_25a | Ferralsols | 1,29 | 4,77 | 4,48 |
| RN7_55 | 7_26a | Ferralsols | 1,16 | 5,53 | 4,65 |

| | | | | | |
|--------|-------|------------|------|------|------|
| RN7_56 | 7_27a | Ferralsols | 1,02 | 4,95 | 4,55 |
| RN7_57 | 7_28a | Ferralsols | 1,25 | 5,89 | 4,64 |
| RN7_58 | 7_29a | Cambisols | 0,99 | 5,98 | 4,63 |
| RN7_59 | 7_30a | Ferralsols | 1,11 | 5,60 | 4,71 |
| RN7_60 | 7_31a | Ferralsols | 1,49 | 5,73 | 4,63 |
| RN7_61 | 7_32a | Ferralsols | 1,05 | 5,69 | 4,51 |
| RN7_62 | 7_33a | Ferralsols | 1,34 | 6,29 | 4,72 |

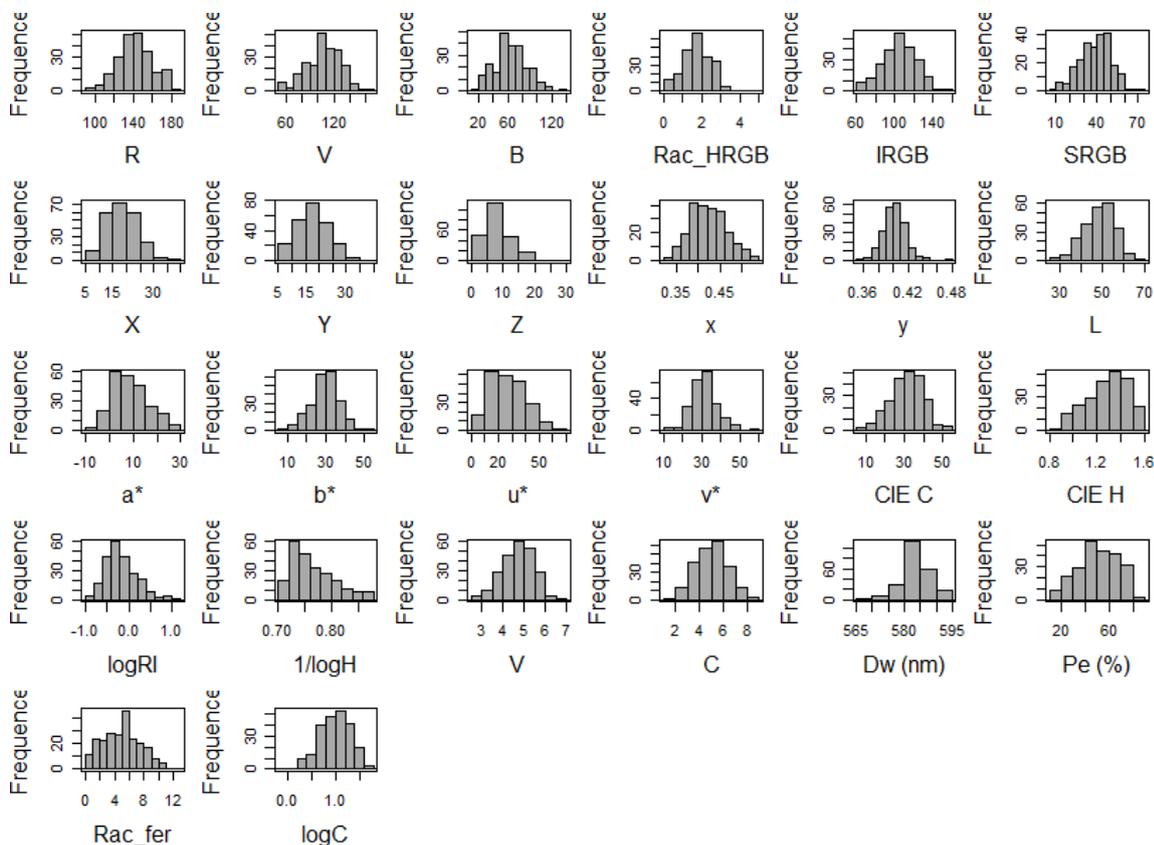
Annexe 5.1 : Histogrammes de fréquence des modèles spatiaux de couleur Munsell à l'état sec



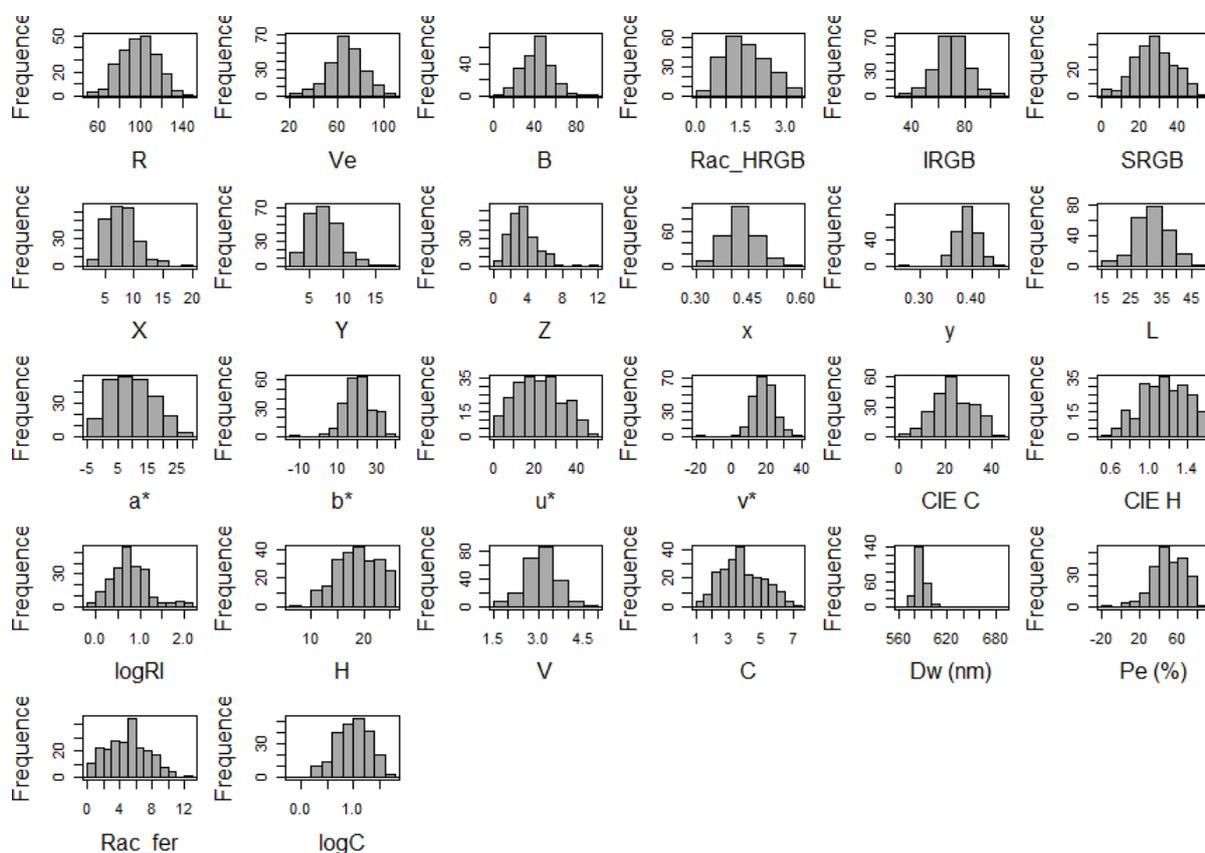
Annexe 5.2 : Histogrammes de fréquence des modèles spatiaux de couleur Munsell à l'état humide



Annexe 5.3 : Histogrammes de fréquence des modèles spatiaux de couleur RVB à l'état sec



Annexe 5.4 : Histogrammes de fréquence des modèles spatiaux de couleur RVB à l'état humide

Annexe 6.1 : Coefficients de détermination R^2 et pente par groupe de sol pour les PLSR entre spectres et variables climatiques

| Sols | Profondeur (cm) | Var. clim. | n | R^2 | Pente |
|------------|-----------------|------------|----|-------|-------|
| Ferralsols | 0-10 | Temp | 34 | 0,77 | 0,77 |
| Ferralsols | 10-20 | Temp | 34 | 0,75 | 0,75 |
| Ferralsols | 20-30 | Temp | 33 | 0,77 | 0,77 |
| | | | | | |
| Sols | Profondeur | Var. clim. | n | R^2 | Pente |
| Ferralsols | 0-10 | Pluv | 34 | 0,72 | 0,72 |
| Ferralsols | 10-20 | Pluv | 34 | 0,64 | 0,64 |
| Ferralsols | 20-30 | Pluv | 33 | 0,69 | 0,69 |

| Sols | Profondeur (cm) | Var. clim. | n | R ² | Pente |
|-----------|-----------------|------------|----|----------------|-------|
| Cambisols | 0-10 | Temp | 35 | 0,65 | 0,65 |
| Cambisols | 10-20 | Temp | 35 | 0,64 | 0,64 |
| Cambisols | 20-30 | Temp | 36 | 0,73 | 0,73 |
| | | | | | |
| Sols | Profondeur | Var. clim. | n | R ² | Pente |
| Cambisols | 0-10 | Pluv | 35 | 0,68 | 0,68 |
| Cambisols | 10-20 | Pluv | 35 | 0,68 | 0,68 |
| Cambisols | 20-30 | Pluv | 36 | 0,68 | 0,68 |

| Sols | Profondeur (cm) | Var. clim. | n | R ² | Pente |
|----------|-----------------|------------|----|----------------|-------|
| Nitisols | 0-10 | Temp | 17 | 0,91 | 0,91 |
| Nitisols | 10-20 | Temp | 17 | 0,9 | 0,9 |
| Nitisols | 20-30 | Temp | 17 | 0,92 | 0,92 |
| | | | | | |
| Sols | Profondeur | Var. clim. | n | R ² | Pente |
| Nitisols | 0-10 | Pluv | 17 | 0,97 | 0,97 |
| Nitisols | 10-20 | Pluv | 17 | 0,91 | 0,91 |
| Nitisols | 20-30 | Pluv | 17 | 0,9 | 0,9 |

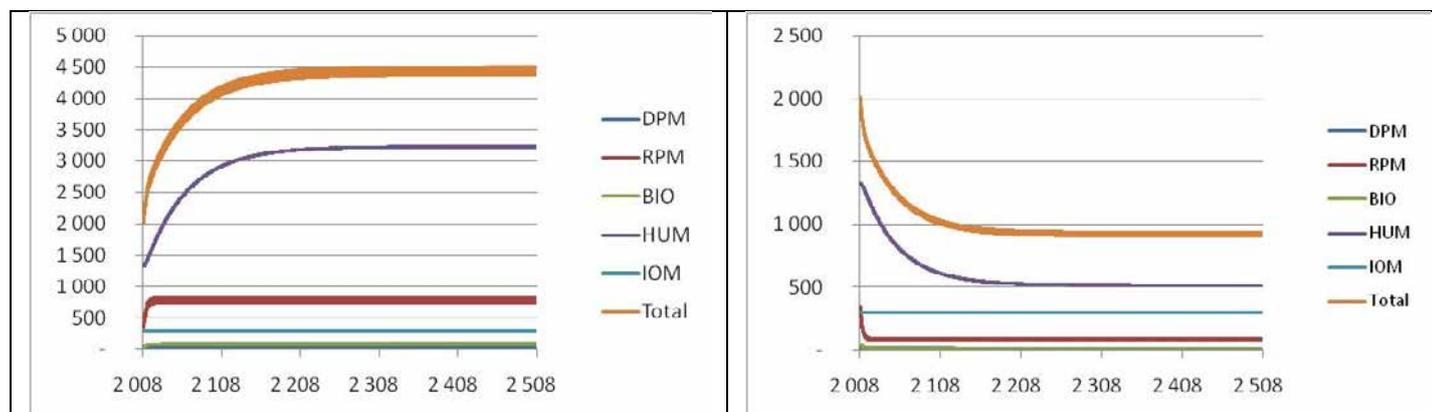
| Sols | Profondeur (cm) | Var. clim. | n | R ² | Pente |
|-----------|-----------------|------------|----|----------------|-------|
| Arenosols | 0-10 | Temp | 16 | 0,83 | 0,83 |
| Arenosols | 10-20 | Temp | 20 | 0,9 | 0,9 |
| Arenosols | 20-30 | Temp | 16 | 0,86 | 0,86 |
| | | | | | |
| Sols | Profondeur | Var. clim. | n | R ² | Pente |
| Arenosols | 0-10 | Pluv | 16 | 0,91 | 0,91 |
| Arenosols | 10-20 | Pluv | 20 | 0,91 | 0,91 |
| Arenosols | 20-30 | Pluv | 16 | 0,82 | 0,82 |

| Sols | Profondeur (cm) | Var. clim. | n | R ² | Pente |
|----------|-----------------|------------|----|----------------|-------|
| Luvisols | 0-10 | Temp | 9 | 0,99 | 0,99 |
| Luvisols | 10-20 | Temp | 9 | 0,99 | 0,99 |
| Luvisols | 20-30 | Temp | 36 | 0,89 | 0,89 |
| | | | | | |
| Sols | Profondeur | Var. clim. | n | R ² | Pente |
| Luvisols | 0-10 | Pluv | 9 | 0,96 | 0,96 |
| Luvisols | 10-20 | Pluv | 9 | 0,99 | 0,99 |
| Luvisols | 20-30 | Pluv | 36 | 0,86 | 0,86 |

Annexe 6.1 : Données climatiques des 4 sites utilisés pour la simulation avec le modèle RothC

| Mois | Température moyenne (°C) | | | | Pluviosité moyenne (mm) | | | | ETP moyenne (bozaka) | | | |
|------|--------------------------|------|------|------|-------------------------|-----|-----|-----|----------------------|-------|-------|-------|
| | Ar1 | Fe1 | Ar2 | Fe2 | Ar1 | Fe1 | Ar2 | Fe2 | Ar1 | Fe1 | Ar2 | Fe2 |
| Janv | 28,4 | 22,2 | 24,7 | 20,2 | 329 | 333 | 191 | 292 | 111 | 116,4 | 119,7 | 123,6 |
| Fev | 28,4 | 22,3 | 24,3 | 20 | 243 | 276 | 132 | 240 | 123 | 129 | 132,3 | 136,5 |
| Mars | 28,2 | 22 | 24,1 | 19,6 | 186 | 256 | 96 | 220 | 144 | 150,3 | 154,2 | 158,7 |
| Avr | 27,6 | 21 | 22,5 | 18,3 | 24 | 76 | 23 | 80 | 162,6 | 169,8 | 174 | 179,1 |
| Mai | 25,3 | 18,7 | 21,2 | 16 | 9 | 20 | 11 | 39 | 187,2 | 195,3 | 200,1 | 205,8 |
| Juin | 23,3 | 16,8 | 19 | 14,1 | 4 | 9 | 7 | 29 | 185,7 | 194,1 | 198,6 | 204,6 |
| Juil | 22,7 | 16,3 | 17,7 | 13,2 | 4 | 9 | 5 | 26 | 176,4 | 184,5 | 189 | 194,7 |
| Aou | 24,1 | 17,8 | 19 | 13,7 | 4 | 9 | 7 | 26 | 168 | 175,8 | 180 | 185,4 |
| Sept | 26,4 | 19,2 | 21 | 15,3 | 7 | 19 | 8 | 33 | 171,3 | 179,1 | 183,3 | 189 |
| Oct | 28,4 | 21 | 23,5 | 17,9 | 39 | 65 | 28 | 55 | 159,6 | 167,1 | 171,3 | 176,7 |
| Nov | 29,1 | 21,9 | 24,7 | 19,5 | 101 | 151 | 76 | 170 | 136,8 | 143,4 | 147,3 | 152,1 |
| Déc | 28,6 | 22,4 | 24,7 | 19,9 | 210 | 281 | 168 | 270 | 117,3 | 123 | 126,6 | 130,8 |

Annexe 6.2 : Exemples de résultat complet d'une simulation RothC (Fe1, scénario S1 et Fe1, scénario SF0)



RESUME

Connaître la sensibilité actuelle des sols malgaches aux climats permettra de prédire la sensibilité future aux changements climatiques. Madagascar a la spécificité d'avoir à la fois une grande diversité de sols et de climats. Des prélèvements sur 119 sites couvrant les différents gradients climatiques ont été réalisés sur des parcelles sous *bozaka (aristida sp.)*. Les analyses ont été effectuées par le biais de la modélisation des couleurs du sol et par l'application de la technique de la spectrométrie moyen infrarouge (SMIR).

Les ferralsols, les cambisols, les nitisols, les luvisols, les arenosols, les vertisols et les calcari regosols sont les principaux groupes de sol identifiés. La caractérisation et la classification des sols à partir des spectres MIR ont démontré que les groupes de sol ont été discriminés par leur minéralogie. La méthode supervisée PLS-DA a permis de classifier 88% des échantillons en calibration et 87% de ceux en validation. Ces mêmes spectres ont également permis de prédire la teneur en Al_{CBD} ($R^2= 0,85$ et $RPD= 2,48$), en argile + limon fin ($R^2= 0,88$ et $RPD= 2,85$), en carbone ($R^2= 0,79$ et $RPD= 2,14$) et le pH_{KCl} ($R^2= 0,76$ et $RPD= 2,05$).

La prédiction de la teneur en fer et en C à partir des modèles spatiaux de couleur a montré que ces deux constituants sont plutôt corrélés aux couleurs RVB qu'aux couleurs Munsell. Les meilleurs résultats en calibration ont été obtenus avec les ferralsols et le chroma CIE C ($R^2= 0,95$ et $RMSE= 2,88\%$) et avec les luvisols et la chromaticité x ($R^2= 0,86$ et $RMSE= 4,82\%$) pour le Fe_{cbd} et avec les arenosols et le chroma C ($R^2= 0,72$ et $RMSE= 1,34\%$), avec les ferralsols et la chromaticité u^* ($R^2= 0,63$ et $RMSE= 4,99\%$) et avec les nitisols et le chroma C ($R^2= 0,61$ et $RMSE= 2,96\%$) pour le carbone.

Les couleurs ne sont pas des indicateurs de la sensibilité des sols au climat. En revanche, les analyses de la sensibilité avec les spectres MIR ont montré que la kaolinite, la gibbsite et les composés organiques à base de C sont les plus sensibles à la température et à la pluviosité. L'étude de la dynamique du C avec le modèle RothC a permis de constater que le C est plutôt sensible aux changements d'usage des terres qu'aux changements climatiques. Malgré une augmentation jusqu'à 4°C de la température, les stocks de C du sol augmentent de 40% à 160% sur 200 ans et se stabilisent ensuite sur des parcelles sous *bozaka*.

En tant que travail d'exploration sur l'évaluation de la sensibilité des sols au climat, les résultats de la présente étude permettent de conclure que: les sols à texture argileuse (ferralsols, cambisols) sont plus sensibles au climat que les sols à texture sableuse (arenosols, luvisols).

Mots clés : sol malgache, spectrométrie infrarouge, classification, prédiction des propriétés, modélisation des couleurs, sensibilité au climat, carbone.