



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

-----  
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES  
-----

DEPARTEMENT DES EAUX ET FORETS

Mention : Foresterie et Environnement

Parcours : Environnement, Territoire et Développement

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention d'un Diplôme d'Ingénieur Agronome au  
grade de Master II

**« UTILISATION DE LA SPECTROMETRIE PROCHE ET  
MOYENNE INFRAROUGE POUR LA PREDICTION DU  
CARBONE ORGANIQUE ET DE L'AZOTE DES SOLS DE  
CHANGALANE ET DE CHOBELA - MOZAMBIQUE »**

Présenté par **IMBONIMIADANA Annie Patricia**

Promotion : **ANDRISA**

Soutenu publiquement le 19 Décembre 2016 devant les membres du jury composé de :

Président : Docteur *Tahiana RAMANANANTOANDRO*

Examineur : Docteur *Herizo RAKOTOVOLOLONALIMANANA*

Maître de stage : Docteur *Tovonarivo RAFOLISY*

Encadreur pédagogique: Professeur *Jean Chrysostome RANDRIAMBOAVONJY*





UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

-----  
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES  
-----

DEPARTEMENT DES EAUX ET FORETS

Mention : Foresterie et Environnement

Parcours : Environnement, Territoire et Développement

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention d'un Diplôme d'Ingénieur Agronome au  
grade de Master II

**UTILISATION DE LA SPECTROMETRIE PROCHE ET MOYENNE  
INFRAROUGE POUR LA PREDICTION DU CARBONE  
ORGANIQUE ET DE L'AZOTE DES SOLS DE CHANGALANE ET  
DE CHOBELA - MOZAMBIQUE**



Présenté par **IMBONIMIADANA Annie Patricia**

Promotion : **ANDRISA**

Soutenu publiquement le 19 Décembre 2016 devant les membres du jury composé de :

Président : Docteur *Tahiana RAMANANANTOANDRO*

Examineur : Docteur *Herizo RAKOTOVOLOLONALIMANANA*

Maître de stage : Docteur *Tovonarivo RAFOLISY*

Encadreur pédagogique: Professeur *Jean Chrysostome RANDRIAMBOAVONJY*



## REMERCIEMENTS

---

*A travers ces longs mois de préparation de mon mémoire de fin d'étude, j'ai pu acquérir beaucoup de nouvelles connaissances et développer mes compétences. Ainsi j'aimerai rendre gloire à Dieu qui m'a donné la force de franchir toutes les épreuves durant mon travail.*

*Mes vifs remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui ont contribué à la finalisation de cette étude, notamment :*

- *Madame **Tahiana RAMANANANTOANDRO**, Maitre de Conférences, chef de l'Unité de Formation et de Recherche en Sciences des bois au département des Eaux et Forêts à l' ESSA, qui nous a fait l'honneur de présider le jury de cette soutenance ;*

- *Monsieur **Tovonarivo RAFOLISY**, PhD en Agriculture, Maitre de Conférences, Chercheur au Laboratoire des Radio Isotopes (LRI), mon maitre de stage, qui a apporté son aide et ses précieux conseils durant l'élaboration de ce travail de recherche;*

- *Monsieur **Jean Chrysostome RANDRIAMBOAVONJY**, Professeur d'enseignement supérieur et recherche à l'ESSA, responsable de l'unité de formation et de recherche en gestion et conservation des eaux et des sols au Département des Eaux et forêts, pour ses conseils les plus précieux et son riche encadrement, qu'il retrouve ici ma respectueuse admiration ;*

- *Monsieur **Herizo RAKOTOVOLOLONALIMANANA**, Docteur en Sciences Agronomiques, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, d'avoir accepté d'être l'examineur de ce travail;*

- *Madame **Tantely RAZAFIMBELO**, Directeur du Laboratoire des Radio Isotopes et toute l'équipe du LRI qui m'ont apporté leur expertise et leurs moyens dans la réalisation de ce stage de mémoire de fin d'étude ;*

- *Monsieurs **Noelly Phostin RAMAROVAHOAKA et Manuel SITOE**, stagiaires du projet BIOVA pour leurs aides précieuses et toutes les collaborations dont nous avons bénéficié durant le stage à LRI.*

*J'adresse également mes vifs remerciements :*

- *A tous les enseignants, le personnel administratif et technique de l'ESSA.*

- *A mes amis de la Promotion Andrisa, particulièrement ceux du Département des Eaux et Forêts pour toutes les belles années qu'on a passé ensemble.*

- *A ma famille et tous mes proches ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

*Que ceux que je n'ai pas pu citer ici veuillent bien m'excuser et qu'ils puissent trouver dans cet ouvrage, l'image de leur contribution et ma sincère gratitude.*

*Un grand Merci à tous !*

***Argene Patricia***

## PRESENTATION DU PROJET BIOVA ET DE SES PARTENAIRES

---



Le projet BIOVA ou le « Recyclage des **BIO**masses Végétales et Animales dans les systèmes d'agriculture élevage » est lancé officiellement au mois d'Avril en 2013. Les pays ciblés pour la mise en application des actions de BIOVA sont Madagascar et Mozambique, représentant à eux seuls 1 393 590 km<sup>2</sup> de superficie dont 46 millions d'ha de surface agricole. Coordonné par le FIFAMANOR et financé par l'Union Africaine, ce projet de coopération se fixe pour objectif de sécuriser la production alimentaire dans les exploitations agricoles familiales par le recyclage des résidus issus de l'élevage et de l'agriculture. En effet, l'une des causes majeure de la baisse de la productivité agricole des exploitations familiales en Afrique est la réduction de la fertilité des sols. Le recyclage des résidus issus de l'agriculture et de l'élevage constitue donc une solution efficace pour réapprovisionner les sols en nutriments et réduire le risque d'insécurité alimentaire auquel sont soumis les agriculteurs. Les activités visent à trouver les moyens pour mieux conserver et recycler ces ressources et à promouvoir l'agriculture de conservation et la synergie agriculture-élevage. L'une des composantes essentielle du projet est aussi le renforcement des collaborations scientifiques régionales (Océan Indien) et internationales (France, Belgique) par la mise en place d'un réseau de recherche scientifique. Soumis à des contraintes et conditions similaires, Madagascar et Mozambique sont appuyés par l'expertise des partenaires de la Réunion (Cirad et ARP) et de la Belgique (CRA-W) dans la mise en œuvre des activités du projet. Pour Madagascar, les sites d'interventions de ce projet sont situés dans la zone du Vakinankaratra, de Kianjasoa, d'Ivory, d'Ankazomiriotra, dans le Moyen Ouest et dans le Sud. A Mozambique, les zones cibles sont dans la province de Maputo, notamment Changanane et Chobela. Ce projet réunit dix partenaires dont sept organismes de recherche (FIFAMANOR, FOFIFA, LRI, IIAM, CIRAD, IRD et CRA-W), deux organismes d'enseignement (ESSA et UEM) et un organisme d'appui en encadrement (ARP).



## RESUME

---

Ce mémoire présente une étude relative à l'application de la spectrométrie proche et moyenne infrarouge couplée à la régression en moindres carrés partiels (RMCP) pour l'estimation de 2 propriétés du sol d'intérêt agricole et environnementale : le carbone organique et l'azote total. Dans deux sites à vocation agricoles distincts, des échantillons de sol par horizon 0-10cm, 10-20cm, 20-30cm, 40-50cm et 60-70cm ont été collectés sur les quatre coins du carré de 10 m, donnant respectivement 462 échantillons pour Changalane et 475 échantillons pour Chobela. A partir des analyses par méthodes conventionnelles des échantillons de l'horizon 0 à 10cm, les valeurs des stocks de carbone et d'azote sont déduites. Les stocks de carbone et d'azote dans l'horizon 0 à 10 cm des deux sites sont très variés. L'azote et le carbone stocké dans l'eutric cambisol de Chobela sont compris respectivement entre 0,2 et 1 MgN.ha<sup>-1</sup>, entre 0,5 et 23 MgC.ha. Les valeurs de stock de carbone et d'azote des sols de Changalane varient respectivement entre 6.6 et 66 MgC.ha, entre 0.6 et 5 MgN.ha<sup>-1</sup>. Puis, ces 2 propriétés du sol ont été prédites de différentes manières pour voir l'effet du mode de calibration « site spécifique » *versus* « global » et l'utilisation de la spectrométrie moyenne infrarouge et proche infrarouge (SMIR et SPIR), sur les performances des modèles d'estimation. Selon le type d'étalonnage « site spécifique », pour le carbone, les modèles « site spécifique » plus performants sont le modèle de Changalane calibré en moyen infrarouge et le modèle de Chobela calibré en proche infrarouge. Les performances d'estimation de ces modèles sont respectivement R<sup>2</sup> = 0,91, RMSEP = 3,23 g/kg, SEP = 3,29 g/kg, Biais = -0,04%, RPD = 3,25 et R<sup>2</sup> = 0,59, RMSEP = 1,66 g/kg, SEP = 1,72 g/kg, Biais = 0,18%, RPD = 1,8. Pour la variable azote, les modèles de Changalane et de Chobela les plus performants sont ceux calibrés en proche infrarouge. Leurs performances sont respectivement R<sup>2</sup> = 0,76, RMSEP = 0,41 g/kg, SEP = 0,41 g/kg, Biais = -0,71%, RPD = 1,59 et R<sup>2</sup> = 0,48, RMSEP = 0,14 g/kg, SEP = 0,14 g/kg, Biais = 0,01% et RPD = 1,64. Dans le cas des deux propriétés, les résultats ont montré une nette amélioration des performances d'estimation lorsque le modèle est étalonné à partir de l'ensemble des échantillons des deux sites spécifiques. Ce fait témoigne d'une robustesse géographique des modèles « globaux » avec R<sup>2</sup> = 0,91, RMSEP = 3,55 g/kg, SEP = 3,61 g/kg, Biais = 0,25% et RPD = 3,22 pour la variable carbone et R<sup>2</sup> = 0,8, RMSEP = 0,35 g/kg, SEP = 0,36 g/kg, Biais = 0,05% et RPD = 2,03 pour la variable azote. Ces résultats confirment que l'étendue géographique des collectes des échantillons et le domaine spectral d'analyse ont une influence sur la qualité des modèles de prédiction.

**Mots clés :** azote, carbone, analyse de sol, stock, spectrométrie infrarouge, Changalane, Chobela.

## ABSTRACT

---

This paper presents a study on the application of near and middle infrared spectrometry coupled with partial least squares regression (PLSR) for the estimation of two properties of soil of agricultural and environmental interest: organic carbon, total nitrogen. In two separate agricultural sites, soil samples per 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 40-50 cm and 60-70 cm horizons were collected on the four corners of the 10 m square, giving respectively 462 samples for Changalane and 475 samples for Chobela. By the conventional method analyzes of samples from the horizon 0 to 10 cm, the values of carbon and nitrogen stocks are deduced. The carbon and nitrogen stocks in the 0 to 10 cm horizon of the two sites are very varied. The nitrogen and the carbon stored in the eutric cambisol of Chobela are respectively between 0.2 and 1 MgN.ha<sup>-1</sup>, between 0.5 and 23 MgC.ha. The carbon and nitrogen stock values of Changalane soils vary between 6.6 and 66 MgC.ha, respectively, between 0.6 and 5 MgN.ha<sup>-1</sup>. Then, these two properties of the soil were predicted in different ways in order to see the effect of the mode of calibration " specific site " versus "global" and the use of mid-infrared and near-infrared spectroscopy (MIRS and NIRS), on the performances of the estimate models. Depending on the type of "specific site" calibration, for carbon, the best performing "specificsite " models are the Changalane model calibrated in the medium infrared and the Chobela model near infrared calibrated. The estimation performances of these models are respectively  $R^2 = 0.91$ , RMSEP = 3.23 g / kg, SEP = 3.29 g / kg, Bias = -0.04%, RPD = 3.25 and  $R^2 = 0.59$ , RMSEP = 1.66 g / kg, SEP = 1.72 g / kg, Bias = 0.18%, RPD = 1.8. For the nitrogen variable, the best performing Changalane and Chobela models are those calibrated in near infrared. Their performance is respectively  $R^2 = 0.76$ , RMSEP = 0.41 g / kg, SEP = 0.41 g / kg, Bias = -0.71%, RPD = 1.59 and  $R^2 = 0.48$ , RMSEP = 0.14 g / kg, SEP = 0.14 g / kg, Bias = 0.01% and RPD = 1.64. In the case of both properties, the results showed a clear improvement in estimation performance when the model was calibrated from the set of samples from the two specific sites. This demonstrates the geographic robustness of the "global" models with  $R^2 = 0.91$ , RMSEP = 3.55 g / kg, SEP = 3.61 g / kg, Bias = 0.25% and RPD = 3.22 for the carbon variable and  $R^2 = 0.8$ , RMSEP = 0.35 g / kg, SEP = 0.36 g / kg, Bias = 0.05% and RPD = 2.03 for the nitrogen variable. These results confirm that the geographic extent of sample collection and the spectral range of analysis have an influence on the quality of the prediction models.

**Key words:** nitrogen, carbon, soil analysis, stock, infrared spectrometry, Changalane, Chobela.



## FAMINTINANA

---

Ity fikarohana ity dia maneho ny fampiharana ny spectrométrie proche et moyenne infrarouge miaraka amin'ny régression en moindres carrés partiels (RMCP) mba hamantarana ny tahan'ny singa anatin'ny tany izay manan-danja lehibe amin'ny fambolena sy ny tontolo iainana: ny karbonaorganika sy ny azota. Ao amin'ny toeram-pambolena roa samy hafa, santionan-tany avy 0-10, 10-20, 20-30, 40-50 ary 60-70 santimetatra ambanin'ny tany no notsongaina isaky ny zorony efitra mielanelana 10 m, ka manome 462 santionan-tany avy tao Chagalane sy 475 santionan-tany avy tao Chobela. Amin'ny alalan'ny teknikam-pikarohana mahazatra no nahazoana ny tahan'ny karbona sy azota voatahiry anaty 0 hatramin'ny 10 santimetatra ambanin'ny tany. Ny tahan'ny karbona sy ny azota voatahiry dia samihafa be. Ny Azota voatahiry ao amin'ny eutric cambisol ny Chobela dia teo anelanelan'ny 0.2 sy 1 MgN.ha-1, ary ny karbonakosa teo anelanelan'ny 0,5 sy 23 MgC.ha. Ny tahan'ny karbonavoatahiry taoamin'ny santionan-tany Chagalane kosa dia teo anelanelan'ny 6.6 sy 66 MgC.ha ary ny azota teo anelanelan'ny 0.6 sy 5 MgN.ha-1. Ny tahan'ireo singa roa anatin'ny tany ireo dia nofantarina koa tamin'ny fomba samihafa mba ahitana ny fiantraikan'ny fomba fanaovana ny calibration "toerana voafaritra tsara" oharina amin'ny "toerana mitambatra" sy ny fampiasana ny spectrométrie moyenne infrarouge et proche infrarouge (SMIR et SPIR),amin'ny famolavolana ny modely tombana. Raha ny santionan-tany avy amin'ny "toerana voafaritra tsara" no nampiasaina tamin'ny famantarana ny karbona dia anisan'ny modely mafonja indrindra ny modelin'ny Chagalane azo tamin'ny moyen infrarouge sy ny modelin'ny Chobela azo tamin'ny proche infrarouge. Ireto avy ny mariky ny hatsaran'ireo modely ireo  $R^2 = 0,91$ , RMSEP = 3,23 g/kg, SEP = 3,29 g/kg, Biais = -0,04% , RPD = 3,25 ary  $R^2 = 0,59$  , RMSEP = 1,66 g/kg , SEP = 1,72 g/kg , Biais = 0,18% , RPD = 1,8. Ny modely famantarana ny azota tsara indrindra kosahoan'ny Chagalane sy Chobela dia ireo azo tamin'ny proche infrarouge. Ireto ny marika mampiseho izany:  $R^2 = 0,76$ , RMSEP = 0,41 g/kg, SEP = 0,41 g/kg, Biais = -0,71%, RPD = 1,59 ary  $R^2 = 0,48$ , RMSEP = 0,14 g/kg, SEP = 0,14 g/kg, Biais = 0,01% et RPD = 1,64. Hoan'ireo singa roa anatin'ny tany ireo dia mampiseho ny vokatra fa mihatsara ny modely rehefa novolaina tamin'ny fitambaran'ny santionan-tany avy amin'ny ireo faritra roa. Izany dia manamarina ny lanjan'ny ara-jeografika amin'ny fahatsaran'ny modely "toerana mitambatra" izay manana marika  $R^2 = 0,91$ , RMSEP = 3,55 g/kg, SEP = 3,61 g/kg , Biais = 0,25% et RPD = 3,22 hoan'ny karibonina ary  $R^2 = 0,8$ , RMSEP = 0,35 g/kg , SEP = 0,36 g/kg , Biais = 0,05% et RPD = 2,03 hoan'ny azota. Ireo vokatra ireo dia manamafy ny fiantraikan'ny fivelaran-toerana nakana ny santionan-tany ary ny sehatra fitiliana ara-spektra eo amin'ny hatsaran'ny modely.

**Teny manan-danja:** azota, karbona, tany, fitiliana ny tany, tahiry, spectrométrie infrarouge, Chagalane, Chobela.

---

**TABLE DES MATIERES**


---

LISTE DES ANNEXES .....	iii
LISTE DES CARTES .....	iii
LISTE DES CLICHES .....	iii
LISTE DES EQUATIONS.....	iii
LISTE DES FIGURES .....	iv
LISTE DES TABLEAUX .....	iv
LISTE DES ABREVIATIONS .....	v
LISTE DES SYBOMBOLES CHIMIQUES.....	vi
LISTE DES UNITES .....	vii
GLOSSAIRE.....	vi
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>Partie 1: METHODOLOGIE DE TRAVAIL .....</b>	<b>1</b>
I.1. Etat des connaissances.....	3
I.1.1. Le sol.....	3
I.1.2. Le carbone dans le sol .....	3
I.1.3. L'azote du sol .....	4
I.1.4. Application de la spectrométrie infrarouge en science du sol.....	4
I.1.4.1. Principes.....	5
I.1.4.2. Intérêts de la spectrométrie infrarouge en science du sol.....	6
I.2. Problématique et hypothèses .....	8
I.2.1. Problématique et hypothèses .....	8
I.2.2. Objectifs .....	10
I.3. Milieu d'étude .....	10
I.4. Collecte des données .....	15
I.4.1. Prélèvement des échantillons .....	15
I.4.2. Travaux de laboratoire.....	16
a) Analyse chimique des sols de référence .....	17
b) Analyse spectrale des échantillons .....	18
I.5. Analyse des données .....	21



I.6.Les contraintes de l'étude .....	23
I.7.Cadre opératoire récapitulatif de la recherche .....	24
<b>Partie 2: RESULTATS ET INTERPRETATIONS</b> .....	22
II.1. Statistique descriptive des valeurs de référence: C , N .....	25
II.2. Variations des stocks de carbone et d'azote sur l'horizon 0 à 10 cm.....	26
II.3. Résultats des Analyses Composantes Principales .....	29
II.3.1. Echantillons de Changalane .....	29
II.3.2. Echantillons de Chobela.....	31
II.3.3. Ensemble des échantillons de Changalane et de Chobela.....	33
II.4 Performance des modèles de prédiction.....	35
II.4.1. Modélisation sur les échantillons du Site de Changalane.....	35
II.4.2. Modélisation sur les échantillons du site de Chobela.....	37
II.4.3. Modélisation sur l' ensemble des échantillons du site de Changalane et Chobela.....	39
II.5 Conclusion partielle .....	41
<b>Partie 3:DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS</b> .....	35
III.1.Discussions.....	42
III.1.1. Discussions sur l'approche méthodologique.....	42
III.1.1.1.Sur la méthode d'échantillonnage.....	42
III.1.1.2.Sur l'acquisition spectrale.....	42
III.1.1.3.Sur l'élaboration des modèles de prédiction.....	42
III.1.1.4.Sur les différentes approches .....	43
III.1.2. Discussion sur les résultats .....	43
III.1.2.1.Statistique descriptive des valeurs de référence (C et N ).....	43
III.1.2.2.Variation des stocks de carbone et d'azote des échantillons de référence.....	44
III.1.2.3.Résultats des ACP.....	44
III.1.2.4.Performance des modèles de prédiction .....	44
III.1.2.5.Les teneurs prédites .....	47
III.1.3.Réponses aux hypothèses.....	47
III.1.4.Apports et intérêts de la recherche.....	48
III.1.4.1.Intérêts scientifiques .....	48

III.1.4.2. Apport pour le projet.....	49
III.2. Recommandations.....	50
III.2.1. Sur l'utilisation du modèle.....	50
III.2.2. Sur l'amélioration du modèle.....	50
III.2.3. Perspectives de recherche .....	50
III.2.4. Pour le projet BIOVA .....	51
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>52</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>54</b>

---

## LISTE DES ANNEXES

---

ANNEXE .1. Formules des critères d’appréciation du modèle de calibration .....	I
ANNEXE .2. Protocole d’analyse Walkley & Black du Laboratoire des Radio Isotopes.....	I
ANNEXE .3. Protocole de dosage de l’ azote .....	V
ANNEXE .4. Visualisation des spectres en moyen infrarouge.....	VIII
ANNEXE .5. Visualisation des spectres en proche infrarouge.....	XI
Spectre de Changalane .....	XI
ANNEXE .6. Teneurs en carbone organique et en azote mesurées vs teneurs prédites pour les échantillons de Changalane .....	XIV
ANNEXE .7. Teneurs en carbone organique et en azote mesurées vs teneurs prédites pour les échantillons de Chobela.....	XV
ANNEXE .8. Teneurs en carbone organique et en azote mesurées vs teneurs prédites pour les échantillons de Changalane et de Chobela .....	XVI

---

## LISTE DES CARTES

---

Carte 1: Pédologie et site de prélèvement de Magude.....	12
Carte 2: Pédologie et site de prélèvement de Naamacha.....	14
Carte 3: Cartographie des stocks d’azote (a) et de carbone (b) du site de Chobelacalculé sur la profondeur 0 à 10 cm.....	27
Carte 4: Cartographie des stocks d’azote (a) et de carbone (b) du site de Changalane calculé sur la profondeur 0 à 10 cm.....	28

---

## LISTE DES PHOTOS

---

Photo 1: Mode de prélèvement des échantillons de sol.....	15
Photo 2: Matériels utilisés lors du broyage des sols.....	16
Photo 3: Appareil d’acquisition spectrale .....	19
Photo 4: Titrage par le sel de Mohr.....	IV

---

## LISTE DES EQUATIONS

---

Equation 1: Formule de la densité apparente du sol .....	17
Equation 2: Formule de la teneur en carbone organique.....	17
Equation 3: Formule du stock de carbone.....	21
Equation 4: Formule du stock d’azote du sol.....	22

**LISTE DES FIGURES**

Figure 1:Domaine de l'infrarouge dans le spectre électromagnétique .....	5
Figure 2:Déformation angulaire .....	6
Figure 3:Carré de prélèvement .....	15
Figure 4:Procédure de prédiction des propriétés du sol par spectrométrie infrarouge .....	21
Figure 5:Regroupement des spectres de Changalane issus du moyen infrarouge (a) et proche infrarouge (b) suivant les axes factoriels de l'ACP.....	30
Figure 6:Regroupement des spectres de Chobela issus du moyen infrarouge (a) et proche infrarouge (b) suivant les axes factoriels de l'ACP .....	32
Figure 7:Regroupement des spectres de Changalane et Chobela issus du moyen infrarouge (a) et proche infrarouge (b) suivant les axes factoriels de l'ACP .....	34
Figure 8:Répartition des teneurs en carbone et en azote prédites des échantillons de Changalane selon les profondeurs.....	36
Figure 9:Répartition des teneurs en carbone et en azote prédites des échantillons de Chobela selon les profondeurs .....	38
Figure 10:Répartition des teneurs en carbone et en azote des échantillons de Changalane et de Chobela selon les profondeurs .....	40

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1: Nombre d'échantillon collectés à chaque site d'étude par profondeur.....	16
Tableau 2: Prétraitements des spectres.....	19
Tableau 3: Répartition des échantillons pour la prédiction .....	20
Tableau 4: Cadre opératoire pour les hypothèses.....	24
Tableau 5: Statistiques sommaires sur les teneurs en carbone (g/kg) des échantillons de calibration .....	25
Tableau 6: Statistiques sommaires sur les teneurs en azote (g/kg) des échantillons de calibration	25
Tableau 7: Résultats des modèles en calibration et en prédiction des valeurs des teneurs en carbone et azote de Changalane .....	35
Tableau 8: Résultats des modèles en calibration et en prédiction des valeurs des teneurs en carbone et azote de Chobela.....	37
Tableau 9: Résultats des modèles globaux en calibration et en prédiction des valeurs des teneurs en carbone et azote de Changalane et de Chobela .....	39
Tableau 10: Ordre de performance des modèles de prédiction .....	45
Tableau 11: Cadre logique .....	51

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>ACP</b>	: Analyse en composante principale
<b>ANOVA</b>	: Analyse Of Variance (Analyse de la variance)
<b>BIOVA</b>	: BIOmasses Végétales et Animales
<b>CEAE</b>	: Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec
<b>CEC</b>	: Capacité d'échange cationique
<b>CIRAD</b>	: Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement
<b>CHN</b>	: Carbone-Hydrogène-Azote
<b>CSP</b>	: Country strategy paper
<b>CO</b>	: Carbone Organique
<b>COS</b>	: Carbone Organique du sol
<b>CPCS</b>	: Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
<b>CRA</b>	: Centre Régional Agrhymet
<b>DA</b>	: Densité apparente
<b>DEA</b>	: Diplôme d'Etude Approfondie
<b>Eco&amp;sols</b>	: Ecologie fonctionnelle et Biogéochimie des sols
<b>ESSA</b>	: Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
<b>FAO</b>	: Food Agriculture organization
<b>FIFAMANOR</b>	: FIompiana FAmbolena MAlagasy NORveziana
<b>FOFIFA</b>	: FOibe FIkarohana ampin' ny FAmpanandrosoana ny eny ambanivohitra
<b>FTM</b>	: Foibe Taosaritanin'i Madagasikara
<b>IPCC</b>	: Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>IOV</b>	: Indicateur objectivement vérifiable
<b>IR</b>	: InfraRouge
<b>IRD</b>	: Institut de Recherche pour le Développement
<b>LIR</b>	: Infrarouge lointain
<b>LRI</b>	: Laboratoire des RadioIsotopes
<b>MAEP</b>	: Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche
<b>MIR</b>	: Moyen Infrarouge
<b>MIRS</b>	: Mid InfraRed Spectroscopic (moyen infrarouge)
<b>MLR</b>	: Multiple linear regression
<b>MO</b>	: Matière Organique
<b>NIRS</b>	: Near InfraRed Spectroscopic (proche infrarouge)
<b>PC</b>	: Principal Component
<b>PCR</b>	: Principal Component regression
<b>PIR</b>	: Proche infrarouge

<b>PLSR</b>	: Partial Least Squares Regression
<b>PRDR</b>	: Programme Régional de Développement Rural
<b>QGIS 2.0.1</b>	: Logiciel de Système d'Information Géographique
<b>RMSE</b>	: Root Mean Squared Error
<b>RMSEC</b>	: Root Mean Squared Error Calibration
<b>RMSEP</b>	: Root Mean Squared Error Prediction
<b>RN</b>	: Route Nationale
<b>RPD</b>	: Residual of Prediction Deviation
<b>SCO</b>	: Stocks du carbone organique
<b>sd</b>	: Standard déviation
<b>SEC</b>	: écart type résiduel de la calibration
<b>SECV</b>	: écart type résiduel de la validation croisée
<b>SEP</b>	: Erreur standard de prédiction
<b>SIG</b>	: Système d'Information Géographique
<b>SMIR</b>	: Spectrométrie en Moyen Infrarouge
<b>SNV</b>	: Standard Normal Variate
<b>SPIR</b>	: Spectrométrie en Proche Infrarouge
<b>UEM</b>	: Université d'Eduardo Mondlane
<b>UMR</b>	: Unité Mixte de Recherche
<b>UV</b>	: Ultraviolet
<b>VIS</b>	: Visible
<b>W&amp;B</b>	: Walkley&Black
<b>XLSTAT 2008</b>	: Logiciel de traitement des données statistiques

### LISTE DES SYBOMBOLES CHIMIQUES

<b>CO<sub>2</sub></b>	: Dioxyde de carbone
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup></b>	: Ion bichromate
<b>H<sup>+</sup></b>	: Ion hydrogène ou proton
<b>HCl</b>	: Acide Chloridrique
<b>H<sub>2</sub>O</b>	: Eau
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	: Acide sulfurique
<b>K</b>	: Potassium
<b>K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub></b>	: Bichromate de potassium
<b>N</b>	: Azote

<b>N<sub>2</sub></b>	:	Diazote
<b>NH<sub>3</sub></b>	:	Ammoniac
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	:	Ion ammonium
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	:	Ion nitrate

## LISTE DES UNITES

<b>°C</b>	:	Degré Celsius
<b>C</b>	:	Carbone
<b>C/N</b>	:	Rapport carbone sur azote
<b>cm</b>	:	centimètre
<b>cm<sup>3</sup></b>	:	Centimètre cube
<b>cmol.kg<sup>-1</sup></b>	:	Centimol par kilogramme
<b>g.cm<sup>-3</sup></b>	:	Gramme par centimètre cube
<b>g.kg<sup>-1</sup></b>	:	Gramme par kilogramme
<b>gC.kg<sup>-1</sup></b>	:	Gramme de carbone par kilogramme
<b>gN.kg<sup>-1</sup></b>	:	Gramme d'azote par kilogramme
<b>Gt</b>	:	Gigatonne
<b>ha</b>	:	Hectare
<b>Kg</b>	:	Kilogramme
<b>Mg</b>	:	Mégagramme
<b>Mg.ha<sup>-1</sup></b>	:	Mégagramme par hectare
<b>MgC.ha<sup>-1</sup></b>	:	Mégagramme de carbone par hectare
<b>MgN.ha<sup>-1</sup></b>	:	Mégagramme d'azote par hectare
<b>mg</b>	:	Milligramme
<b>mm</b>	:	millimètre
<b>N</b>	:	Nord
<b>nm</b>	:	Nanomètre
<b>λ</b>	:	longueur d'onde
<b>µm</b>	:	micromètre
<b>Pg C</b>	:	Pétagramme de carbone



---

## GLOSSAIRE

---

- **Azote** : constituant majoritaire de l'atmosphère terrestre et représentant presque les 4/5<sup>e</sup> de l'air soient 78,06 % en volume (Encarta, 2009).
- **Baseline offset** : méthode de prétraitement spectral qui consiste à amener la valeur minimum à 0, les valeurs restantes étant toutes positives
- **Calibration** : procédure statistique qui relie l'information spectrale aux propriétés des échantillons mesurées par les méthodes analytiques standards.
- **Carbone** : premier élément constitutif de la matière organique composant les êtres vivants (Encarta, 2009).
- **Matière organique** : tout produit issu des organismes vivants, animal ou végétal, retourné au sol qui se décompose selon différents processus biologiques et chimiques (Kone et *al.*, 2008).
- **Modèle** : équation mathématique résumant les variations dans un ensemble de données.
- **Outliers**: une observation (échantillon périphérique) ou variable (variable périphérique) qui est anormale par rapport à la majeure partie des données.
- **SNV** : méthode de prétraitement spectral qui consiste à éliminer les effets de dispersion à partir des spectres de centrage et de mise à l'échelle des spectres individuels.
- **Stock** : quantité absolue de substances préoccupantes stockées dans un réservoir à un moment donné.
- **Spatialisation** : représentation cartographique d'un ou plusieurs éléments.
- **Spectre** : réponse de l'échantillon à l'infrarouge
- **Spectrométrie** : l'instrumentation et les mesures pour des études spectroscopiques.
- **Spectroscopie** : science qui traite des interactions de différents types de rayonnement avec la matière.
- **Prédiction** : procédure statistique pour prédire les variables analytiques par l'intermédiaire du modèle obtenue.
- **Prétraitement** : approche statistique pour améliorer les modèles de prédiction.

## INTRODUCTION

Le sol est le support nourricier direct ou indirect de toute forme de vie sur terre. C'est un système complexe tenant une place centrale au sein des écosystèmes agricoles et forestiers en intervenant dans la régulation des différents cycles naturels tels que ceux des gaz à effet de serre. Actuellement, de grands efforts se concentrent sur l'étude des sols dans l'intérêt d'une gestion durable de leur fertilité. La production agricole dépend de plusieurs facteurs, entre autre, la fertilité des sols et la biodisponibilité des nutriments indispensables au développement des plantes (Gobat *et al.*, 2010). Et étant une ressource à dégradation rapide, le sol est non renouvelable à l'échelle humaine. Les sols sont de plus en plus sollicités et font l'objet de tensions entre les usages. Ce qui lui confère donc le statut de ressource naturelle à préserver (Henault, 2009). Le défi mondial de développement exige une croissance de la productivité majeure dans l'agriculture afin d'atteindre les objectifs intégrés de réduction de la pauvreté, la sécurité alimentaire nationale et la croissance économique à grande échelle. De ce fait, la production agricole en Afrique subsaharienne doit augmenter de 4 pour cent par an pour répondre à la demande alimentaire de la population en croissance (FAO, 2003). Notamment les conditions préalables à l'amélioration de la productivité agricole sont en étroite relation avec la conservation, la recapitalisation et l'entretien de la fertilité du sol.

De par ses fonctions agro-environnementales, le sol représente à la fois un lieu de stockage, un puits de carbone organique et une source par l'émission de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) vers l'atmosphère, gaz à fort effet de serre, qui a une influence sur le changement climatique (Arrouays *et al.*, 2002 ; Bernoux *et al.*, 2011 ; Hutchinson *et al.*, 2007 ). Le sol contient environ trois fois plus de carbone que la végétation (~610 Pg C) et environ deux fois plus que l'atmosphère (~740 Pg de C) et avec une estimation de l'ordre de 1500 Pg dans le premier mètre du sol (Feller et Bernoux, 2008). Ainsi, toute mauvaise gestion de sol pourrait affecter la qualité des sols et dissiper les stocks en carbone qu'ils contiennent. D'où l'importance de la considération du sol dans les stratégies de lutte contre le changement climatique.

Parallèlement, l'étude sur l'azote du sol prend aussi une grande ampleur. Les sols contiennent 2 à 10 t/ha d'azote, essentiellement sous forme organique située dans la couche labourée comprise entre 0 et 25/30 cm de profondeur (Dridi et Gallali, 2006). La plus grande partie de l'azote dans le sol est présente dans la matière organique qui en effet constitue le plus grand réservoir de carbone organique dans le sol.

La présente étude est réalisée dans le cadre du projet BIOVA. Le projet vise le recyclage et la valorisation des biomasses résiduelles d'origine agricole dans une perspective vertueuse de restauration des stocks de carbone organique (SCO) et d'azote des sols agricoles de Vakinankaratra et de Mozambique. En effet, le projet œuvre dans le contexte actuel et dans beaucoup de systèmes de production agricole de l'Afrique, le recyclage des résidus de culture et des effluents d'élevage constitue les seules sources accessibles de retour des nutriments (azote, phosphore, etc.) sur les

parcelles agricoles. Ce qui permettra d'améliorer conjointement la fertilité des sols agricoles dans ces zones. Ainsi, une meilleure caractérisation chimique des sols des exploitations paysannes intégrant l'agriculture et l'élevage constitue un point de repère indispensable pour juger de la capacité de stockage du sol en éléments nutritifs et de l'évolution de la fertilité de ce sol. En d'autre terme, cette étude est essentiellement axée sur la prédiction des teneurs en carbone et azote des sols des parcelles agricoles paysannes dans les zones d'intervention du projet BIOVA à Mozambique qui sont Changalane et Chobela et ce afin d'établir des cartes des variations des stocks de carbone et d'azote des sols concernées par ce projet. Notamment, l'évaluation des stocks de carbone et de l'azote passe par la réalisation d'une analyse en laboratoire, domaine dans lequel la spectrométrie moyen et proche infrarouge offre des perspectives intéressantes, vu sa large utilisation dans le domaine agronomique. En effet, cette technique ne nécessite qu'une préparation minimale de l'échantillon, un faible besoin en matériel, une formation réduite des manipulateurs et offre une grande rapidité de mesure ainsi que la détermination simultanée de plusieurs composants (Russel et al., 2002). Ainsi, le fond du travail est axé sur l'élaboration de modèle de prédiction des teneurs en carbone et en azote des sols par l'utilisation de la spectrométrie proche et moyen infra rouge.

Après cette partie introductive, cet ouvrage débutera par une revue de l'état des connaissances sur l'étude du carbone et de l'azote du sol et sur l'application de la spectrométrie infrarouge en science du sol. S'en suivra la partie dans laquelle seront énoncées les problématiques et les hypothèses ainsi que la méthodologie adoptée tout au long du travail. Les résultats seront ensuite présentés, interprétés et feront l'objet de discussions afin d'en déduire des perspectives d'avenir pour la présente étude. Pour terminer, une conclusion sur l'aboutissement de l'étude sera rédigée.

**Partie 1: METHODOLOGIE  
DE TRAVAIL**

## **I.1. Etat des connaissances**

### **I.1.1. Le sol**

Le sol est la couche superficielle de l'écorce terrestre à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques. Généralement, la performance des activités agricoles est souvent liée à l'état de fertilité des sols. Dans les sols naturels, la fertilité est largement dépendante de la matière organique (MO) qui par sa minéralisation, libère des éléments nutritifs, comme le phosphore, le potassium, l'azote, le carbone... (H. Ben Hassine et al, 2008).

### **I.1.2. Le carbone dans le sol**

Dans le sol, le carbone se retrouve sous deux formes : le carbone organique et le carbone inorganique. Le carbone organique est produit par des organismes vivants lié à d'autres éléments comme l'hydrogène, le phosphore ou l'azote. Par contre, le carbone inorganique est associé à des composés inorganiques comme les carbonates et les bicarbonates (CEAE, 2006). Le carbone organique du sol offre plusieurs avantages sur le plan environnemental et agricole. D'une part, la séquestration de carbone dans le sol permet d'améliorer les propriétés physico-chimiques du sol et de réduire la quantité de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère (Razafimbelo, 2005). D'autre part, il affecte positivement la dynamique et la biodisponibilité des principaux éléments nutritifs et la fertilité du sol, favorise l'agrégation et la stabilité de la structure du sol (Robert, 2002). C'est donc la forme de carbone la plus importante dans le domaine agronomique. Le carbone a une influence sur la qualité biologique et physique du sol notamment sur sa fertilité, sa stabilité et son érodabilité. En effet, la richesse en carbone dans le sol est pratiquement liée à la richesse en matière organique qui a une grande importance sur la dynamique des nutriments du sol.

En outre, le carbone organique du sol représente le plus grand réservoir en interaction avec l'atmosphère. Selon Blanchart et al. 2009, il est estimé entre 1500 et 2000 Gt de carbone (milliards de tonnes) pour une couche de sol de 1m de profondeur, et dont la moitié de cette quantité de carbone est répartie dans les trente premiers centimètres du sol. Aussi, le maximum de flux de renouvellement de stock de carbone y prend place (Elzein et Balesdent, 1995). D'où, l'importance du mode d'usage des terres pouvant affecter considérablement la capacité du sol à stocker ou à libérer du carbone (Guoet Gifford, 2002). De plus, certains facteurs pédologiques peuvent influencer la capacité à stocker du carbone (texture du sol, minéralogie des argiles, profondeur, densité apparente, aération et proportion des fragments grossiers). Dans les conditions normales d'aérobiose des sols, la majorité du carbone apporté est labile (fraction active) et une petite fraction (1%) de ce qui entre dans le sol s'accumule dans la fraction stable qu'est la fraction humique (Robert, 2002).

Verticalement, les stocks de C des sols présentent un gradient de la surface vers la profondeur (Randrianandrasana, 2013). Latéralement, les stocks de C des sols présentent une forte variabilité spatiale. Bien qu'une parcelle soit relativement homogène du point de vue de sa gestion, la couche 0-

10 cm présente une forte hétérogénéité, principalement en matière organique, que ce soit sa quantité (C % et N %) ou son origine (Delta13C et Delta15N). D' où la nécessité d'un échantillonnage systématique à grand échelle. En outre, la quantité de stock de carbone varie selon les types de sols.

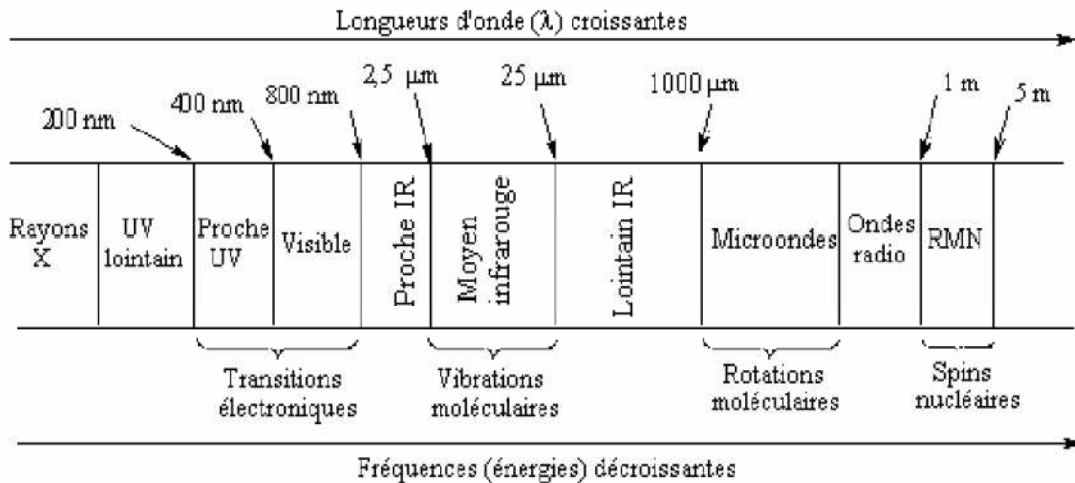
### **I.1.3. L'azote du sol**

Après le carbone, l'azote est l'un des principaux éléments constitutifs de la matière organique et un composant essentiel de la matière vivante. Son étude révèle un double intérêt, économique et environnemental. Sur le plan économique, la connaissance de la répartition de l'azote entre les différents compartiments du sol permet de raisonner la fertilisation azotée. Sur le plan environnemental, l'étude du bilan quantitatif de l'azote évite les pertes par lixiviation qui peuvent contaminer les nappes phréatiques ou bien rejoindre le réseau hydrographique (Dridi et Gallali, 2006).

En effet, l'azote dans le sol provient de la fixation de l'azote atmosphérique par des bactéries vivant dans le sol (genre *Azotobacter* notamment) ayant une enzyme appelée la nitrogénase. Après ce processus de conversion, l'azote atmosphérique se transforme en  $\text{NH}_4^+$  dans le sol. Tout comme le carbone dans le sol, l'azote du sol se trouve sous forme organique (humus) ou inorganique ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ). L'azote organique forme la majorité de l'azote présent dans le sol soit 85 à 95% de l'azote total du sol (Scheiner, 2005). Il résulte de la matière organique issue des résidus de culture, des déjections animales et d'engrais organiques. Cette forme d'azote n'est disponible pour les plantes que par minéralisation, processus lié étroitement avec l'activité des microorganismes. Cette fraction organique de l'azote est constituée par 50% d'acides aminés et une proportion très réduite de sucres aminés. Le reste est constitué par des composants de la partie des hétérocycles et des molécules humiques stables mais avec une dégradation lente (Scheiner, 2005). D' autre part, l'azote inorganique constitue la fraction disponible pour les cultures et le sol en contient rarement plus que quelques pourcents (maximum 10%). C'est sous la forme de nitrate  $\text{NO}_3^-$  qu'il est principalement absorbé par les cultures, à l'exception de certains cas où la culture se développe en conditions d'anoxie comme le cas des rizières où la forme prédominante est l'ammonium  $\text{NH}_4^+$  (Scheiner, 2005)

### **I.1.4. Application de la spectrométrie infrarouge en science du sol**

La spectroscopie infrarouge (IR) constitue un sous ensemble de la spectroscopie qui traite la région infrarouge du spectre électromagnétique. L' « infrarouge » a été découvert en 1800 par Frédéric Wilhelm Herschel et défini comme le rayonnement correspondant aux longueurs d'onde directement supérieures à celles du spectre de la lumière visible. En effet, 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: Domaine de l'infrarouge dans le spectre électromagnétique**

Source : CIRAD, 2013

Le domaine infrarouge s'étend donc de 0,8  $\mu\text{m}$  à 1000  $\mu\text{m}$ . Il est arbitrairement divisé en 3 catégories, le proche infrarouge (0,8 à 2,5  $\mu\text{m}$  soit 12500-4000  $\text{cm}^{-1}$ ), le moyen infrarouge (2,5 à 25  $\mu\text{m}$  soit 4000-400  $\text{cm}^{-1}$ ) et le lointain infrarouge (25 à 1000  $\mu\text{m}$  soit 400-10  $\text{cm}^{-1}$ ).

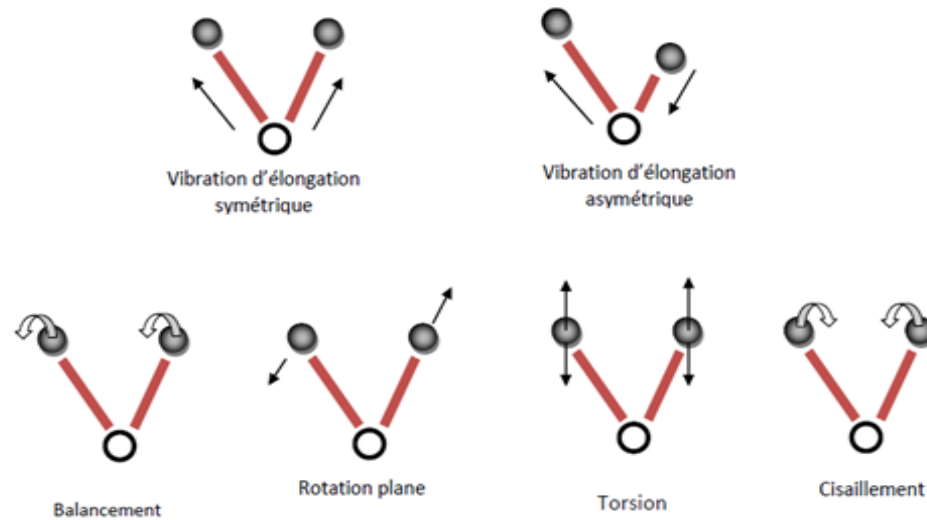
#### I.1.4.1. Principes

La spectroscopie infrarouge (IR) est une technique analytique basée sur le principe d'absorption des rayonnements infrarouges par la matière organique. Cette absorption étant liée à la composition chimique des échantillons, on peut estimer cette dernière par la simple mesure de l'absorption de lumière par l'échantillon. En effet, une molécule illuminée par des radiations dans le domaine infrarouge peut absorber certaines d'entre elles à des longueurs d'onde qui correspondent aux fréquences de vibration des groupements chimiques la constituant (Janik *et al.*, 2007).

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). Le présent travail utilise spécifiquement la spectrométrie proche et moyenne infrarouge. Ces deux méthodes ne sont différenciées que par le nombre d'onde qui les constituent et surtout de la netteté des pics des spectres. Notamment, les bandes d'absorption PIR forment des pics larges par rapport aux pics des spectres du MIRS. Par ailleurs, le MIRS et le NIRS sont basés sur un même principe. Il s'agit donc de l'absorption de la lumière dans le domaine de PIR-MIR par les composés organiques et minéraux du sol. En effet, une liaison chimique particulière peut absorber une radiation infrarouge dont la fréquence est égale à sa fréquence de vibration et ainsi passer d'un état fondamental à un état excité (Janik *et al.*, 2007; Razakamanarivo, 2008). 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.*, 2006). En effet, les molécules ressemblent à un ensemble de boules qui sont les atomes, liées par des liaisons chimiques. Une fois que les molécules sont soumises à une radiation infrarouge, elles se mettent à vibrer en modifiant les distances interatomiques et/ou les angles normaux de liaison.



**Figure 2: Déformation angulaire**

Source: Bertrand D (2002) in Razafimahatratra (2011)

Chaque molécule a donc un très grand nombre de possibilités de vibration donc une multitude de bandes d'absorption qui se chevauchent. C'est ainsi qu'un spectre infrarouge est très complexe. Dès lors, l'interprétation du spectre est très difficile. C'est pourquoi des méthodes chimiométriques sont appliquées afin de mettre au point des méthodes de calibration efficaces. La calibration ou la phase d'étalonnage fait donc appel à des méthodes statistiques complexes qui vont permettre de relier les spectres et les analyses chimiques au laboratoire. Le plus fréquent, la régression des moindres carrées (PLSR) est utilisée pour la modélisation des spectres.

Lors du développement d'un modèle d'estimation ou de prédiction, il est nécessaire de calibrer le modèle en utilisant un jeu d'échantillon dit jeu de calibration et de le valider sur un deuxième jeu, dit de validation, composé d'échantillons qui n'ont pas servi à sa calibration. C'est alors qu'il est possible de déterminer comment le modèle serait applicable en dehors du jeu de données de calibration. Les bonnes équations de calibration obtenues sont ensuite utilisées pour estimer les propriétés pour d'autres échantillons.

#### **I.1.4.2. Intérêts de la spectrométrie infrarouge en science du sol**

La spectrométrie infrarouge est avantageuse étant donné qu'elle ne demande qu'un minimum de travail de préparation (Pirie *et al.*, 2005 ; Janik *et al.*, 2007 ; Viscarra Rossel *et al.*, 2010). En effet,

il s'agit d'une technique simple, non destructive, nettement reproductible, rapide et surtout moins coûteuse ( McBratney *et al.*, 2006 et Viscarra Rossel *et al.*, 2006b). 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 car les réactifs chimiques ne sont plus nécessaires, un grand nombre d'échantillons peut être scanné en infrarouge en peu de temps. De plus, des logiciels spécifiques ont été développés pour le traitement des spectres (Winisi, The unscrambler...).L'application de la spectrométrie en science du sol 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).

## I.2. Problématique et hypothèses

### I.2.1. Problématique et hypothèses

Les populations des pays en développement se basent généralement sur l'agriculture pour gagner leur vie (Hurley 2010). L'agriculture emploie 81 % de la population du pays de Mozambique (Demeke et al., 2009). En outre, les zones d'intervention du projet BIOVA sont à vocation agricole et pastorale. A Mozambique, la production de denrées alimentaires est dominée par les petits exploitants et est orientée vers la subsistance (Uaiene et al., 2009). Il est alors estimé que sur une superficie totale de 78,6 millions d'ha à Mozambique, environ 46 % soit 36 million d'ha sont des terres arables. Cependant, 3,9 millions d'hectares (10%) des terres arables sont cultivées, avec 97 % des petits exploitants agricoles (CSP, 2015). Par ailleurs, le taux de croissance de la productivité agricole du Mozambique de 1,02 % par an est faible par rapport au taux de croissance démographique de 2,8 % par an.

En effet, les sols dans la plupart des pays d'Afrique subsaharienne ont une faible fertilité intrinsèque et les éléments nutritifs exportés ne sont pas remplacés de manière adéquate (Barbier 2000). Notamment, à Mozambique la productivité de certaines terres arables a diminué de 50 % en raison de l'érosion des sols (Eswaran et al., 2001). Selon Sanchez (2002), les sols de l'Afrique subsaharienne voient décroître en moyenne annuellement, et par hectare, leur stock d'azote de 22 kg, celui de phosphore (P) de 2,5 kg et celui de K de 15 kg potassium (K). La productivité des sols en Afrique subsaharienne est également limitée par l'aridité (faibles précipitations) et l'acidité. Parallèlement, le grand problème qui se pose dans la vie quotidienne est l'engagement total de la population rurale dans la lutte pour l'autosubsistance alimentaire laquelle ne se soucie guère de la gestion durable du milieu en pratiquant des cultures intensives. Or, il s'avère pourtant que les modes de gestion, tels que les pratiques agricoles mises en œuvre sur les terres cultivées et les modes de restitution des matières organiques représentent les principaux facteurs impactant les variations des stocks de carbone et d'azote des sols (Arrouays *et al.*, 2002 ; Ciais *et al.*, 2011). Ainsi, les pertes des matières organiques des sols qu'ils contiennent remettent en cause leur rôle de puits de carbone et augmentent les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. En outre, il est reconnu que la production agricole dépend en grande partie de la fertilité des sols et de la biodisponibilité de l'azote. De nombreux facteurs peuvent être liés à la gestion de cette fertilité du sol, entre autre, le développement des filières de recyclage de produits organiques telles qui sont œuvrés par le projet BIOVA ou même l'orientation des pratiques agricoles. Ce qui permettra à la fois de renforcer cette fertilité du sol et d'augmenter la capacité de stockage de carbone et d'azote dans le sol afin de subvenir aux besoins de la population et d'aboutir à une sécurité alimentaire dans le pays. Dans l'optique de gestion optimale des recyclages de biomasses agricoles, la caractérisation des stocks des nutriments des sols des zones d'étude est un point de repère indispensable pour fournir des éléments d'analyse du fonctionnement des exploitations agricoles ainsi que pour suivre l'évolution du stockage de carbone et d'azote des

sols. Par ailleurs, l'utilisation de la spectrométrie moyenne et proche infrarouge pour la caractérisation des stocks des nutriments des sols manifeste un intérêt croissant. Cette technique consiste à élaborer un modèle de prédiction afin de minimiser les coûts d'analyse des sols. Cependant, les aspects méthodologiques relatifs, entre autre à l'origine et à l'homogénéité du jeu des échantillons n'ont pas été exhaustivement étudiés. Des données estimatives des stocks de carbone et d'azote à petit échelle notamment régionale et locale sont rarement disponibles.

En outre, la plupart des études jusque-là entreprises dans des contextes pédologiques différents sélectionnent les échantillons de calibration et de validation sans considération particulière de l'échelle géographique de leur collecte, qu'elle soit en mode « site spécifique » ou « régional » (Brown et al., 2006). Ce qui limite l'utilité du modèle à prédire aux échantillons appartenant à un même site géographique. Dès lors, l'élaboration de modèle pouvant prédire différents types de sol de sites géographiques différents est fortement suggéré par de nombreux chercheurs afin d'élargir la capacité estimative des modèles et de constituer ainsi plus de données pédologiques en terme de teneurs en nutriments de sol (Barthès et al., 2006 ; Viscarra, 2008).

Ce contexte conduit à poser la question suivante : Quel type de modèle de prédiction permet-il de bien caractériser les teneurs en carbone et en azote des sols de Changalane et de Chobela ?

Les hypothèses relatives à l'étude se formulent comme suit :

**H1 : L'étendue géographique de la collecte des échantillons influence la qualité des modèles de prédiction**

L'échelle spatiale de prélèvement influence l'homogénéité des échantillons de sol. Plus l'échelle spatiale s'étend plus les types de sols varient. Par ailleurs, il est supposé qu'un modèle réalisé et appliqué sur un même groupe de sols, notamment sur des échantillons homogènes d'un point de vue spectral est plus performant par rapport à un modèle réalisé et appliqué sur un lot d'échantillons plus hétérogène à différentes propriétés spectrales.

**H2 : Le domaine spectral d'élaboration du modèle de prédiction détermine la qualité de prédiction pour la quantification des teneurs en constituants du sol**

En effet, les principales vibrations des liaisons chimiques correspondent à un domaine spectral spécifique. A chaque bande d'absorption fondamentale des molécules dans le MIR correspond une série d'harmoniques de bandes d'absorption 10 à 1000 fois moins intenses, apparaissant dans le domaine du proche infrarouge (PIR ; nombre d'onde 12500 à 4000  $\text{cm}^{-1}$  ou longueur d'onde 800 à 2500 nm). Par exemple, la bande d'absorption fondamentale due à l'étirement des liaisons C-H dans le MIR à 2900  $\text{cm}^{-1}$  (3448 nm), correspond à une première harmonique à 5800  $\text{cm}^{-1}$  (1724 nm) et une deuxième harmonique à 8700  $\text{cm}^{-1}$  (1150 nm) dans le PIR, d'après Bellon-Maurel et al. (2003).

### **I.2.2. Objectifs**

L'objectif principal de cette étude est de prédire les teneurs en carbone et azote dans le sol en vue d'une possibilité d'accroître les stocks de nutriments des sols agricoles par le recyclage et valorisation des biomasses. Pour ce faire, cette recherche consiste à élaborer des modèles de prédiction ayant des qualités estimatives élevées et d'utilité plus large en termes de validation en utilisant l'outil proche ou moyen infrarouge. Pour y parvenir, quatre objectifs spécifiques sont assignés :

- Acquérir des données de référence en teneurs en azote et carbone des sols de chaque localité par des méthodes conventionnelles ;
- Analyser les variations des teneurs et des stocks de carbone et d'azote de sol au niveau de chaque site d'étude ;
- Effectuer des modèles de prédictions du carbone et d'azote des sols en utilisant la spectrométrie proche et moyen infrarouge ;
- Prédire les teneurs en carbone et azote des échantillons de sol restants pour chaque localité à partir des modèles élaborés.

### **I.3. Milieu d'étude**

Les échantillons ont été prélevés dans le site de Changalane et de Chobela qui sont des zones à vocation agro-pastorale. Ces parcelles d'étude ont été choisies par rapport à trois critères : la présence de fourrages, le type de sol et l'apport de fertilisant. Les prélèvements ont été réalisés sur des parcelles de cultures fourragères, sans apport récent de fertilisant. Le couvert végétal de sites de prélèvement est essentiellement formé par une mosaïque complexe dominé des cultures vivrières, des arbustes et des pâturages.

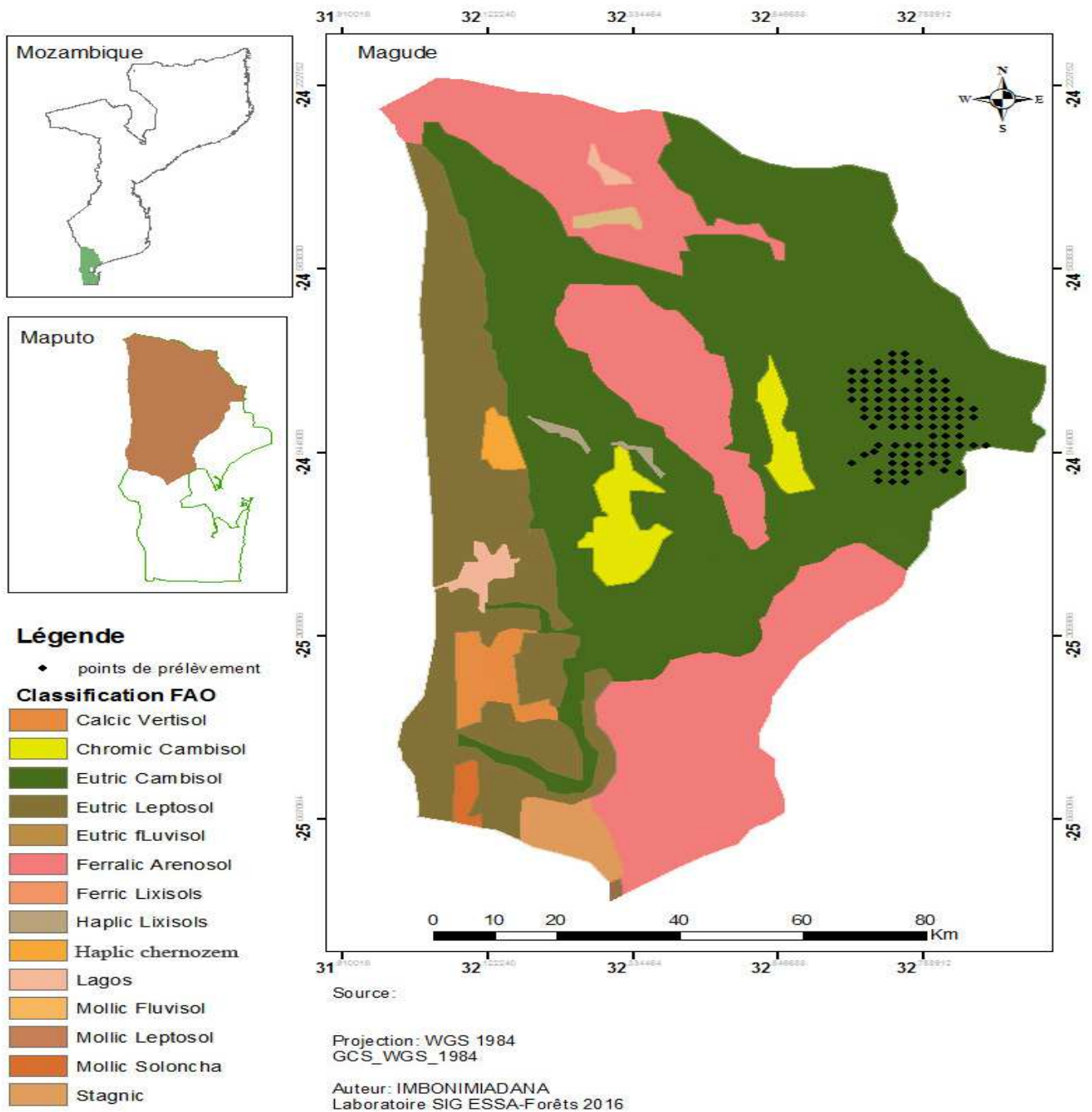
#### **I.3.1. Site de Chobela**

Chobela se trouve dans le district de Magude, situé dans le nord de la province de Maputo, son siège est à 150 km de la capitale du pays, Maputo. Il est situé entre les parallèles 26°02'00 " de latitudes Sud et entre 32°17'0 de longitude Est.

La zone d'étude bénéficie d'un climat subtropical sec selon la classification de Koppen avec une température annuelle moyenne entre 22 et 24 ° C et une pluviométrie moyenne annuelle de 630 millimètres. Deux saisons y prédominent : saison chaude et pluvieuse entre octobre à mars et saison sèche entre avril à septembre. (Ministério da Administração Estatal, 2005&Instituto Nacional de Estatística, 2013).

Le site de Chobela est consacré à une agriculture de subsistance. L'élevage y domine après les cultures du Sésame, du manioc et de l'arachide. Cette zone a un climat sec, une précipitation très faible ce qui représente un problème pour les habitants.

La formation pédologique de Magude est essentiellement formée par des sols argileux rouges avec une bonne fertilité. Néanmoins, il y a présence des sols argileux limoneux-sableux de couleur brunâtre et des sols fluviaux dus à l'excès d'eau dans la région. Le district de Magude a beaucoup de classes de sols : calcic vertisol, eutric cambisol, ferralic arenosol, eutric fluvisol, ferric lixisol, haplic lixisols, haplic chermozems et mollic fluvisol. Mais les échantillons prélevés à Chobela appartiennent à un seul type de sol eutric cambisol qui selon la classification FAO en 1988, égal aussi à un sol brun halomorphe selon la classification CPCS en 1967. Ce type de sol appartient à la classe du sol isohumique et présente un horizon d'altération ne possédant pas les propriétés d'un horizon argilique et il n'y a aucune cimentation. Le caractère eutrique du cambisol lui confère à un groupe de sol ayant un taux de saturation en cation supérieur ou égal à 50% au moins entre 20 et 100 cm de profondeur.



Carte 1: Pédologie et site de prélèvement de Magde



### **I.3.2. Site de Chagalane**

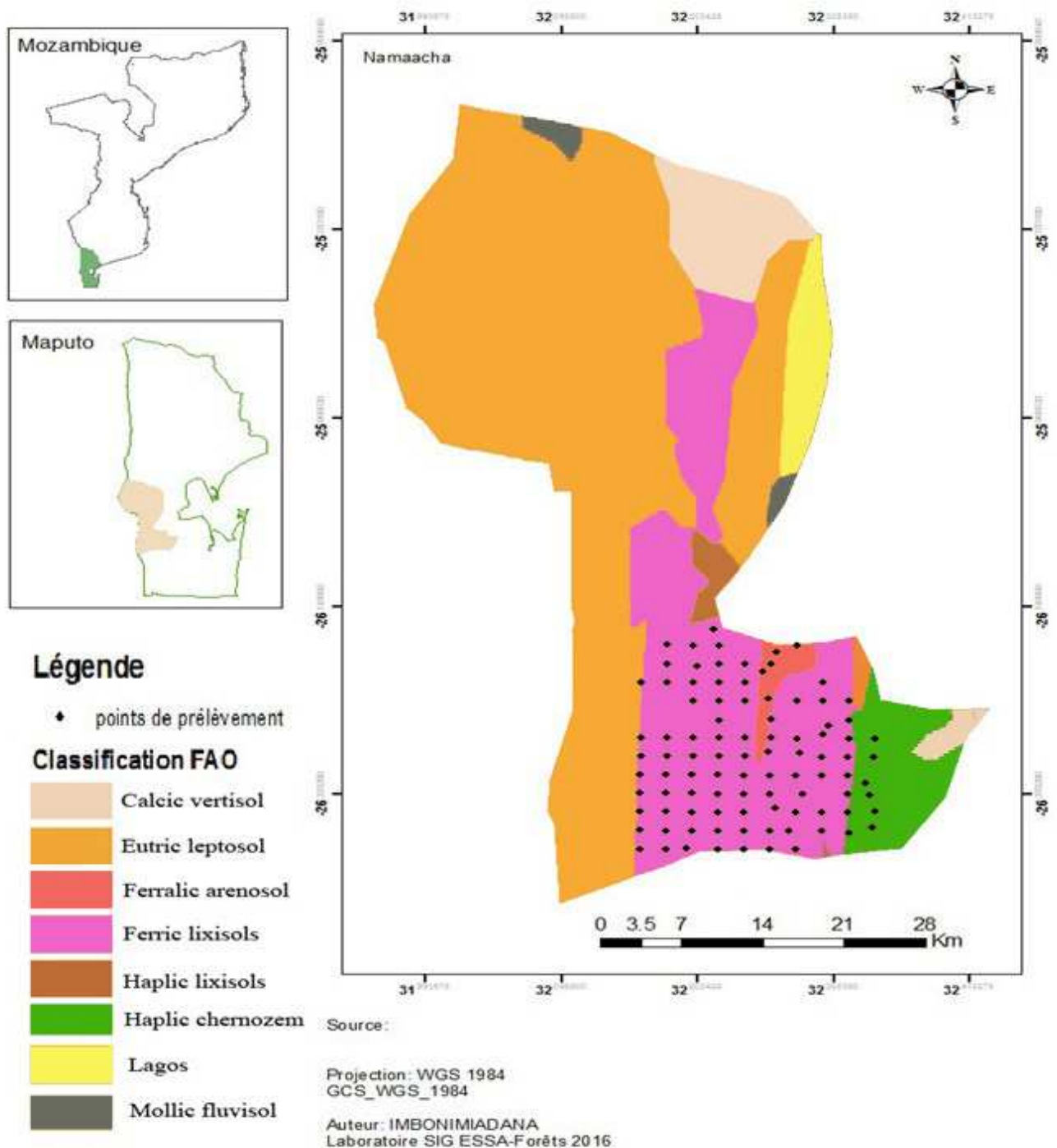
Chagalane appartient au district de Namaacha qui est situé au sud-ouest de la province de Maputo. Selon la classification de Koppen, le district de Namaacha est caractérisé par un climat tropical humide avec une température annuelle moyenne de 21 ° C et la moyenne annuelle des précipitations est 751,1 millimètres produisant environ 60 % des précipitations entre Novembre et Mars (Ministério da Administração Estatal, 2005&Instituto Nacional de Estatística, 2013).

Chagalane est une zone à vocation agricole. La majorité des plantes cultivées sont : le maïs, le riz, la pomme de terre et le tournesol pour la fabrication d'huile. Les paysans cultivent aussi des plantes horticoles comme le bananier, le fraisier et le citronnier. L'élevage est surtout marqué par l'usage des tractions animales et de machines agricoles.

La pédologie du district de Namaacha est caractérisée par une dominance de sol latéritique rouge. Plusieurs classes des sols sont localisés dans le district de Namaacha : calcic vertisol, eutric leptosol, ferralic arenosol, eutric fluvisol, ferric lixisol, haplic lixisol, haplic chernozems, mollic fluvisol, stagnic ou haplic selon la classification FAO en 1988. Mais trois classes du sol sont présents dans notre étude : ferric lixisol, haplic chernozems et ferralic arenosol.

En effet, les échantillons de sol prélevés pour cette étude correspondent aux types de sol suivant :

- **Ferric lixisol:** ou sol ferrugineux tropical selon la classification CPCS (1967). C'est un sol de couleur rouge brun, très lessivé et riche en argile. Leur texture est limoneuse et il est caractérisé par un horizon dans lequel l'accumulation du fer est dominante et un horizon B argique avec une CEC inférieure à 24 cmol.kg<sup>-1</sup> d'argile. Le lixisol est à basses réserves nutritives.
  
- **Haplic chernozem :** de couleur noir ou brun très foncé contenant un pourcentage élevé de l'humus et des pourcentages élevés d'acides phosphorique, de phosphore et d'ammoniac.
  
- **Ferralic arenosol:** sol sableux au moins jusqu'à 100 cm de profondeur, très perméable et à faible capacité de rétention, à structure particulière. L'unité de sol est formée sur matériaux grossiers non consolidés à l'exception de dépôts alluviaux récents.



Carte 2: Pédologie et site de prélèvement de Naamacha

## I.4. Collecte des données

### I.4.1. Prélèvement des échantillons

La méthode de prélèvement des échantillons de sol est identique pour les 2 sites d'étude. Des carrés de prélèvement de 10m de côté (Figure 4) ont été délimités pour obtenir au total 191 points de prélèvement. Par ailleurs, le compactage et la présence de rocher dans le sol a limité les points de prélèvement à 95 pour la zone de Chantalane et 96 pour Chobela. Sur les quatre coins du carré de 10 m de côté sont prélevés une carotte de sol de 50 cm de profondeur en utilisant un carottier monté sur un marteau piqueur motorisé (*Atlas Copco Cobra TT*)(Cliché 1). Les points de prélèvements aux quatre coins de chaque carré ont été notés respectivement par les numéros d'échantillon. Sur chaque point, cinq horizons ont été prélevés, à savoir : 0-10cm, 10-20cm, 20-30cm, 30-40cm et 40-50cm. Des échantillons de chaque horizon et de chacun des points de sondage, non mélangés, ont été gardés séparément dans un sachet numéroté.

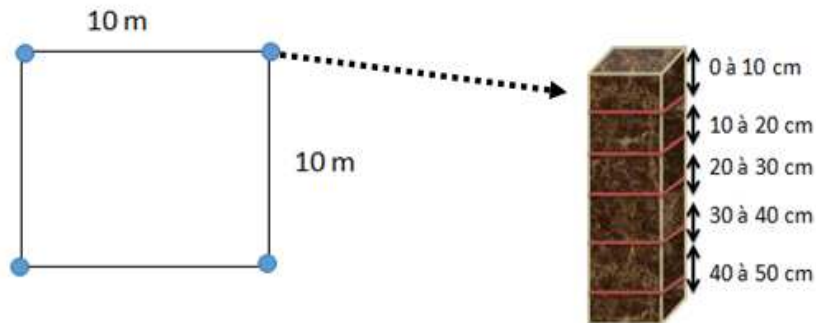


Figure 3: Carré de prélèvement



Photo 1: Mode de prélèvement des échantillons de sol

**Tableau 1:** Nombre d'échantillon collectés à chaque site d'étude par profondeur

Profondeur (cm)	Changalane	Chobela
	Nombre d'échantillon	Nombre d'échantillon
0-10	95	96
20-30	95	96
30-40	94	96
40-50	92	94
60-70	86	94
<b>Total</b>	<b>462</b>	<b>476</b>

#### I.4.2. Travaux de laboratoire

##### I.4.2.1. Préparation des échantillons de sol

Une fois au laboratoire, les échantillons ont été émiettés, débarrassés des racines grossières, séchés à l'air libre pendant 3 à 4 semaines, broyés au mortier et au pilon, puis passés au tamis à mailles carrées de 2 mm de diamètre et ensuite retamisés à 0,2mm.



**Photo 2:** Matériels utilisés lors du broyage des sols

##### I.4.2.2. Analyse des échantillons de sol

En effet, dans le souci de vouloir amoindrir les coûts relatifs aux analyses chimiques du sol, deux méthodes ont été couplées pour l'analyse du carbone organique du sol (COS) et d'azote du sol:

- La méthode Walkley & Black pour la détermination du carbone organique ;
- La méthode de Kjeldahl pour le dosage de l'azote total ;
- L'analyse spectrale.

Les valeurs de la concentration du COS issues de ces deux premières méthodes serviront à la prédiction des teneurs du COS et d'azote total des échantillons de sol à travers des régressions

linéaires vis à vis de l'ensemble des longueurs d'ondes relevées par la dernière méthode, la spectrométrie en moyen et proche infrarouge.

Ces trois méthodes d'analyses de sol ont été effectuées au laboratoire des radioisotopes (LRI) de l'Université d'Antananarivo.

#### a) Analyse chimique des sols de référence

La détermination des stocks de C et d'N des sols nécessite de mesurer d'abord la densité apparente (DA) du sol et d'analyser les teneurs en C organique et en N total des sols.

##### ❖ Mesure de la densité apparente

La densité apparente du sol est un paramètre indispensable pour calculer le stock de tel ou tel nutriment du sol. La densité apparente du sol, exprimée en  $\text{g.cm}^{-3}$ , est obtenue par le rapport de la masse volumique sèche de l'échantillon (g) et son volume à l'état humide ( $\text{cm}^3$ ).

$$Da (\text{g.cm}^{-3}) = \frac{\text{masse sèche de l'échantillon (g)}}{\text{volume de l'échantillon}(\text{cm}^3)}$$

##### Equation 1: Formule de la densité apparente du sol

La masse volumique sèche de l'échantillon a été obtenue par soustraction de la masse de l'humidité de l'échantillon sur sa masse fraîche. Le volume de l'échantillon correspond à celui du carottier ou du cylindre utilisé pour le prélever. Pour tous les échantillons, la mesure de la densité apparente a été préalablement effectuée par d'autres chercheurs utilisant les mêmes échantillons.

##### ❖ Dosage du carbone organique

La méthode Walkley & Black est utilisée pour le dosage de la teneur en C organique. Cette méthode consiste à faire une attaque du carbone par une oxydation au bichromate de potassium  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  1N en milieu acide, en utilisant une solution de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5N. Ensuite, l'excès de bichromate est titré avec le sel de Mohr à l'aide du «Titrateur Crisson». La fin de la titration est déterminée électriquement par une électrode redox combinée, réglée sur le point final du couple  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  à 770 mV. (cf. Annexe 2)  
Le mode de calcul pour la teneur en C organique est la suivante :

$$C\% = (Vt - Vs) * 19,5 / Vt / p$$

##### Equation 2: Formule de la teneur en carbone organique

Avec C% : Poids de carbone en g pour 1000 de terre

Vt : Volume de sel de Mohr 0,5 N en ml pour le témoin

Vs : Volume de sel de Mohr 0,5 N en ml pour l'échantillon

**p** : La prise d'essai en grammes

❖ **Dosage d'azote total**

Le dosage de l'azote total se fait par des méthodes de minéralisation avec des acides concentrés suivies de dosage de type Kjeldahl. La méthode de Kjeldahl comporte trois étapes : la minéralisation, la distillation et le dosage proprement dit. La minéralisation est la dégradation de la matière organique azotée sous la forme de sel d'ammonium, à l'aide d'un catalyseur (du sulfate de cuivre et du sulfate de potassium) et de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) à haute température ( $421^\circ C$ ). La distillation cherche à transformer l'ammonium, sous sa forme volatile, l'ammoniac, par ajout d'une solution de soude. Le dosage proprement dit consiste à titrer l'ammoniaque par une solution titrée d'HCl ou de  $H_2SO_4$ . On titre la solution jusqu'à équivalence par le virage de l'indicateur coloré, le rouge de méthyle (couleur rose rouge). (cf. Annexe3)

**b) Analyse spectrale des échantillons**

Pour tous les échantillons, l'estimation des teneurs en carbone organique et d'azote du sol par spectrométrie proche et moyen infrarouge a été effectuée selon la procédure schématisée en figure4. Au sein de cette procédure, les traitements numériques des données spectrales ont fait notamment appel au logiciel Unscrambler v10.3 (CAMO Software SA, Woodbridge, New Jersey, USA).

**i. Acquisition des spectres et prétraitement**

➤ la première étape consiste à l'acquisition des spectres de tous les échantillons de sol ( $n=938$ ) des deux sites d'étude (cf. annexe 4 et 5). Les échantillons sont préalablement séchés à l'air et broyés à 0.2 mm avant l'acquisition. Pour effectuer l'analyse spectrale, deux appareils ont été utilisés: (i) un spectrophotomètre proche infrarouge de type ASD –LabSpec 4 muni d'un logiciel Indico Pro version 6.0 couvrant le domaine 1100-2500 nm à un pas de 2 nm ; et (ii) un spectrophotomètre moyen infrarouge de type portable « The Agilent 4100 Exoscan FTIR » de résolution 4  $cm^{-1}$  collectant 64 scans par minute (cf. cliché 3). Particulièrement pour le cas du NIRS, chaque échantillon est exprimé par un spectre constitué de 700 variables de réflectance. Les valeurs de réflectance sont ensuite transformées en absorbance qui est le logarithme de l'inverse de la réflectance ( $\log(1/R)$ ). Pour le cas du MIRS, les variables obtenues comptent 1802 pour un spectre d'un échantillon. Une fois que ces spectres sont visuels, les spectres négatifs sont éliminés car ces derniers peuvent augmenter l'erreur de calibration.





(a) The Agilent 4100 Exoscan FTIR (b) ASD –LabSpec 4

**Photo 3: Appareil d'acquisition spectrale**

➤ La seconde étape consiste à effectuer un ACP sur l'ensemble de la population à étudier pour identifier les spectres aberrants (outliers) qui sont ainsi éliminés lors de la construction des modèles.

➤ La troisième étape est le prétraitement numérique de ces spectres pour améliorer le signal et afin de normaliser et de réduire les variations d'intensité des spectres dues, notamment, à l'effet de la taille des particules et au bruit de fond de l'appareil. Entre autre, ces différents prétraitements permettent aussi d'améliorer la qualité de prédiction. Les prétraitements appliqués à chaque groupe d'échantillon présentés dans le tableau suivant sont ceux qui sont retenus après plusieurs essais, et qui sont jugés le plus adéquats pour maximiser l'estimation.

**Tableau 2: Prétraitements des spectres**

Echantillons	Teneur en nutriment du sol analysé	MIRS		NIRS	
		Prétraitement	Outliers éliminés	Prétraitement	Outliers éliminés
Changalane	C				
	N			SNV puis baseline offset	
Chobela	C	SNV			7
	N				8
Changalane et Chobela	C		12		2
	N		12		13

**ii. Etablissement des modèles de prédiction**

Plusieurs modèles de prédiction du carbone organique et d'azote du sol ont été élaborés à partir du PLSR en vue de choisir le modèle le plus performant à tous les échantillons de sol rencontré dans chaque zone d'étude. Le PLSR permet de construire des modèles prédictifs lorsque les variables explicatives sont nombreuses et très corrélées (Camille T., 2010).

De ce fait, des modèles de prédiction dit « spécifique » ont été élaborés sur les échantillons de sols de Changalane, puis des échantillons de Chobela. Enfin, un autre modèle de prédiction a été élaboré pour l'ensemble des échantillons de Changalane et Chobela. Ce dernier modèle est qualifié « global ».

Le nombre total des échantillons à prédire ainsi que le nombre des échantillons de set de calibration et de validation pour chaque site d'étude sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau 3: Répartition des échantillons pour la prédiction**

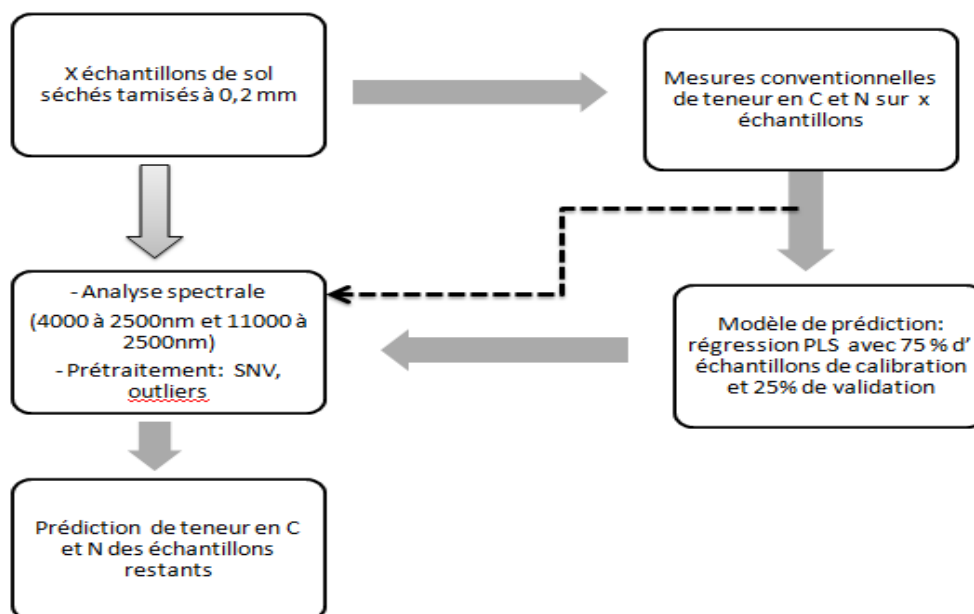
Site de prélèvement	Echantillon à prédire	MIRS		NIRS	
		calibration	validation	calibration	validation
Changalane	367	71	24	72	23
Chobela	380	72	24	72	24
Changalane- Chobela	747	143	48	144	47

Il est à préciser que les échantillons de sol issus des profondeurs 0 à 10 cm sont choisies par exprès pour constituer le set de calibration et de validation et réparties respectivement en  $\frac{3}{4}$  et  $\frac{1}{4}$ . Ce choix raisonnable est justifié par l'objectif d'obtenir des teneurs en carbone et azote du sol exactes à l'usage des agriculteurs.

Une régression des moindres carrés partiels (PLSR) est effectuée afin de corréler les valeurs spectrales avec les teneurs des constituants à prédire. Cette méthode consiste à modéliser les relations entre des variables mesurées comme le carbone organique et azote du sol et des variables de prédiction comme les valeurs d'absorbance des rayons infrarouges.

- Enfin, la dernière étape est l'application du modèle sur les constituants à prédire de la population restante.





**Figure 4: Procédure de prédiction des propriétés du sol par spectrométrie infrarouge**

Source : CIRAD, 2013

### I.5. Analyse des données

Trois groupes d'informations complémentaires sont requises dans l'élaboration du modèle de prédiction et la spatialisation des teneurs en C et N du sol:

- (i) la caractérisation de la population sur laquelle le modèle a été établi ;
- (ii) la qualité de la régression issue de la phase de calibration (ou d'étalonnage) et sa validation;
- (iii) la répartition des teneurs estimées.

#### I.5.1. Caractérisation des données de références

Le logiciel Microsoft EXCEL a été utilisé pour la saisie des données brutes et la mise en forme des résultats. Les résultats d'analyses chimiques sur les teneurs en carbone et azote des échantillons de sol ont été traités et analysés avec XLSTAT 2008. Des statistiques descriptives ont été en premier effectuées sur l'ensemble des valeurs de référence. Par la suite, les stocks de carbone et d'azote des échantillons de sol de profondeur 0 à 10 cm sont calculés. Afin de déterminer les stocks de carbone, la formule suivante a été appliquée:

$$\text{StockC} = \text{C org} * \text{Da} * e * 0,1$$

**Equation 3: Formule du stock de carbone**

Avec, **Stock C** : stock de carbone dans le sol (Mg C.ha<sup>-1</sup>)

**C** : teneur en carbone organique (mgC.g<sup>-1</sup> sol),

**Da** : densité apparente (g.cm<sup>-3</sup>) et

**e** : épaisseur de l'horizon de sol (cm)

Le procédé de calcul du stock d'azote total du sol (exprimé en  $\text{MgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) est le même que pour le calcul du carbone organique du sol:

$$\text{Stock N} = \text{N} * \text{Da} * \text{e} * 0,1$$

***Equation 4: Formule du stock d'azote du sol***

Avec : **Stock N** : stock d'azote dans le sol ( $\text{Mg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ )

**N** : teneur en azote de l'horizon du sol ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

**Da** : densité apparente du sol ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )

**e** : épaisseur de l'horizon (cm)

Pour une bonne illustration des stocks de carbone et d'azote, une cartographie a été élaborée en utilisant le logiciel Arcgis. Notamment, les données pédologiques utilisées sont préalablement fournies. La cartographie des stocks de carbone et d'azote des sols est mise en relation avec la carte pédologique de la zone d'étude pour savoir lesquels des types de sols présents ont une faible ou forte capacité de stockage de carbone et d'azote dans les systèmes agricoles.

**I.5.2. Qualification des modèles de prédiction obtenus**

Pour chaque modèle de prédiction, les paramètres statistiques suivants sont pris en compte selon Chang et al (2001) pour évaluer leur robustesse (cf. Annexe 1) :

- Le coefficient de détermination  $R^2$  qui exprime le degré de relation entre les valeurs mesurées et les valeurs de prédiction. Plus elle proche de 1, plus la relation est dite parfaite. Entre 0.8 et 0.7, la prédiction est moyenne et en-dessous de 0.7 la prédiction est mauvaise.
- L'écart type résiduel de la calibration (SEC) qui est un indice de la précision de la calibration.
- L'écart type résiduel de la validation croisée ou SECV mesure la capacité du modèle à prédire des échantillons appartenant à la population de l'établissement de la calibration même. SECV mesure donc la validation du modèle
- L'écart type résiduel de la prédiction ou SEP mesure la capacité du modèle à prédire des échantillons totalement nouveaux.
- La racine des erreurs quadratiques moyennes (Root Mean Squared Error) en calibration (RMSEC), et en prédiction (RMSEP) permettant de mesurer la différence moyenne entre les valeurs mesurées et prédites dans l'étape de calibration et de validation. Ainsi, RMSEC et RMSEP peuvent être interprétés comme étant l'erreur moyenne de la modélisation. Les modèles ayant des RMSE les plus faibles sont retenus.
- Le ratio performance/ déviation ou RPD est le rapport entre la variabilité de la population (écart-type) et la précision de la calibration (SECV ou SEP). Une valeur élevée du RPD indique un meilleur modèle et selon les valeurs avancées par Chang *et al.* (2001), un  $\text{RPD} > 2$  est bon, un RPD compris entre 1,4 et 2 est moyen et un  $\text{RPD} < 1,4$  signifie une mauvaise prédiction.

➤ Le biais qui est calculé généralement à l'étape de la validation du modèle et qui exprime la différence entre la moyenne des valeurs mesurées et des valeurs prédites.

### **I.6. Les contraintes de l'étude**

Deux contraintes majeures ont été rencontrées durant la réalisation de l'étude :

✚ Aucune descente sur terrain n'a été faite. Pour cela, les prélèvements des échantillons des sols ont été confiés par un autre. Les données nécessaires (topologie, végétation, mode de gestion des terres, climat, ...) entrant dans la variation des stocks de carbone et d'azote n'ont pas été déterminées.

✚ L'acquisition des données spectrales en proche infrarouge a été préalablement faite par autre. L'élimination des doublons parmi les nombreuses données a gaspillé plus de temps de travail et les effets de manipulation lors de l'acquisition spectrale ne sont pas détectables. Cette dernière pourrait bien diminuer la performance des modèles de prédiction.

✚ La non connaissance des sols mozambicains et la non disponibilité des données de références ont compliqué les analyses chimiques des sols dans la présente étude.

Malgré ces diverses contraintes, des mesures ont été ramenées à l'étude pour l'atteinte des objectifs du travail.

**I.7. Cadre opératoire récapitulatif de la recherche**

**Tableau 4: Cadre opératoire pour les hypothèses**

OBJECTIFS SPECIFIQUES	HYPOTHESES	INDICATEURS	METHODES	RESULTATS ATTENDUS
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Acquérir des données de référence en teneurs en azote et carbone des sols de chaque localité par méthode conventionnelle.</li> <li>➤ Analyser les variations des teneurs et des stocks de carbone et d'azote de sol au niveau de chaque site d'étude.</li> <li>➤ Effectuer des modèles de prédictions du carbone et d'azote des sols en utilisant la spectrométrie proche et moyen infrarouge.</li> </ul>	<p><i>L'étendue géographique de la collecte des échantillons influence la qualité des modèles de prédiction</i></p>	<p>R<sup>2</sup>, RMSEP, SEP, Biais et RPD par type d'étalonnage</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Analyse des échantillons de l'horizon 0-10cm par méthodes conventionnelles</li> <li>-Calcul des stocks de carbone et d'azote contenus dans l'horizon 0à 10cm du sol</li> <li>-Acquisition des spectres</li> <li>-Elaboration des modèles de prédiction</li> </ul>	<p>Performances des modèles selon le type d'étalonnage « site global » ou « site spécifique »</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Prédire les teneurs en carbone et azote des échantillons de sol restants pour chaque localité à partir des modèles élaborés ;</li> </ul>	<p><i>Le domaine spectral d'élaboration du modèle de prédiction détermine la qualité de prédiction pour la quantification des teneurs en constituants du sol</i></p>	<p>Variation des performances des modèles selon « SMIR » ou « SPIR »</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Utilisation des modèles pour prédire les teneurs en carbone et azote des échantillons restants</li> <li>-Représentation en boxplot des teneurs prédites</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Performances des modèles de prédiction de chaque variable selon l'outil utilisé « SMIR » ou « SPIR »</li> <li>-Regroupement des teneurs prédites par profondeur de prélèvement</li> </ul>

**Partie 2: RESULTATS ET  
INTERPRETATIONS**

## II.1 Statistique descriptive des valeurs de référence: C , N

Les sols de Chobela et de Changalane sont majoritairement constitués par l'eutric cambisol et le ferric lixisol (cf. tableau 5 et 6). Les moyennes des teneurs en carbone de l'eutric cambisol, du ferralic arenosol, du ferric lixisol et de l'haplic chernozem sont respectivement 7,72g/kg, 8,84g/kg, 27,94g/kg, 16,46g/kg. Pour les teneurs en azote, les moyennes sont de 0,6 g/kg pour l'eutric cambisol, 0,78 g/kg pour le ferralic arenosol, 1,89 g/kg pour le ferric lixisol et 1,29 g/kg pour l'haplic chernozem. Il est à noter une grande variabilité de teneur en carbone et d'azote au sein des 192 échantillons de sol de références. A titre indicatif, pour le ferric lixisol, les échantillons couvrent une large gamme de teneur en carbone et d'azote qui varie respectivement entre 5,67 g/kg à 53,32 g/kg et 0,59 g/kg à 3,84 g/kg. Ainsi la valeur maximale est dix fois plus importante que la valeur minimale. Il est à noter que le ferric lixisol du site de Changalane présente une teneur la plus élevée en azote et en carbone respectivement de l'ordre de 3,84 g/kg et 53,32 g/kg parmi tous les types de sol des sites d'étude. Par ailleurs, les échantillons de sols de Changalane présentent une forte intra-variation et inter-variation en termes de teneur en carbone et d'azote illustrés par une valeur d'écart-type compris entre 2 à 9.

**Tableau 5: Statistiques sommaires sur les teneurs en carbone (g/kg) des échantillons de calibration**

	CHOBELA	CHANGALANE		
	Eutric cambisol	Ferralic arenosol	Ferric lixisol	Haplic chernozem
<b>Nombre des échantillons</b>	97	9	74	12
<b>Minimum</b>	1,70	6,57	5,67	5,08
<b>Maximum</b>	20,61	14,01	53,32	32,28
<b>Moyenne</b>	7,62	8,84	27,94	16,46
<b>Ecart-type (n)</b>	3,12	2,60	8,86	9,14

**Tableau 6: Statistiques sommaires sur les teneurs en azote (g/kg) des échantillons de calibration**

	CHOBELA	CHANGALANE		
	Eutric cambisol	Ferralic arenosol	Ferric lixisol	Haplic chernozem
<b>Nombre des échantillons</b>	97	9	74	12
<b>Minimum</b>	0,15	0,56	0,59	0,46
<b>Maximum</b>	1,33	1,10	3,84	2,32
<b>Moyenne</b>	0,60	0,78	1,89	1,29
<b>Ecart-type (n)</b>	0,23	0,18	0,56	0,60

## II.2 Variations des stocks de carbone et d'azote sur l'horizon 0 à 10 cm

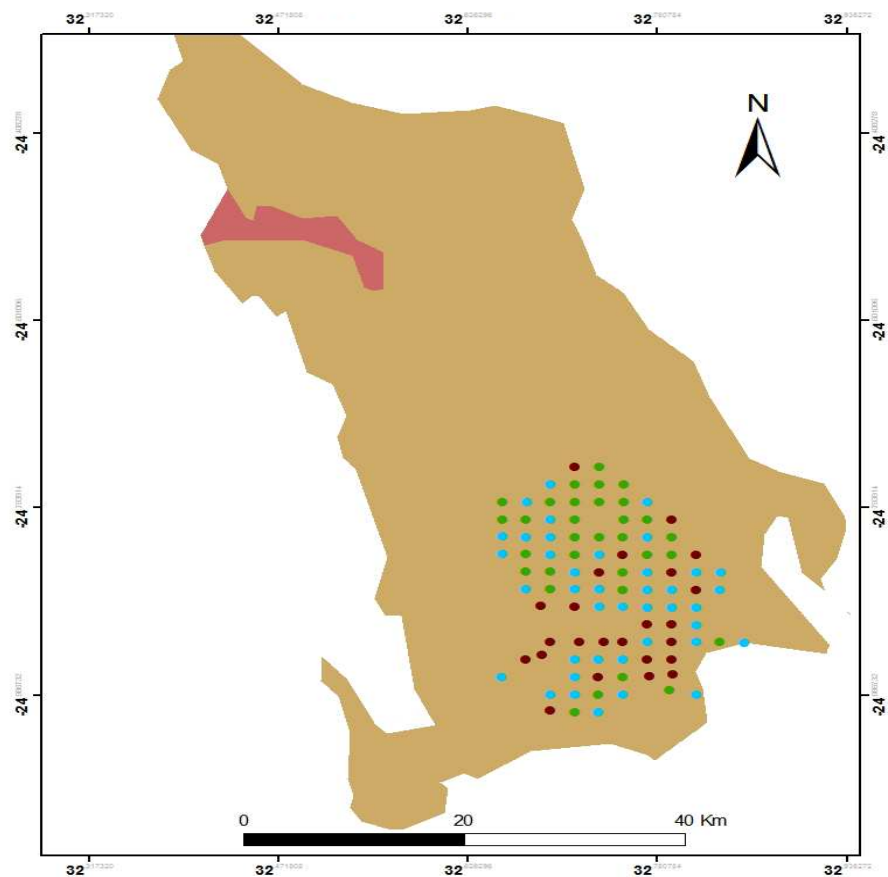
Bien que le site de Chobela soit formé par un seul type de sol, l'eutric cambisol présente une large variation de stocks de carbone et d'azote. En effet, l'azote stocké dans l'eutric cambisol de Chobela sur l'horizon 0 à 10 cm est compris entre 0,2 et 1 MgN.ha<sup>-1</sup>. Ce stock d'azote peut être reclassé en trois niveaux : faible pour un stock compris entre 0,2 et 0,4 MgN.ha<sup>-1</sup>, moyen pour un stock compris entre 0,5 et 0,7 MgN.ha<sup>-1</sup> et élevé pour un stock supérieur à 0,8 MgN.ha<sup>-1</sup> (cf. carte 3a). Par ailleurs, 25% des valeurs de stock d'azote sont seulement qualifiés faibles.

Parallèlement, le stock de carbone de Chobela présente une importante variation partant de 0,5 à 23 MgC.ha<sup>-1</sup>. Cette fourchette de valeurs de stock de carbone est aussi subdivisée en 3 classes : la classe des stocks faibles compris entre 0,5 et 7 MgC.ha<sup>-1</sup>, la classe des stocks moyens compris entre 8 et 14 MgC.ha<sup>-1</sup> et la classe des stocks élevés supérieur à 15 MgC.ha<sup>-1</sup> (cf. carte 3b). En outre, 10 % des points de prélèvement ont une valeur de stock de carbone appartenant à la classe élevée, supérieur à 15 MgC.ha<sup>-1</sup>.

Afin de caractériser les valeurs de stock de carbone et d'azote des sols de Changalane, trois niveaux sont retenus : faible pour des valeurs de stock de carbone et d'azote compris respectivement entre 6,6 et 24 MgC.ha<sup>-1</sup> et entre 0,6 et 1,5 MgN.ha<sup>-1</sup>, moyen pour 25 à 39 MgC.ha<sup>-1</sup> et 1,6 à 2,4 MgN.ha<sup>-1</sup>, élevé pour un stock de carbone supérieur à 40 MgC.ha<sup>-1</sup> et pour un stock d'azote supérieur à 2,5 MgN.ha<sup>-1</sup> (cf. carte 4 a et b).

En tenant compte de cette classification des valeurs de stock de carbone et d'azote des sols de Changalane, aucune homogénéité de valeur de stock n'est distinguée sur le ferric lixisol, le ferralic arenosol et l'haplic chernozem. Pour les sols prélevés à Changalane, ces trois types de sol présentent une variation importante de stock d'azote compris entre 0,6 et 5 MgN.ha<sup>-1</sup> et un stock de carbone compris entre 6,6 et 66 MgC.ha<sup>-1</sup>. La valeur maximale des stocks de carbone et d'azote du ferric lixisol et du ferralic arenosol est dix fois plus importante que la valeur minimale, laissant voir ainsi une forte intra-variation des stocks sur la carte 4. Par contre, il est excepté pour les échantillons ayant un type de sol haplic chernozem lesquels sont caractérisés par un stock de carbone et d'azote faible respectivement à l'ordre de 6,6 à 24 MgC.ha<sup>-1</sup> et 0,6 à 1,5 MgN.ha<sup>-1</sup>.

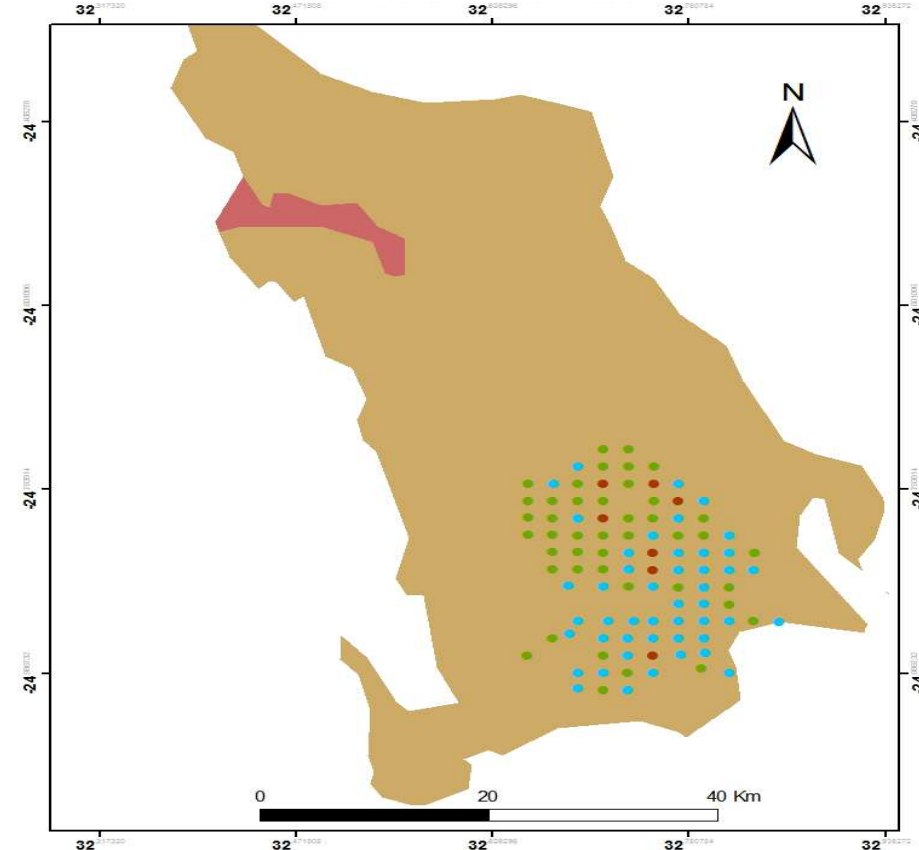
Stocks d'azote du site de Chobela



- 0,2 à 0,4 MgN.ha<sup>-1</sup>
  - 0,5 à 0,7 MgN.ha<sup>-1</sup>
  - 0,8 à 1 MgN.ha<sup>-1</sup>
- (a)

- Eutric cambisol
- Calcic vertisol

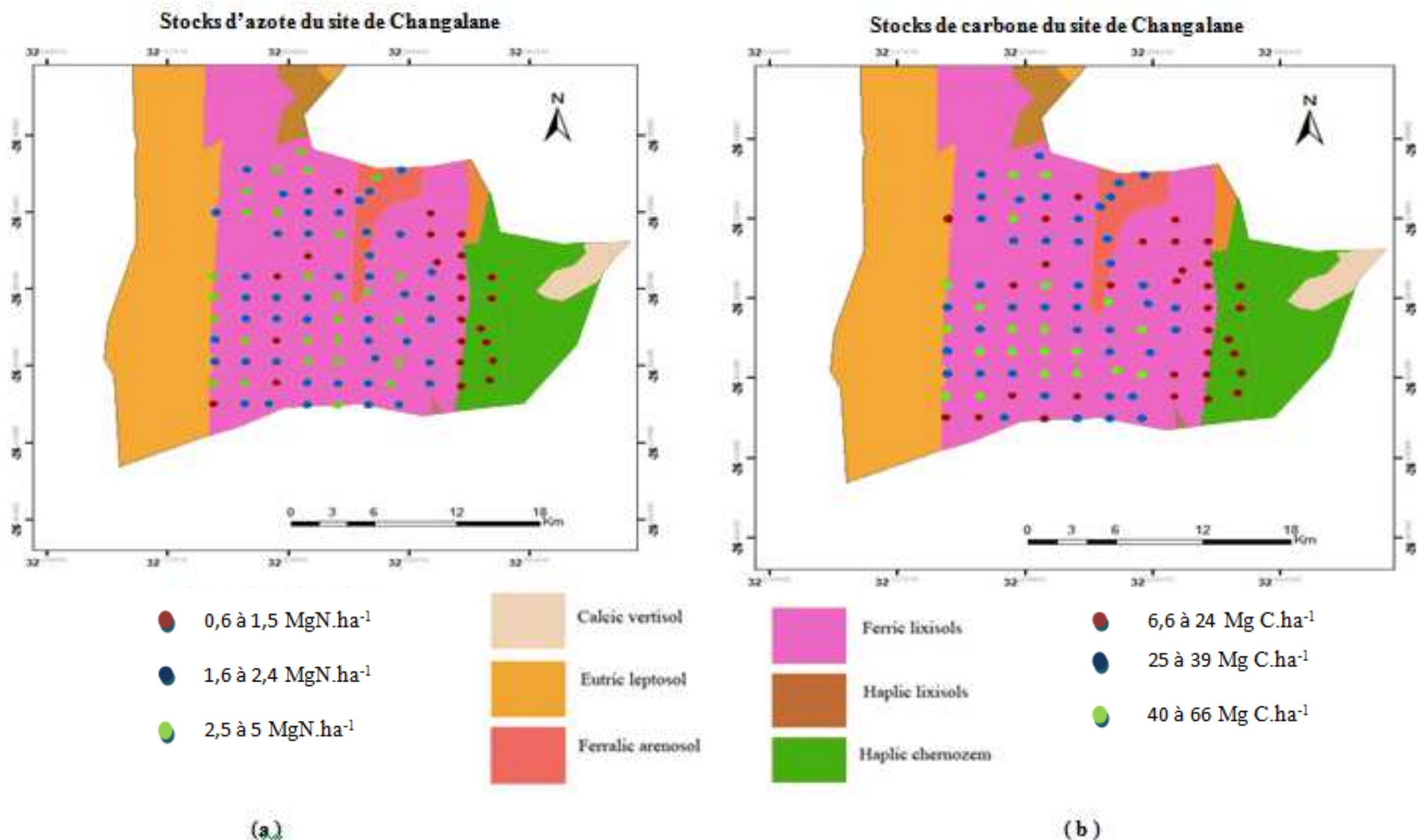
Stocks de carbone du site de Chobela



- 0,5 à 7 Mg C.ha<sup>-1</sup>
  - 8 à 14 Mg C.ha<sup>-1</sup>
  - 15 à 23 Mg C.ha<sup>-1</sup>
- (b)

Carte 3: Cartographie des stocks d'azote (a) et de carbone (b) du site de Chobela calculé sur la profondeur 0 à 10 cm





Carte 4: Cartographie des stocks d'azote (a) et de carbone (b) du site de Changalane calculé sur la profondeur 0 à 10 cm

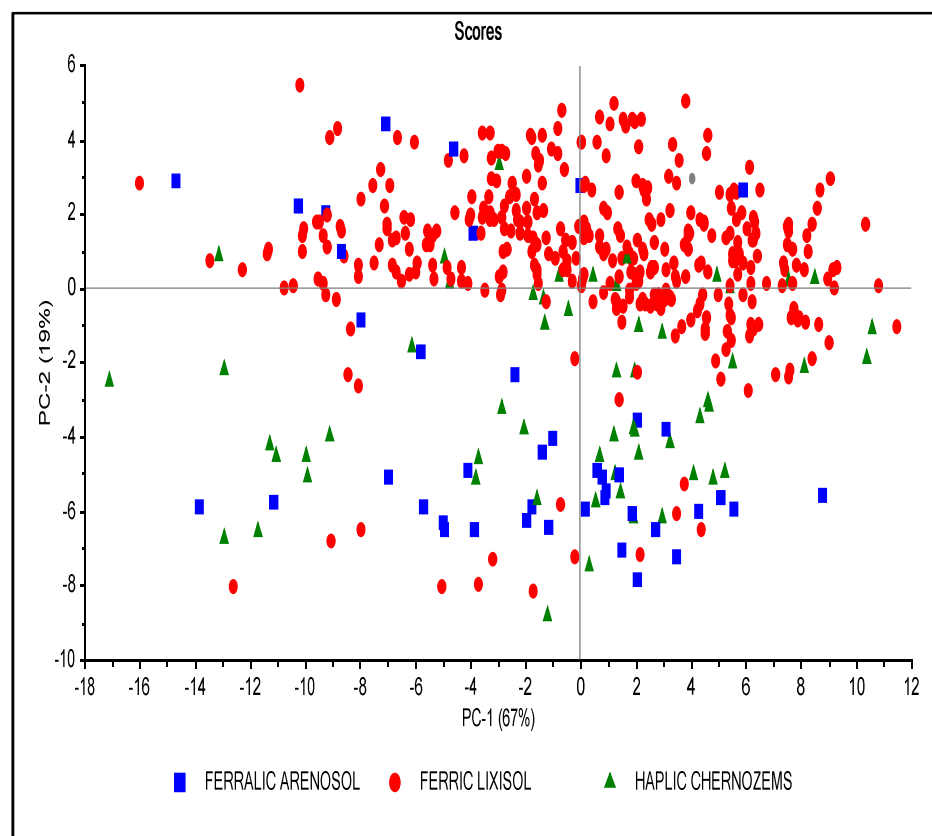
### **II.3 Résultats des Analyses Composantes Principales**

Cette partie présente les résultats de la projection des spectres de Chagalane et de Chobela sur le plan factoriel afin d'interpréter leur répartition.

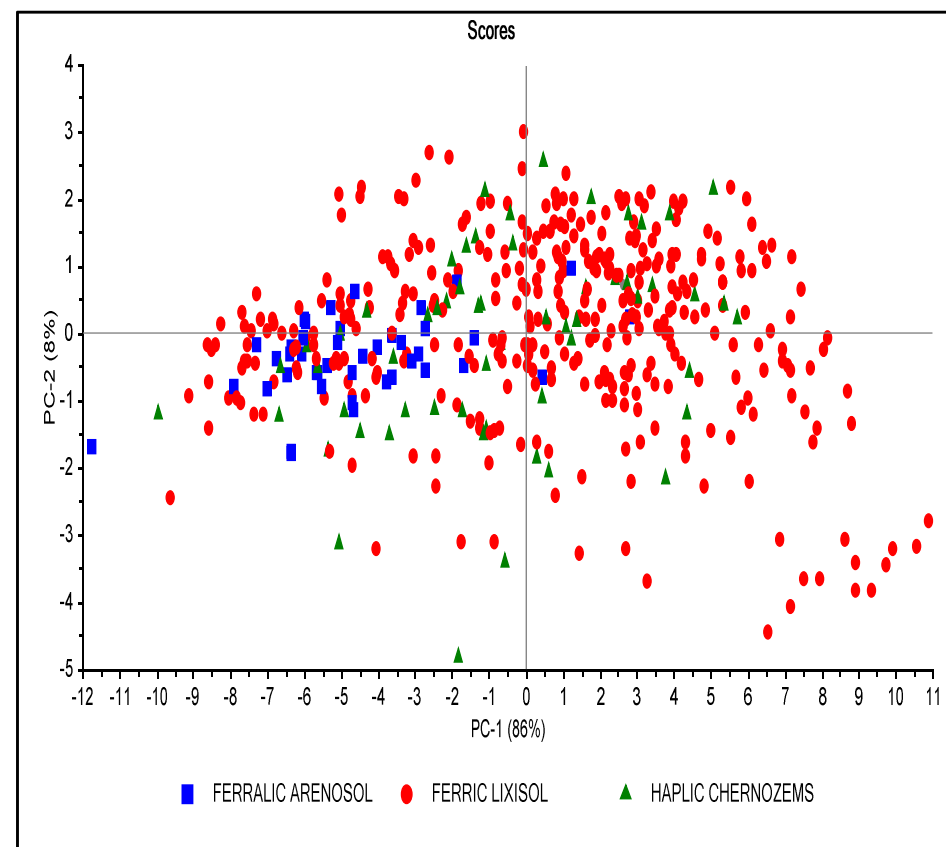
#### **II.3.1 Échantillons de Chagalane**

Le deuxième plan factoriel explique 86% de la variabilité analytique des échantillons spectrales en moyen infrarouge tandis que cette valeur remonte à 94% en proche infrarouge (cf. figure 5).

Sachant que les axes factoriels sont des combinaisons linéaires des variables initiales notamment les propriétés analytiques, en moyen infrarouge le premier axe factoriel explique 67% alors que le deuxième axe explique 19 % de cette variabilité. De ce fait, les échantillons se répartissent d'une façon à ce que la majorité des ferric lixisols se trouvent sur la partie positive du deuxième axe factoriel et contrairement pour les ferralic arenosols et les haplic chernozems. Ainsi, il existe une grande disparité de l'ensemble des échantillons autour des deux axes factoriels. En outre, la population spectrale du site de Chagalane semble très hétérogène dans le domaine du moyen infrarouge. Néanmoins, un meilleur regroupement des échantillons est rendu possible dans le domaine du proche infrarouge. En effet, le premier axe factoriel explique 86% des variables en proche infrarouge ce qui induit au regroupement des ferralic arenosol dans la partie négative du premier axe factoriel. D'où, aucun échantillon atypique n'a été soustrait lors de la calibration pour ne pas éroder le caractère général de l'ensemble de la population et que cette dernière puisse correspondre à la gamme des échantillons de calibration. En effet, les échantillons de calibration sont formés par 74 échantillons du ferric lixisol, 9 échantillons du ferralic arenosol et 12 échantillons de l'haplic chernozem.



(a)



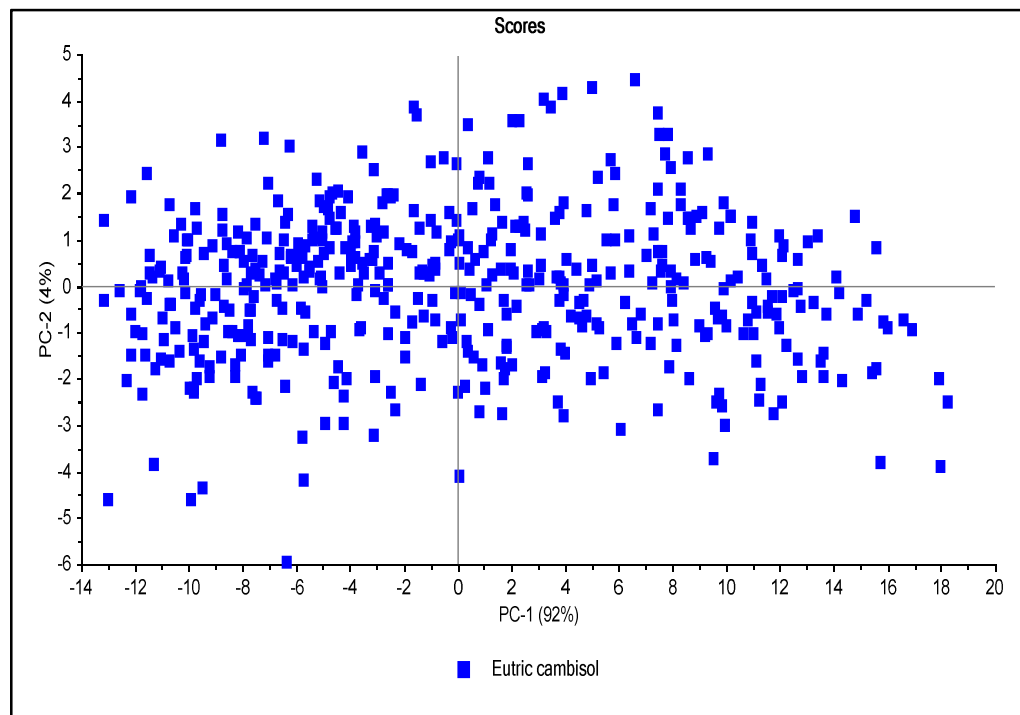
(b)

Figure 5: Regroupement des spectres de Changalane issus du moyen infrarouge (a) et proche infrarouge (b) suivant les axes factoriels de l'ACP

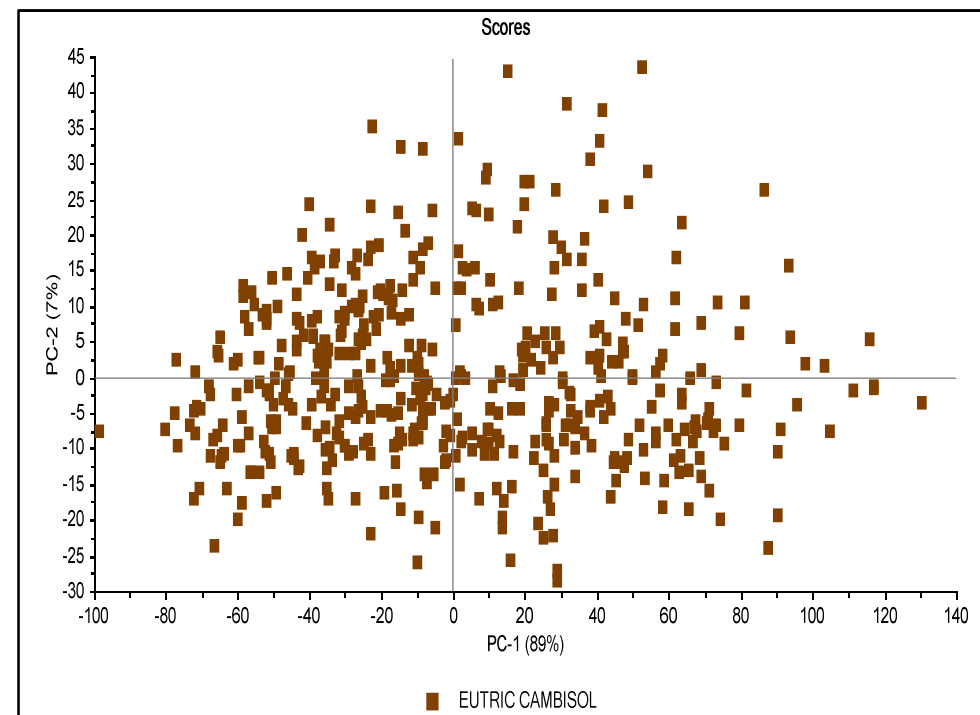
### II.3.2 Echantillons de Chobela

Dans le domaine du moyen infrarouge, 96% de la variabilité analytique des échantillons est expliqué par le deuxième plan factoriel dont 92% de cette variabilité est expliqué par le premier axe factoriel et 4 % par le deuxième axe (cf. figure 6). Malgré que les échantillons appartiennent à un même type de sol, il y a une grande disparité de l'ensemble des échantillons autour du premier axe factoriel. Les échantillons occupent toute la partie longitudinale du premier axe factoriel. Ce fait empêche la soustraction des échantillons atypiques afin de maintenir la gamme analytique trouvée dans l'ensemble et aussi présent dans le set de calibration.

Une diminution du rôle du premier axe factoriel s'observe dans le domaine de proche infrarouge. En effet, celui-ci explique 89% de la variabilité des échantillons et donne occasion au deuxième axe d'expliquer 7% de la variabilité. Se regroupant plus au centre des deux axes factoriels, les échantillons laissent apparaître des échantillons atypiques qui sont loin de l'inertie. Ces derniers sont au nombre de 8 et sont soustraits de la population.



(a)

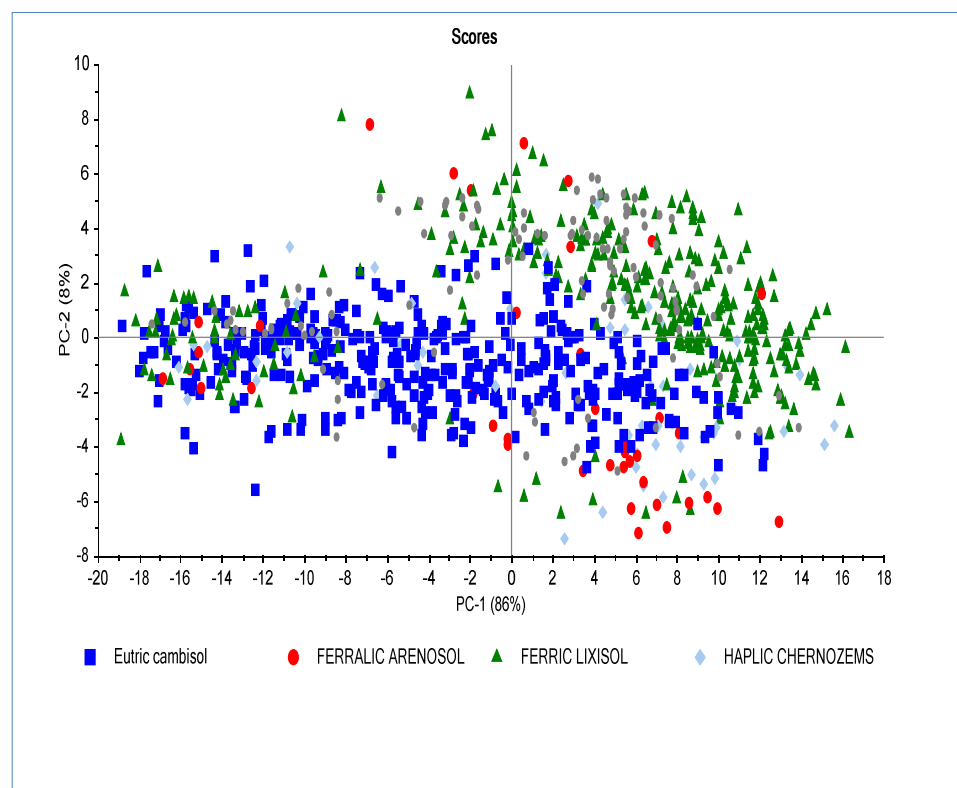


(b)

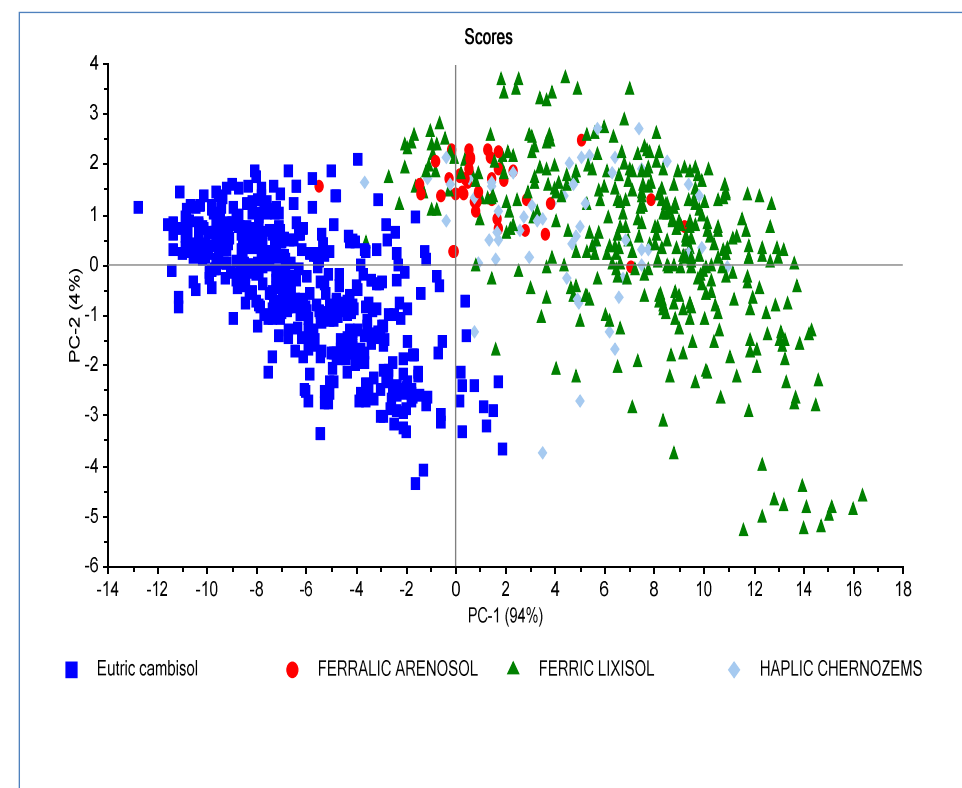
Figure 6: Regroupement des spectres de Chobela issus du moyen infrarouge (a) et proche infrarouge (b) suivant les axes factoriels de l'ACP

### II.3.3 Ensemble des échantillons de Chagalane et de Chobela

Le plan factoriel 2 explique 94% de la variabilité analytique des échantillons dans le domaine du moyen infrarouge comparé à 98% expliqué dans le domaine du proche infrarouge (cf.figure 7). Deux classes d'échantillons se distinguent sur les figures (a) et (b), notamment le ferric lixisol et l'eutric cambisol mais il laisse apercevoir une dispersion des échantillons en provenance de Chagalane dans la figure (a). Ainsi, 12 échantillons atypiques sont soustraits lors de la calibration en moyen infrarouge. Par ailleurs, en proche infrarouge le regroupement des échantillons est plus net. En effet, la majorité des échantillons originaires d'un même site se projettent sur la même aire du plan factoriel. Notamment, dans la partie gauche se dispersent les eutric cambisols de Chobela et dans la droite les ferric lixisols, les ferralic arenosols et les haplic chernozems de Chagalane. Aucun échantillon atypique n'a été soustrait en proche infrarouge car un échantillon collecté sur un site quelconque peut présenter des propriétés pédologiques qui sont différentes du reste des échantillons collectés sur le même site, mais s'apparente bien à une population d'échantillons collectées à une échelle spatiale plus large.



(a)



(b)

Figure 7: Regroupement des spectres de Changalane et Chobela issus du moyen infrarouge (a) et proche infrarouge (b) suivant les axes factoriels de l'ACP

## II.4 Performance des modèles de prédiction

Dans cette partie sont présentés les résultats de l'établissement des modèles de prédiction par site et par combinaison des deux sites. D'un point de vue général, les critères d'évaluation du set de calibration sont plus performants que ceux obtenus en set de validation.

### II.4.1 Modélisation sur les échantillons du Site de Changalane

Pour la variable carbone, des bonnes estimations sont obtenues pour les sols du site de Changalane. Lors de la validation, le modèle calibré sur moyen infrarouge est qualifié plus performant. En effet, les critères d'évaluation de la performance du modèle de prédiction présentent les valeurs suivantes :  $R^2=0,91$ ,  $RMSEP= 3,23$  g/kg,  $SEP= 3,29$  g/kg,  $Biais= -0,04\%$  et  $RPD =3,25$  en moyen infrarouge , bien plus performant que le modèle calibré en proche infrarouge qui fournit un modèle de prédiction avec un  $R^2=0,75$ ,  $RMSEP= 6,43$  g/kg,  $SEP= 6,25$  g/kg,  $Biais= -1,98\%$  et  $RPD =1,71$ .

Contrairement à la variable carbone, la prédiction de la variable N est plus intéressante en proche infrarouge qu'en moyen infrarouge. Le modèle de prédiction présente les performances suivantes en proche infrarouge :  $R^2=0,76$ ,  $RMSEP= 0,41$  g/kg,  $SEP= 0,41$  g/kg,  $Biais= -0,71\%$   $RPD=1,59$ . Par contre, en moyen infrarouge, ces valeurs se abaissent pour avoir un  $R^2=0,73$ ,  $RMSEP= 0,37$  g/kg,  $SEP= 0,38$  g/kg,  $Biais= -0,02\%$   $RPD =1,71$  (cf. Annexe 6).

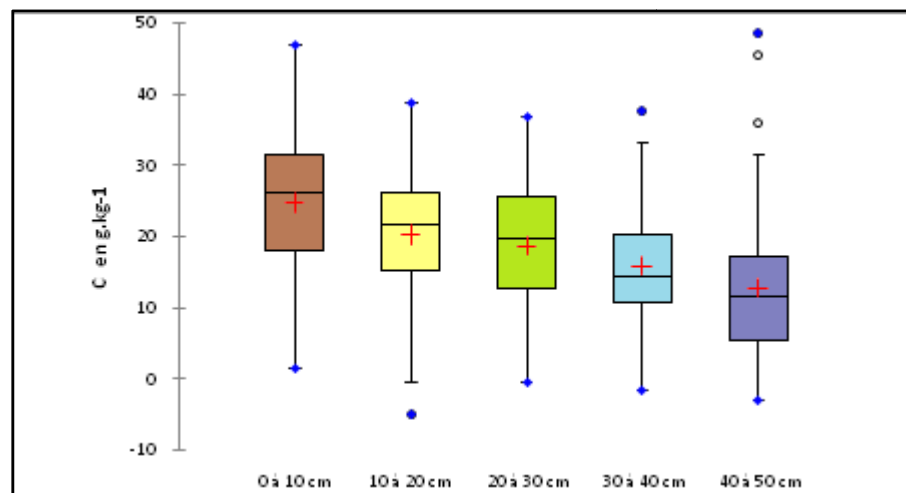
Tableau 7: Résultats des modèles en calibration et en prédiction des valeurs des teneurs en carbone et azote de Changalane

		CALIBRATION						VALIDATION				
		sd	$R^2$ C	SEC	$R^2$ CV	SECV	RPD	$R^2$	RMSEP	SEP	Biais	RPD
C	MIRS	10,69	0,94	2,54	0,87	3,81	2,81	0,91	3,23	3,29	-0,04	3,25
	NIRS	10,69	0,84	4,07	0,77	4,96	2,16	0,75	6,43	6,25	-1,98	1,71
N	MIRS	0,65	0,89	0,21	0,8	0,28	2,32	0,73	0,37	0,38	0,02	1,71
	NIRS	0,65	0,72	0,31	0,46	0,44	1,48	0,76	0,41	0,41	-0,71	1,59

A partir des boxplots des teneurs en carbone et azote du sol prédites, il est déduit que les teneurs prédites à partir des modèles plus performants (modèle issu du MIR pour le carbone et le modèle issu du NIR pour l'azote) suivent un gradient décroissant allant de la profondeur 0 à 10cm vers la profondeur 40 à 50 cm (cf. Figure8). Cinq échantillons sont prédits en hors gamme en moyen infrarouge pour la variable carbone et il s sont au nombre de 4 en proche infrarouge pour la variable azote.



MIR



PIR

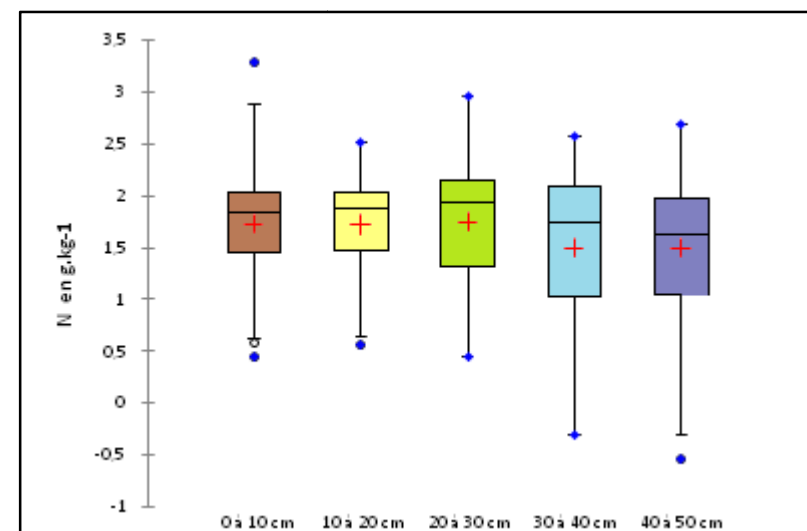
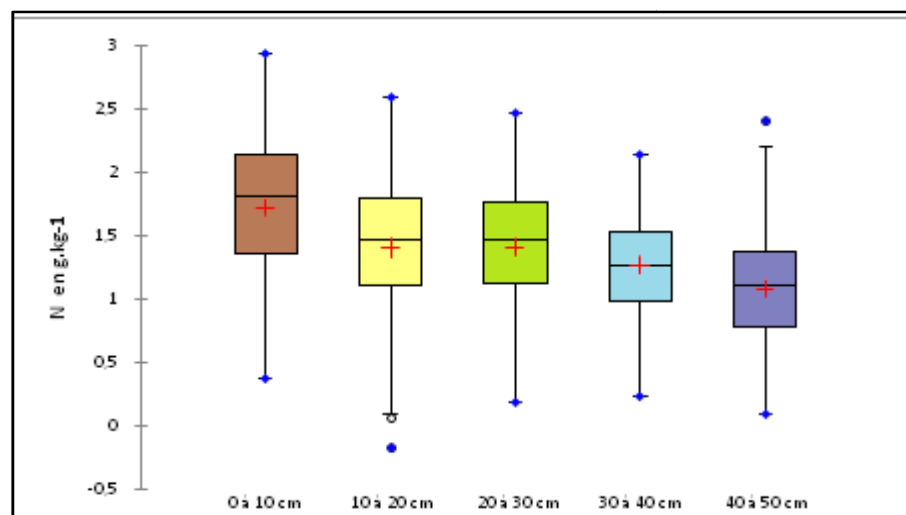
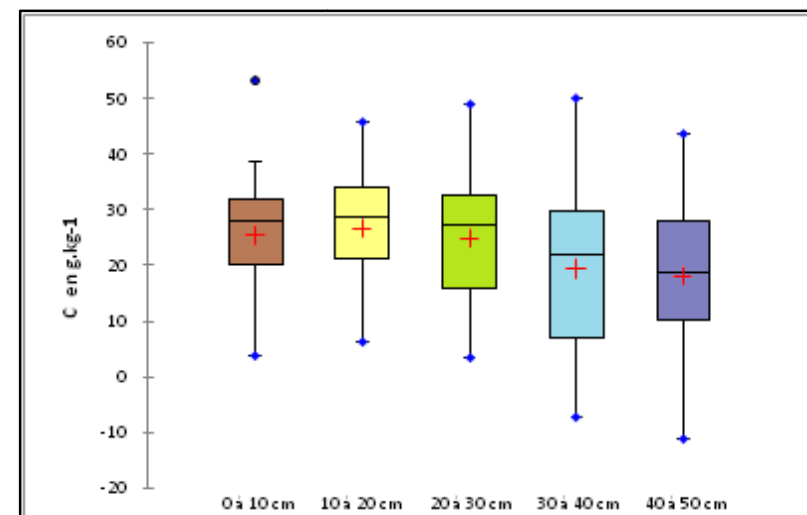


Figure 8: Répartition des teneurs en carbone et en azote prédites des échantillons de Changalane selon les profondeurs

### II.4.2 Modélisation sur les échantillons du site de Chobela

Lors de la calibration, le modèle présente des critères plus intéressants que ceux obtenus lors de la validation. Pour la variable carbone et azote, le modèle de prédiction issue de l'utilisation du proche infrarouge est plus performant que les modèles calibrés en moyen infrarouge. Notamment, pour le carbone, en proche infrarouge, les performances d'estimation du modèle de prédiction sont respectivement :  $R^2 = 0,59$ ,  $RMSEP = 1,66 \text{ g/kg}$ ,  $SEP = 1,72 \text{ g/kg}$ ,  $Biais = 0,18\%$  et  $RPD = 1,8$ . De même, le modèle de prédiction des teneurs en azote est plus performant en proche infrarouge, présentant les critères suivantes :  $R^2 = 0,48$ ,  $RMSEP = 0,14 \text{ g/kg}$ ,  $SEP = 0,14 \text{ g/kg}$ ,  $Biais = 0,01\%$  et  $RPD = 1,64$ .

Par ailleurs, il est à souligner que les modèles de prédiction sont de qualité moyenne, car la valeur du coefficient de variation ( $R^2$ ) varie entre 0,33 à 0,59 associé ainsi avec environ 70% à 40% de risque. De plus, pour les modèles plus performants en proche infrarouge, le RPD est compris entre 1.4 à 2 d'où la qualité de la prédiction est moyenne pour les échantillons de Chobela. (cf. Annexe 7).

**Tableau 8: Résultats des modèles en calibration et en prédiction des valeurs des teneurs en carbone et azote de Chobela**

		CALIBRATION						VALIDATION				
		sd	$R^2 C$	SEC	$R^2 CV$	SECV	RPD	$R^2$	RMSEP	SEP	Biais	RPD
C	MIRS	3,11	0,81	1,42	0,62	2,04	2,19	0,55	2,10	2,32	0,50	1,34
	NIRS	3,10	0,71	1,54	0,61	1,82	2,01	0,59	1,66	1,72	0,18	1,80
N	MIRS	0,23	0,77	0,11	0,58	0,15	2,09	0,33	0,2	0,24	0,068	0,96
	NIRS	0,23	0,76	0,1	0,67	0,12	2,30	0,48	0,14	0,14	0,013	1,64

La qualité moyenne des modèles de prédiction ne permet pas un ordre logique de répartition des teneurs en carbone et en azote selon un gradient vertical décroissant. Aussi, pour les deux modèles de prédiction obtenus les plus performants pour les échantillons de Chobela, les teneurs en azote et carbone prédites sont presque corrélées négativement. Pour un  $R^2 = 0,48$ , les boxplots des teneurs d'azote prédites en proche infrarouge suivent un gradient vertical croissant de l'horizon supérieure du sol vers l'horizon profond. Alors que les teneurs en carbone prédites suivent un gradient vertical décroissant. De plus, 5 échantillons des horizons 0 à 10 cm, 10 à 20 cm, 30 à 40 cm et 40 à 50 cm sont prédits hors gamme en teneurs de carbone et azote obtenues respectivement en moyen infrarouge et en proche infrarouge et dont les modèles sont les plus performants parmi les 4 modèles obtenus pour les échantillons de Chobela (cf. Figure 9).

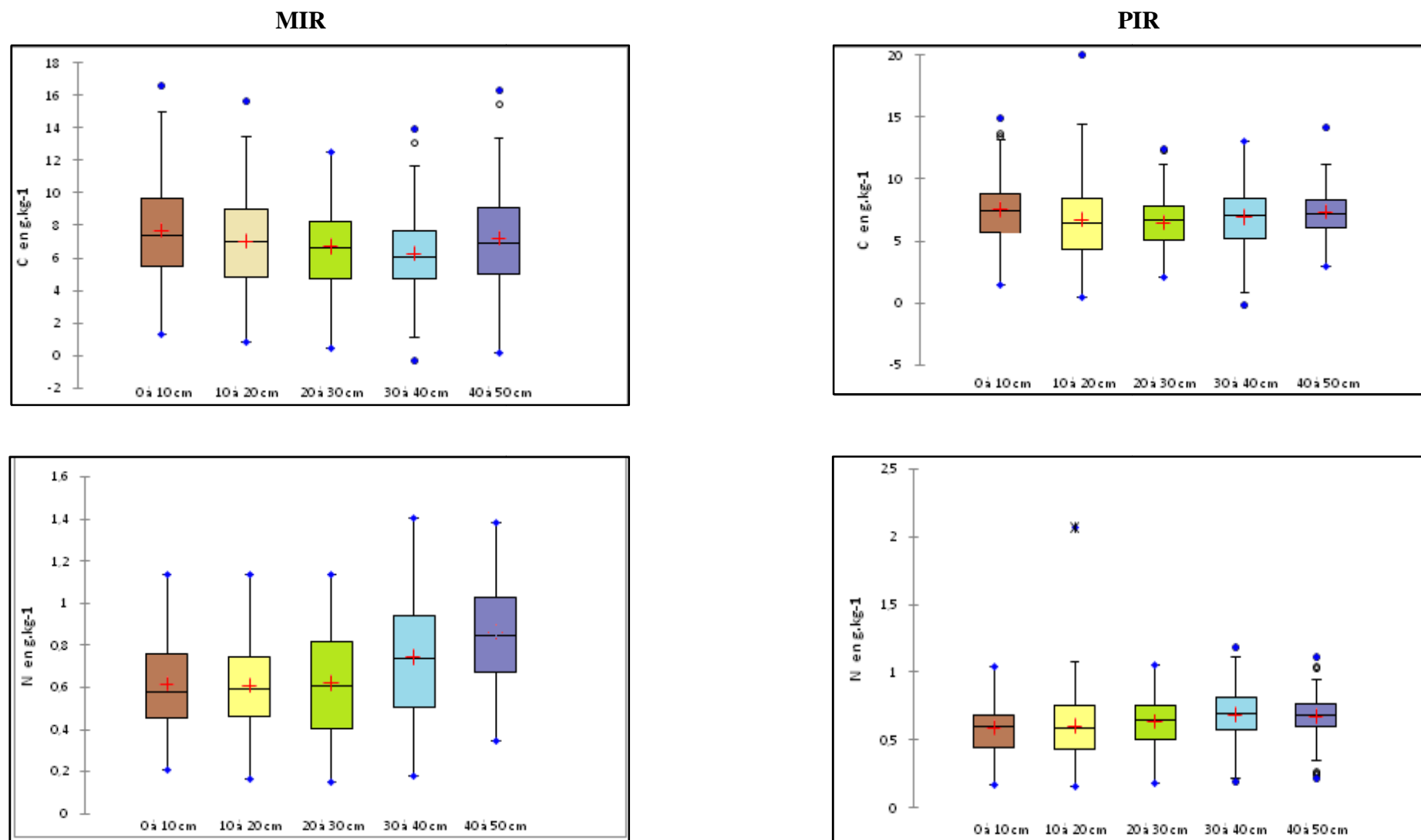


Figure 9: Répartition des teneurs en carbone et en azote prédites des échantillons de Chobela selon les profondeurs

### II.4.3 Modélisation sur l'ensemble des échantillons du site de Changalane et Chobela

Pour les deux variables analytiques, les modèles obtenus sont d'excellente qualité en moyen infrarouge qu'en proche infrarouge. Ceci étant, pour la variable carbone, au stade de validation, le modèle calibré MIR présente les critères d'évaluation suivante :  $R^2 = 0,91$  ,  $RMSEP = 3,55$  g/kg ,  $SEP = 3,61$  g/kg ,  $Biais = 0,25\%$  et  $RPD = 3,22$  , plus performant que le modèle calibré sur PIR (  $R^2 = 0,81$  ,  $RMSEP = 5,51$  g/kg ,  $SEP = 5,46$  g/kg ,  $Biais = -1,08\%$  et  $RPD = 2,13$ ). Pour la variable azote, le modèle calibré en moyen infrarouge présente au stade de validation des valeurs de :  $R^2 = 0,8$  ,  $RMSEP = 0,35$  g/kg ,  $SEP = 0,36$  g/kg ,  $Biais = 0,05\%$  et  $RPD = 2,03$ (cf. Annexe 8).

**Tableau 9: Résultats des modèles globaux en calibration et en prédiction des valeurs des teneurs en carbone et azote de Changalane et de Chobela**

		CALIBRATION						VALIDATION				
		sd	R <sup>2</sup> C	SEC	R <sup>2</sup> CV	SECV	RPD	R <sup>2</sup>	RMSEP	SEP	Biais	RPD
C	MIRS	11,62	0,95	2,33	0,91	2,93	4,99	0,91	3,55	3,61	0,25	3,22
	NIRS	11,62	0,88	4,00	0,84	4,51	2,91	0,81	5,51	5,46	-1,08	2,13
N	MIRS	0,73	0,93	0,19	0,91	0,22	3,84	0,8	0,35	0,36	0,05	2,03
	NIRS	0,74	0,84	0,36	0,83	0,26	2,06	0,74	0,45	0,44	-0,12	1,68

Etant donné les valeurs de  $R^2$  supérieures à 0,8 pour les modèles de prédiction les plus performants calibrés sur l'ensemble des échantillons de sol, les représentations en boxplot des teneurs prédites en azote et en carbone en moyen infrarouge respectent parfaitement une distribution selon un gradient vertical décroissant allant de l'horizon supérieur du sol vers la profondeur 50 cm (cf. figure 10). Les teneurs en carbone et azote prédites par les modèles les plus performants sont corrélées positivement. Par ailleurs, pour les modèles de prédiction les plus performants, 7 % des échantillons sont prédits comme ayant des valeurs de teneur en carbone négatives alors que pour la variable azote les teneurs prédites sont toutes des valeurs positives.

Il est également noté qu'un seul échantillon prédit est hors norme pour la variable azote et carbone. Cet échantillon hors norme est rencontré dans la gamme des sols issus de la profondeur 40 à 50 cm.

MIR

PIR

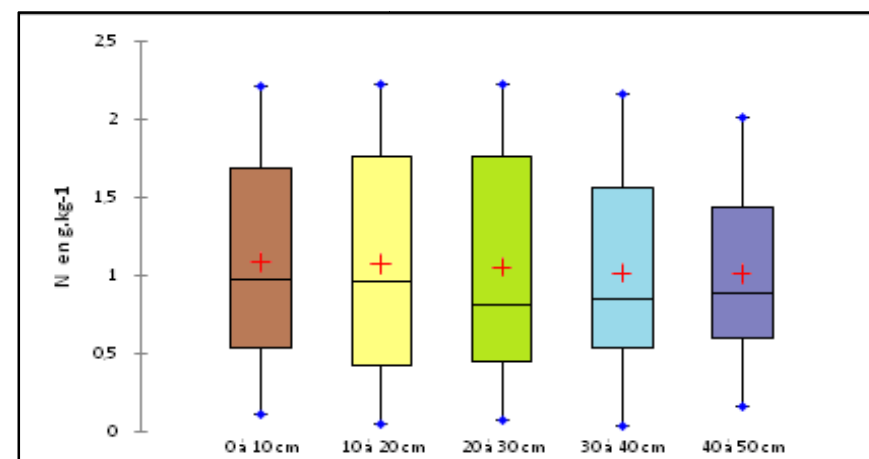
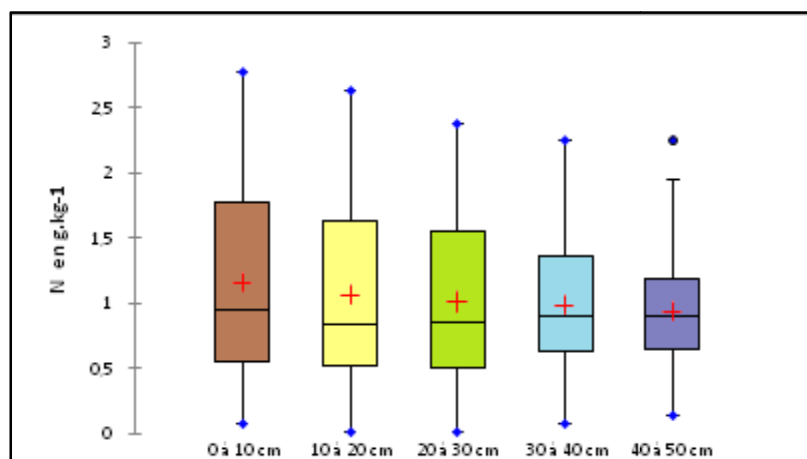
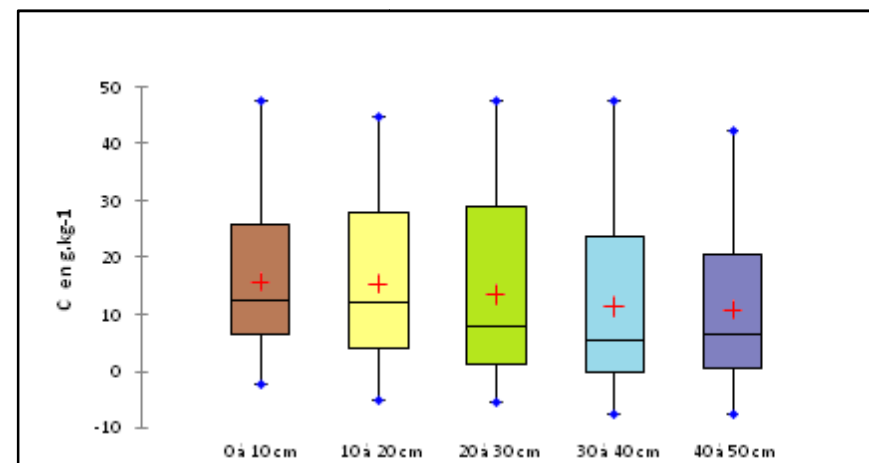
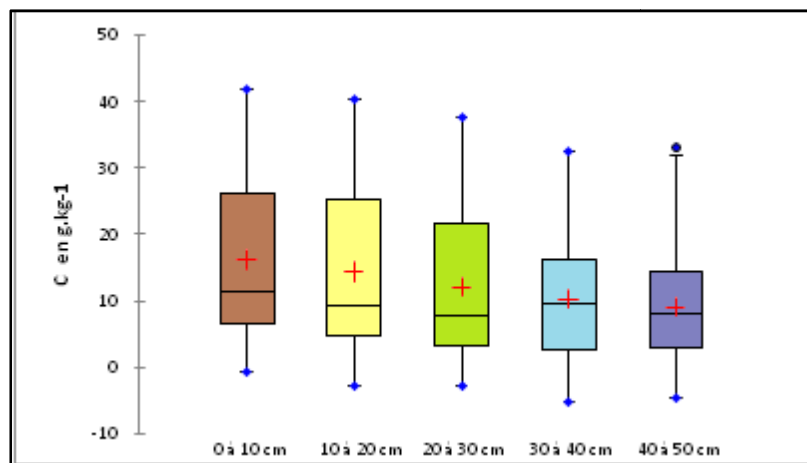


Figure 10: Répartition des teneurs en carbone et en azote des échantillons de Changalane et de Chobela selon les profondeurs

## **II.5 Conclusion partielle**

Les résultats des analyses conventionnelles permettent de déduire la variation des gammes de teneurs en carbone et azote pour chaque type de sol. Parmi les quatre types de sol, les sols de Changalane sont les plus riches en carbone et azote avec une teneur en carbone variée entre 5,08 g/kg et 53,326 g/kg et une teneur en azote comprise entre 0,46 g/kg et 1,89 g/kg. L'eutric cambisol de Chobela présente des teneurs en carbone et en azote comprise respectivement entre 1,7 g/kg et 20,61 g/kg ; 0,15 g/kg et 1,33 g/kg. Ces valeurs montrent que la valeur maximale est dix fois plus importante que la valeur minimale

A partir de ces teneurs déterminées, une représentation des stocks de carbone et azote des échantillons 0 à 10 cm est faite pour visualiser implicitement leur variation ainsi que le niveau stocké dans l'horizon supérieure du sol. Par la suite, le recours à l'ACP par « site spécifique » et « site global » a rendu possible la visualisation des regroupements des échantillons spectraux autour des axes factoriels et de déduire ainsi la disparité existant au sein de la population spectrale par site de prélèvement et par domaine spectral d'analyse (MIR et PIR). Parmi les ACP élaborés en MIR et PIR, le regroupement des échantillons de Changalane est plus net en PIR, pour les échantillons de Chobela en MIR et pour le site global en PIR. D'autre part, cette méthode statistique a aussi permis de sélectionner les échantillons atypiques afin d'améliorer la performance des modèles de calibration.

La partie résultat s'achève sur la présentation des performances des modèles de prédiction et les valeurs des teneurs prédites. Sur ce point, de bonnes prédictions de carbone sont obtenues en moyen infrarouge pour Changalane et le site global avec une même valeur de  $R^2 = 0,91$ . Pour la variable azote, le modèle plus performant est celui calibré sur le site global avec un  $R^2 = 0,8$ . Des représentations en boxplot des valeurs prédites par type de modèle de prédiction sont faites afin d'analyser la distribution des teneurs par profondeur de prélèvement. Les résultats montrent que les valeurs prédites par des modèles ayant un  $R^2$  supérieur à 0,7 suivent une distribution selon un gradient vertical décroissant allant de l'horizon supérieur du sol vers la profondeur.

**Partie 3: DISCUSSIONS ET  
RECOMMANDATIONS**

### **III.1. Discussions**

#### **III.1.1. Discussions sur l'approche méthodologique**

##### **III.1.1.1. Sur la méthode d'échantillonnage**

La méthode d'échantillonnage systématique a été d'une importance capitale afin de respecter une certaine représentativité de chaque site. En effet, Viscarra Rossel (2008) a confirmé qu'il est important de considérer un nombre suffisant d'échantillons afin de décrire la variabilité spatiale de chaque zone. Le choix des sites sur lesquelles ont été réalisés les travaux d'échantillonnage s'est basé sur une observation visuelle de l'ensemble du paysage de chaque site en tenant compte des occupations du sol.

##### **III.1.1.2. Sur l'acquisition spectrale**

Une bonne acquisition du spectre est la base d'un modèle pertinent et vrai, l'acquisition a été accomplie par divers personnes différentes qui pourront augmenter les erreurs dans l'acquisition. Par ailleurs, toutes les normes sur les préparations des échantillons et les réglages des appareils (MIRS et NIRS) sont respectées.

##### **III.1.1.3. Sur l'élaboration des modèles de prédiction**

Les travaux de calibration et de validation ont été réalisés dans l'objectif d'aboutir à un ou plusieurs modèles performants et robustes applicables à de prochains travaux de prédiction du carbone organique et d'azote du sol sur l'ensemble de la zone d'intervention du projet. La construction des modèles de prédiction a fait recours à une technique statistique plus appropriée afin d'ajuster aux données spectrales des modèles de régression. Il s'agit notamment de la régression en moindres carrés partiels ou RMCP. Cette méthode statistique permet de construire des modèles prédictifs lorsque les variables explicatives sont nombreuses et très corrélées (Sundberg, 1999). En RMCP, toutes les variables sont conservées. Les variables importantes dans la prédiction ont des poids élevés et les variables de moindre importance participent au modèle, mais avec un poids faible (Tenenhaus, 1998).

Pour optimiser la possibilité d'obtenir différents modèles performants, l'élaboration d'un modèle global sur l'ensemble des échantillons et de différents modèles spécifiques à chaque site d'étude s'avère ainsi importante. Le choix des paramètres de performance utilisés pour la comparaison des modèles a été ainsi capital. Si le coefficient de détermination  $R^2$  est souvent le paramètre utilisé pour exprimer le degré de relation entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites, il a été vérifié que cet indicateur est insuffisant pour évaluer la performance des modèles statistiques élaborés (Bellon-Maurel, 2011) d'où la considération d'autres paramètres statistiques dont les plus utilisés sont le SEP et le RPD. Bellon-Maurel et McBratney (2011) insistent sur la nécessité de prendre en compte le biais de prédiction notamment pour la mesure de la teneur de carbone du sol afin d'être assez concluant sur la faisabilité de la méthode adoptée.



### III.1.1.4. Sur les différentes approches

Dans les différentes études liées à la faisabilité de l'application de la spectroscopie infrarouge dans la science du sol, l'évaluation des caractéristiques physico-chimiques se base sur 2 cadres. Les approches suivantes ont été appliquées dans la présente étude :

#### 🚩 Des approches à l'échelle régionale

L'objectif est alors, de tester les paramètres répondant positivement à l'analyse et de développer des équations de calibration pour ceux-ci à travers le développement de bibliothèques spectrales à l'échelle d'une région, d'un ou de plusieurs pays. De nombreuses études sont réalisées dans ce sens. Leur principal point faible, à l'exception de certaines études comme celles menées par Chang et al. (2001), Shepherd et al. (2002) et Brown et al. (2006), est le nombre restreint d'échantillons utilisés. Seules les perspectives du MIRS et NIRS sont alors envisagées et une application en routine n'est pas directement possible. De plus, le risque principal est une surestimation de la valeur des résultats de la prédiction (Van et al, 2003).

#### 🚩 Des approches à l'échelle de la parcelle ou d'un site spécifique

Cette approche permet de répondre aux besoins de précision dans le domaine de l'agriculture. Par contre, elle demande de connaître précisément la variabilité spatiale des paramètres physiques et chimiques d'une parcelle ou d'un site.

## III.1.2. Discussion sur les résultats

### III.1.2.1. Statistique descriptive des valeurs de référence (C et N)

La description des teneurs en carbone et azote des échantillons de référence a permis de savoir à l'avance non seulement la largeur de la gamme des teneurs en carbone et azote des échantillons de l'horizon 0 à 10 cm du sol mais aussi l'écart-type de variation de ces teneurs pour chaque type de sol. Une analyse chimique des teneurs en carbone des 4 types de sol par la méthode de Walkley et Black a permis de déduire que le ferric lixisol est plus riche en carbone avec une teneur en carbone moyenne de 27,94 g/kg et que l'eutric cambisol présente une teneur moyenne de l'ordre de 7.62 g/kg, le plus faible parmi les 4 types de sol étudiés par l'auteur. Par contre, une étude élaborée par J. -P. F. Pallo et al en 2009 a identifiée une teneur en carbone moyenne de 10.26 g/kg pour le ferric lixisol, une teneur moyenne deux fois moins que celle trouvée par le présent auteur. Parallèlement, en 2009, J. -P. F. Pallo et al ont aussi déduit une teneur moyenne en carbone organique du sol à l'ordre de 8.71g/kg pour l'eutric cambisol face à une valeur de 7.62 g/kg trouvée par l'auteur de la présente étude.

Concernant la teneur moyenne en azote du ferric lixisol et de l'eutric cambisol, la présente étude a déduit des valeurs moyennes respectivement 1.89 g/kg et 0.6 g/kg. Par ailleurs, les teneurs en azote moyennes présentées dans l'écrit de J. -P. F. Pallo et al en 2009 pour le ferric lixisol et l'eutric cambisol correspondent respectivement à 0.78 g/kg et 0.89 g/kg.

Pour l'haplic chernozem les teneurs moyennes en carbone et azote déduites par la présente étude correspondent respectivement à 16, 46 g/kg et 1.29 g/kg. Dans l'écrit de Tobiasova et al. en 2013, pour ce même type des sols les teneurs moyennes en carbone et azote sont plus élevées et correspondent à 22, 39 g/kg et 2 g/kg.

Tous les importants écarts entre les teneurs déduites par la présente étude et le travail de J. –P. F. Pallo et al en 2009 seraient expliqués par une différence d'occupation du sol et mode d'usage des terres.

### **III.1.2.2. Variation des stocks de carbone et d'azote des échantillons de référence**

Mis à part la description des teneurs en carbone et azote des sols de référence, la cartographie des stocks a permis une meilleure visualisation des inter-variations et intra-variations des stocks existant au sein de chaque type de sol. Le plus remarquable est la grande variation de stock existant pour un seul type de sol, notamment l'eutric cambisol de Chobela. Selon Blanchard et Bernoux en 2005, en un point donné, les variations des stocks de carbone sont dues à divers processus tels que la modification des apports de matière organique, les transferts de carbone sous forme solide (particulièrement par érosion en nappe) ou soluble (lixiviation et ruissellement) et pertes par minéralisation (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) de la matière organique des sols.

### **III.1.2.3. Résultats des ACP**

Selon Aichi (2009), l'ACP permet de visualiser et de mettre en évidence l'existence d'un effet de site parce que chaque site a ses spécificités pédologiques. En considérant au départ chacun des sites séparément, les résultats d'ACP montrent une large dispersion des spectres autour des axes factoriels. Par contre, dans le cas du modèle global, le regroupement des spectres autour des axes factoriels devient plus net. En effet, les échantillons originaires d'un même site se projettent sur la même aire du plan factoriel laissant apercevoir ainsi une population quasi-homogène. L'amélioration du regroupement des échantillons sur les axes factoriels est en relation avec l'augmentation de la taille de la population (Aichi, 2009) et permettant dans ce sens une meilleure distinction des propriétés minérales des sols.

### **III.1.2.4. Performance des modèles de prédiction**

Les performances des modèles de prédiction au sein de chaque lot (par site global et par site spécifique) aboutissent à l'ordre de performance suivant :

Tableau 10: Ordre de performance des modèles de prédiction

		Moins performant <span style="float: right;">→</span> plus performant		
<b>CARBONE</b>	MIR	<b>Modèle de Chobela</b> ( $R^2=0.55$ et RPD = 1,34)	<b>Modèle global</b> ( $R^2= 0.91$ et RPD = 3,22)	<b>Modèle de Changalane</b> ( $R^2=0.91$ et RPD = 3,25)
	PIR	<b>Modèle de Chobela</b> ( $R^2=0.55$ et RPD = 1,34)	<b>Modèle de Changalane</b> ( $R^2=0.75$ et RPD = 1,71)	<b>Modèle global</b> ( $R^2= 0.81$ et RPD = 2,13)
<b>AZOTE</b>	MIR	<b>Modèle de Chobela</b> ( $R^2=0.33$ et RPD = 1,34)	<b>Modèle de Changalane</b> ( $R^2=0.73$ et RPD = 1,71)	<b>Modèle global</b> ( $R^2= 0.8$ et RPD = 2,03)
	PIR	<b>Modèle de Chobela</b> ( $R^2=0.48$ et RPD = 1,64)	<b>Modèle global</b> ( $R^2= 0.74$ et RPD= 1,68)	<b>Modèle de Changalane</b> ( $R^2= 0.76$ et RPD = 1,59)

Pour la variable carbone, en moyen infrarouge, Clairotte et al en 2014 ont trouvé un  $R^2= 0.88$  pour le modèle calibré sur site global et  $R^2= 0.92$  pour le modèle calibré sur site spécifique.

En moyen infrarouge, Rakotovo (2013) a trouvé des valeurs maximales de  $R^2= 0,86$  dans l'élaboration d'un modèle global et  $R^2= 0,95$  pour un modèle local. Toutefois, cette logique de performance du modèle spécifique par rapport au modèle global est à moitié validée par cette étude. En effet, en moyen infrarouge, le modèle RMCP calibré sur les échantillons du site de Changalane et le modèle global rassemblant simultanément les échantillons de Changalane et de Chobela présentent de bonnes qualités de prédiction avec des coefficients de détermination égal à 0.91, leurs performances sont également stables, car en changeant d'un jeu de calibration spécifique à global les modèles calibrés sont de qualité similaire. Le modèle le moins performant est celui de Chobela obtenu en moyen infrarouge ( $R^2= 0.55$  et RPD= 1.34).

En outre, entre calibration en site spécifique de Changalane et Chobela, le modèle de Changalane est très performant parce que son lot de calibration est représentatif de tous les types de sols le constituant. De plus, le lot de calibration de Changalane est caractérisé par trois gammes de teneurs définies par les trois types de sol, facilitant l'estimation des échantillons restant. Ce qui n'a pas été réalisé pour le cas de Chobela où le lot de calibration est uniformément constitué par un seul type de sol sans distinction des propriétés minérales donc une seule gamme de teneur. De ce fait, les estimations des échantillons de Chobela sont faites autour d'une gamme de teneur car aucune analyse minérale discriminative n'a été effectuée afin de bien prédéfinir le lot de calibration.

Pour la variable azote, en moyen infrarouge, Viscara Rossel et al (2008) ont obtenu des résultats de prédiction performante ( $R^2= 0.84$ ), qui est proche de la valeur de  $R^2= 0.8$  du modèle

global, le plus performant, calibré en moyen infrarouge par la présente étude. En proche infrarouge, le présent travail déduit un  $R^2 = 0.76$  pour le modèle spécifique calibré sur les échantillons de Changalane et  $R^2 = 0.48$  pour le modèle de Chobela qui sont respectivement des valeurs maximum et minimum. Toutefois, les résultats en proche infrarouge déduit par la présente étude sont bien inférieurs comparés à la valeur trouvée par, Bimont en 2014 ( $R^2 = 0,85$  à  $0,9$ ) et Gras en 2014 ( $R^2 = 0,85$  à  $0,89$ ).

Les différences sur la performance des résultats obtenus par la présente étude et ceux des autres chercheurs résident sur trois points essentiels :

- ✚ le nombre d'échantillons et la diversité pédologique liée à l'échelle spatiale. En effet certaines études ne concernent que des échantillons de sols très homogènes, alors que d'autres tentent de couvrir une large diversité de situations pédologiques (Chang et al , 2001). L'échelle spatiale de collecte des échantillons affecte la variation de gamme des teneurs constituant le lot de calibration et la représentativité de ce dernier.

- ✚ la gamme de longueurs d'onde ainsi que le type de spectrophotomètre et le choix des méthodes statistiques qui diffère selon les objectifs de l'étude, selon l'état des connaissances en termes de puissance des ordinateurs et des techniques statistiques et mathématiques existants au moment de la réalisation des études.

- ✚ les prétraitements réalisés sur les spectres avant la phase d'étalonnage, ainsi que les méthodes de détection des valeurs aberrantes.

Les différences de performances sont également plus accentuées en passant en calibration en moyen infrarouge à proche infrarouge. En effet, pour la variable azote, les modèles spécifiques aux sites de Changalane et de Chobela calibrés en proche infrarouge sont moyennement satisfaisants ( $R^2 = 0,76$  pour Changalane et  $R^2 = 0,48$  pour Chobela) mais plus performants que les modèles spécifiques calibrés en moyen infrarouge.

Le modèle de calibration de teneur en azote de Chobela en proche infrarouge est plus médiocre même si le lot de calibration n'est formé que par un seul type de sol (eutric cambisol) soit disant homogène. Ce fait est expliqué par l'importance de la variation de ce type de sol en constituant minéralogique, donc plus hétérogène. Selon Viscara Rossel et al. ,1998, la mauvaise performance des modèles est liée à la faiblesse du signal en proche infrarouge, particulièrement dans les sols contenant peu de matière organique et caractérisés par une matrice minérale variable.

Par ailleurs, Morra et al. (1991) qui ont estimé, en utilisant le PIR, les teneurs en azote total dans les fractions limoneuses et argileuses du sol, affirment que les équations développées en considérant seulement la fraction limoneuse sont plus adéquates pour la détermination des concentrations d'azote total. Dans tous les cas, l'une des explications qui est donnée à la bonne prédiction de l'azote est sa forte corrélation avec le carbone.

La faible performance des modèles de prédiction est aussi liée à l'application de la méthode de régression par moindres carrés partiels (PLSR). Même si cette technique montre de fortes potentialités, elle pose aussi certains problèmes liés à l'inter-corrélation des variables et à la pluralité des variables. Cette situation aboutit donc à un modèle très incertain. En effet, les variables sont par nature très corrélées c'est-à-dire qu'un spectre possède une certaine continuité : le signal mesuré à une longueur d'onde donnée est très dépendant de ceux mesurés aux longueurs d'ondes voisines. De plus, un trop grand nombre de variables explicatives peut s'avérer néfaste: il augmente la probabilité de capter des perturbations et entraîne une complexification du modèle, ce qui induit une augmentation du nombre de variables dissimulés (Camille T. ,2010). La pluralité des variables explicatives ajoute de l'erreur en prenant en compte des zones spectrales qui ne sont pas reliées à la concentration des minéraux considérés.

### **III.1.2.5. Les teneurs prédites**

La teneur en carbone et azote du sol décroît avec la profondeur, ce qui pourrait être attribuée à la diminution des matières organiques générées par les activités biologiques. Cette affirmation est admise par tous les auteurs internationaux ou nationaux (Arrouays et al.,2003; Rakotonarivo, 2009;Razafimahatratra, 2006). Dans le souci de controverser cette affirmation, des représentations en boxplots des teneurs prédites ont été faites pour les trois types de modèles (spécifiques et globaux). En effet, la calibration en moyen infrarouge déduit des teneurs prédites réparties selon un gradient décroissant allant de l'horizon supérieur vers l'inférieur. Cette logique de répartition n'est pas respectée par tous les modèles calibrés en proche infrarouge.

### **III.1.3. Réponses aux hypothèses**

#### **H1 : L'étendue géographique de la collecte des échantillons influence la qualité des modèles de prédiction**

En examinant les performances des modèles calibrés en moyen infrarouge, aussi bien dans le cas de la variable C que dans le cas de la variable N, les modèles « site spécifique » ne sont pas plus performants que les modèles « site global » .

Rappelons que pour ces deux variables, les deux sites couvraient des gammes de teneurs qui sont significativement variées selon les types de sol. Il apparaît donc que les modèles « globaux » calibrés sur l'ensemble des échantillons sont capables d'intégrer la variabilité intrinsèque des échantillons de sols collectés à Changanane et Chobela. De plus, l'augmentation de la taille de la population a rendu possible une bonne représentativité du set de calibration par rapport à la population, améliorant ainsi les performances des modèles globaux. Ainsi, en moyen infrarouge, les deux modèles « globaux » calibrés sont incontestablement plus performants que les modèles « site spécifique » lorsque chacun de ces derniers est utilisé pour estimer les teneurs en carbone et en azote des échantillons collectés sur ces propres sites.

Egalement, en proche infrarouge, pour la variable carbone, le modèle global est le plus performant, s'ensuit après le modèle spécifique de Changalane et en dernier lieu le modèle de Chobela. Par ailleurs, pour la variable azote, le modèle global est en deuxième rang après le modèle de Changalane. En effet, les teneurs en azote des échantillons de calibration du modèle global sont subdivisées en deux gammes de teneurs (65% des échantillons ayant des teneurs comprises entre 0.16 à 1.34 g/kg et 35% des échantillons appartenant à 1.38 à 3.84 g/kg ) alors que le lot de calibration de Changalane est constitué à 99 % par une seule gamme de teneur comprise entre 0.59 à 3.84 g/kg.

Ces résultats permettent toujours de confirmer que la qualité des modèles est en étroite relation avec la largeur de variation des gammes de teneur en carbone et azote des échantillons ainsi que la représentativité du set de calibration.

**L'hypothèse 1 est validée.** Pour la variable azote, le modèle spécifique de Changalane est plus performant que le modèle dit « global » en proche infrarouge, alors que parmi les cas restants, le modèle « global » est le plus performant.

## **H2 :Le domaine spectral d'élaboration du modèle de prédiction détermine la qualité de prédiction pour la quantification des teneurs en constituants du sol**

La variable carbone est d' autant plus prédite en moyen infrarouge qu'en proche infrarouge sauf pour le cas du modèle spécifique de Chobela mais qui est tout de même moyennement performant. Les bonnes prédictions des teneurs en carbone s'expliquent par les vibrations des liaisons carbonées dont les fondamentales se situent dans le MIR et dont les harmoniques du premier et second ordre (plus faible absorption de lumière) se situent respectivement dans le PIR (Viscarra, 2006).

La SPIR donne des prédictions plus précises que la SMIR sur les teneurs en azote du sol calibrés sur modèle spécifique, à l' exception du modèle global qui opportune toujours le moyen infrarouge.

Par ailleurs, même si les modèles de prédiction sont plus performants en proche infrarouge, la répartition des teneurs prédites ne suit pas le gradient décroissant tel que les teneurs prédites en moyen infrarouge. Ainsi, la qualité de prédiction est meilleure en moyen infrarouge qu'en proche infrarouge. De plus, Pirie et al. (2005) affirment aussi que la SMIR dépasse la SPIR du point de vue de la capacité de prédictions quantitatives des constituants du sol. **Donc, l'hypothèse 2 est validée.**

### **III.1.4. Apports et intérêts de la recherche**

#### **III.1.4.1. Intérêts scientifiques**

Cette étude étoffe les recherches scientifiques d'une part sur la caractérisation des teneurs en carbone et azote des 4 types de sol et d'autre part sur l'élaboration de modèle de prédiction. L' étude a permis d' appuyer les confirmations des autres chercheurs concernant l' opportunité de la

spectrométrie en moyen infrarouge pour la détermination du teneur en carbone du sol et la spectrométrie proche infrarouge pour l' azote du sol. La méthodologie appliquée, notamment l'élaboration du modèle global, a un grand intérêt du fait que ce modèle de prédiction est utilisable à large échelle (combinant la zone de Chagalane et de Chobela).

#### **III.1.4.2. Apport pour le projet**

Pour le projet BIOVA, cette étude rapporte deux atouts majeurs. La connaissance de la variation des stocks de carbone et d'azote du sol dans le profondeur 0 à 10 cm du sol grâce aux teneurs obtenues par les analyses chimiques constitue des données de base indispensables pour l'évaluation future de l'amélioration des stocks grâce aux actions du projet. Puis, les modèles de prédiction constituent des outils facilitant les prochaines analyses de teneurs en azote et carbone du sol au cours de l'intervention du projet. L'utilisation de ces modèles de prédiction va réduire les coûts financiers et temporels d'analyse des sols.

## III.2. Recommandations

### III.2.1. Sur l'utilisation du modèle

A partir des résultats de la présente étude, les modèles globaux obtenus en moyen infrarouge sont recommandés pour la prédiction des teneurs en carbone et en azote des sols de Changalane et de Chobela. D'une part les performances de ces modèles sont robustes. Le modèle global pouvant prédire la teneur en azote du sol présente un  $R^2 = 0.8$  et  $RPD = 2,03$ . Pour la variable carbone, le modèle présente les critères d'évaluation suivante  $R^2 = 0.91$  et  $RPD = 3,22$ . D'autre part ces modèles sont utilisables à plus grande échelle car ils sont élaborés dans deux zones d'intervention : Changalane et Chobela. Toutefois, la validité de ces modèles nécessite encore une étude approfondie des zones d'étude afin d'appréhender si la variabilité de cette région soit couverte par les échantillons du set de calibration. Dans l'utilisation de ces modèles pour des prédictions futures, il est indispensable que les échantillons constitutifs du set de calibration soient scannés selon la même procédure que la présente étude et que tout nouveau spectre soit également saisi selon cette même procédure donc une harmonisation du protocole analytique.

### III.2.2. Sur l'amélioration du modèle

Les critères de performances des modèles obtenues dans cette étude expriment en général des bons résultats. Toutefois, des améliorations sont encore envisageables. Pour cela, il est recommandé de :

- Laisser le logiciel Unscrambler choisir préalablement les échantillons constituant le lot de calibration et de validation afin de maximiser la représentativité ;
- Effectuer un nouveau lot de calibration et de validation en inversant la méthode de sélection
- Tester d'autres méthodes statistiques de calibration telles que le MLR, le PCR, ..
- Affiner la procédure de prédiction en proche infrarouge, notamment pour la prédiction de la variable azote, par une phase de pré-sélection des longueurs d'onde les plus porteuses de l'information (Chong et Jung, 2005 ; Cécillon et. al., 2008) et par une séparation au préalable des différentes fractions granulométriques.

### III.2.3. Perspectives de recherche

Plusieurs travaux de recherche feront suite à cette étude notamment sur l'application des connaissances acquises dans ce mémoire. En guise de perspectives, dans le cadre spécifique d'une contribution de l'étude pour la caractérisation des sols, l'interprétation des spectres est aussi utile pour une analyse qualitative pour savoir les constituants minéraux et pour compléter ainsi les données quantitatives déjà obtenues. Les modèles sont également utiles pour cartographier sur un territoire plus ou moins large des propriétés physico-chimiques des sols, en complément des méthodes géostatistiques. À l'échelle parcellaire, cette technique permet de cartographier la variabilité des propriétés de sol étudié et de l'utiliser dans le cadre de l'agriculture de précision permettant ainsi d'adapter les intrants en fonction des caractéristiques physico-chimiques de la parcelle.



### III.2.4. Pour le projet BIOVA

Dans ce projet intitulé BIOVA, les objectifs sont d'assurer les productions agricoles familiales dans le cadre de la sécurité alimentaire et d'augmenter la séquestration de carbone en vue de lutte contre le changement climatique. Pour pouvoir atteindre cet objectif, la promotion des techniques agro-écologiques innovantes pour une gestion optimale de la biomasse provenant de l'agriculture et de l'élevage sont requises. Des stratégies sont donc développées :

#### Axe stratégique 1 : favoriser et conserver les stocks de nutriments des sols

Cet axe vise premièrement les pratiques de gestion pour augmenter les stocks de carbone et d'azote des sols car ils ont une influence directe sur la fertilité des sols sur divers aspects environnementaux tels que la qualité de l'air.

#### Axe stratégique 2 : contrôler la fertilité du sol dans les systèmes agricoles

Cet axe implique la détermination des teneurs en carbone et azote des sols, en lien notamment avec l'évaluation des stocks de carbone et la fertilité du sol. Il consiste entre autre à déduire l'effet des gestions des terres sur la capacité de stockage de carbone et d'azote.

**Tableau 11: Cadre logique**

<b>Axe stratégique 1 : favoriser et conserver les stocks de nutriments des sols</b>				
RESULTATS ATTENDUS	ACTIVITES	SOUS-ACTIVITES	RESPONSABLE	IOV
Les stocks de carbone et d'azote ont augmenté	Pratiquer des gestions appropriées pour augmenter les stocks de nutriments des sols	Recycler les biomasses agricoles	Population locale	Volume de biomasse recyclée
		Gérer les terres cultivées	Population locale	Superficie de terrain de culture gérée
		Lutter contre l'érosion	Population locale	Taux d'érosion par an
<b>Axe stratégique 2 : contrôler la fertilité du sol dans les systèmes agricoles</b>				
RESULTATS ATTENDUS	ACTIVITES	SOUS-ACTIVITES	RESPONSABLE	IOV
Les stocks de carbone et d'azote des sols agricoles sont quantifiés	Développer des outils et de méthodes pour faciliter le contrôle de la dynamique des nutriments des sols	Utiliser des modèles de prédiction robustes	Techniciens agricoles	Teneurs en carbone et azote prédites
		Cartographier les stocks de carbone et d'azote des sols	Techniciens agricoles	Carte de stock
		Etudier l'importance des modes de gestion des terres	Techniciens agricoles	Plan de gestion des terres

---

**CONCLUSION**

---

La nécessité de développer la production agricole par l'amélioration de la fertilité des sols et l'amélioration de la séquestration de carbone face au changement climatique sont indéniables. La quantification des nutriments des sols en constitue un point de repère indispensable pour le projet BIOVA afin de juger l'évolution future de la capacité de stockage du sol en carbone et azote des sols agricoles après recyclage des biomasses agricoles. Cette étude a pour objet de déterminer les teneurs en azote et carbone du sol des zones de Changalane et Chobela par la spectrométrie moyen et proche infrarouge lesquelles offrent des alternatives intéressantes. Cinq échantillons des horizons 0-10cm, 10-20cm, 20-30cm, 40-50cm et 60-70cm ont été prélevés par point de prélèvement, ce qui au total a fourni 462 échantillons pour Changalane et 476 échantillons pour Chobela.

L'utilisation de la spectrométrie moyenne et proche infrarouge dans la présente étude a visé d'établir des modèles performants et robustes de prédiction du carbone organique et azote des sols applicables aux différents types de sols rencontrés à Changalane et Chobela. Deux types de modèles ont été élaborés, modèle « global » pour prédire l'ensemble des échantillons des deux sites simultanément et modèle « spécifique » pour prédire les échantillons selon le site de prélèvement.

L'analyse des échantillons issus de la profondeur 0 à 10 cm du sol par des méthodes conventionnelles en laboratoire a permis de déduire qu'il existe une grande variation des gammes de teneurs en carbone et azote pour chaque type de sol. Le ferric lixisol de Changalane est le plus riche en nutriments avec une moyenne de 3,84 g/kg d'azote et 53,32 g/kg de carbone. L'eutric cambisol de Chobela est le plus pauvre en carbone et azote avec une moyenne de teneur respectivement 7,623 g/kg et 0,60 g/kg. Les teneurs en carbone et azote obtenues par analyses conventionnelles ont permis de déduire les stocks sur l'horizon 0 à 10 cm du sol. La cartographie des stocks par site de prélèvement des échantillons affiche une variation accentuée au niveau de Chobela où les échantillons appartiennent à un seul type de sol, notamment l'eutric cambisol. Cette variation de stock est influencée par le flux de la matière organique.

Les résultats d'ACP ont montré que le regroupement des spectres sur les axes factoriels est plus net avec l'augmentation de la taille de population. L'ensemble des échantillons du site global se projette sur les axes en deux groupes majeurs selon le site de prélèvement, alors que les ACP par site spécifique montrent une grande dispersion autour des axes factoriels.

L'évaluation des performances des modèles de prédiction calibrés en moyen infrarouge et proche infrarouge a permis d'identifier le domaine spectral opportun pour la prédiction des teneurs en carbone et en azote du sol. La qualité de prédiction du carbone du sol est plus performante en moyen infrarouge pour les modèles spécifiques et globaux. Pour la variable azote, ceux calibrés en proche infrarouge sont plus performants parmi les modèles spécifiques. D'autre part les résultats de prédiction permettent aussi de souligner que la qualité des modèles est en étroite relation avec la largeur de variation des gammes de teneur en carbone et azote des échantillons ainsi que la représentativité du

set de calibration. C' est pourquoi, parmi tous les modèles élaborés, les modèles globaux sont les plus performants.

Les modèles globaux réalisés sur l'ensemble des échantillons sont donc recommandés pour prédire le carbone et l'azote de Changalane et de Chobela. Ces modèles ont été choisis étant donné leur  $R^2$  et RPD assez élevés, et les erreurs de prédictions minimales. Par contre des améliorations sont encore envisageables par l'affinement de la procédure de prédiction et par test d'une autre méthode de régression telle que le MLR, le PCR,..

Cette étude fait partie d'un sujet plus large concernant la caractérisation des sols. Des perspectives de valorisation des résultats sont envisageables tels que l'analyse qualitative des spectres et le couplage des teneurs prédites avec des images de télédétection pour cartographier à différentes échelles les propriétés du sol.

Bref, la présente étude a permis d'une part d'évaluer les teneurs en carbone et azote des sols de Changalane et Chobela et d'autre part, a permis d'obtenir des modèles pour servir à la prédiction de nouveaux échantillons pour compléter les bases de données de Mozambique. Egalement, l'étude a permis de confirmer que la prédiction dans le moyen infrarouge est plus intéressante que dans le proche infrarouge. Au final, l'étude amène à dire que la comparaison des résultats des modèles prédictifs avec ceux des autres auteurs s'avère difficile du fait que l'échelle de collecte des échantillons et les prétraitements ne sont pas toutes normalisées ni comparables à moins qu'on parle d'une similarité de lieu de prélèvement des échantillons et d'une similarité d'approche méthodologique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Aichi Hamouda (2009)**, *Caractérisation des propriétés du sol par télédétection rapprochée et spatiale en milieux tempéré et aride*. Thèse en co-tutelle INAT/AGROCAMPUS-OUEST. 213p.
2. **Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. (2002)**, « Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France » *Rapport d'expertise INRA*, 320p.
3. **Arrouays D., Feller C., Jolivet C., Saby N., Andreux F., Bernoux M., Cerri C.(2003)**,« Estimation de stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps ». 10p. *Étude et Gestion des Sols*, Volume **10, 4, 2003** - pages 347 à 355.
4. **Barthès B. G., Brunet D., Ferrer H. , Chotte, J. L., Feller, C.- (2006)**,« Determination of total carbon and nitrogen content in a range of tropical soils using near infrared spectroscopy: influence of replication and sample grinding and drying». *Journal of Near Infrared Spectroscopy*,**14**: pp 341-348
5. **Bellon-Maurel V., McBratney A.(2011)**,“Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils” - *Critical review and research perspectives, Soil Biology & Biochemistry*, **43**: 1398-1410.
6. **Bernoux M., Chenu C., Blanchart E., Eglin T., Bispo A., Bardy M., King D.(2011)**, Le programme GESSOL 2 : « Impact des pratiques agricoles sur les matières organiques et les fonctions des sols ». *Etude et Gestion des Sols*, **18, 3** : 137-145.
7. **Bertrand D (2002)**, « La spectroscopie proche infrarouge et ses applications dans les industries de l'alimentation animale. *INRA Prod. Anim.* **15** : 209-219.
8. **Bimont P. (2014)**, “The use of Near-infrared Spectrometry (NIRS) to predict the soil fertility in South Africa”. *Univestity of Pretoria. MSc Dissertation*. Pg. 113.
9. **Blanchard Eric et Bernoux Martial(2005)**, « Détermination des stocks de carbone des sols des petites Antilles (Martinique, Guadeloupe) ». 104p
10. **Blanchart E., N. Marilleau, J-L. Chotte, A. Drogoul, E. Perrier et Ch. Cambier(2009)**,“SWORM: an agent based model to simulate the effect of earthworms on soil structure”. *European Journal of Soil Science*, **60(1)**:13-21.
11. **Brown DJ, Brickel meyer RS, et Miller PR (2005)**,“Validation requirements for diffuse reflectance soil characterization models with a case study of VNIR soil C predictions in Montana”.*Geoderma*,**129**: 251-267.
- 12.**Brown D.J., Sphererd, K.D. Walsh, M.G., Dewayne Mays, M., Reinsh, T.G(2006)**,“Global soil characterisation with VNIR diffuses reflectance spectroscopy”.*Geoderma*, **123**:273- 290.
- 13.**Camille Truch (2010)**,« Caractérisaton et quantification des minéreaux argileux dans les sols expansifs par spéctrométrie infra aux échelles laboratoires et du terrain ». *Université de Toulouse* : 230pp.

14. **Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2006)**, *Méthode d'analyse : « Détermination du carbone et du soufre par combustion et dosage par spectrophotométrie infrarouge »*. MA. 310 – CS 1.0. Révision 2013.
15. **Cécillon L., Cassagne N., Czarnes S., Gros R., Brun J. J. (2008)**, “Variable selection in near infrared spectra for the biological characterization of soil and earthworm casts”. *Soil Biology & Biochemistry*, **2008. 40, 7**: 1975-1979.
16. **Chang C.W. Laird D.A., Mausbach M.J. et Hurburgh C.R (2001)**, “Near-infrared reflectance spectroscopy. Principal component regression analyses of soil properties”. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **65**, 480 - 490.
17. **Chong I. et Jun C. (2005)**, “Performance of some variable selection methods when multicollinearity is present”. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **75**: 103-112.
18. **Ciais P., Gervois S., Vuichard N., Piao S.L., Viovy N.(2011)**, “Effects of land use change and management on the European cropland carbon balance”. *Global Change Biology*, **17**: pp. 320-338.
19. **Clairotte Michaël et al(2014)**, *Caractérisation de la concentration en carbone organique du sol à l'échelle de la France par spectrométrie proche et moyen infrarouge*.
20. **CPCS.(1997)**, *Classification des sols*; Travaux CPCS, 1963– 1967, INA , Grignon.
21. **CSP (2015)**, country strategy paper, 37p.
22. **Demeke, M., G. Pangrazio, et M. Maetz (2009)**, Country Responses to the Food Security Crisis: *Nature and Preliminary Implications of the Policies Pursued*, FAO Initiative on Soaring Food Prices.
23. **Dridi I. et Gallali T.(2006)**, « Distribution de l'azote et caractérisation des sols de la Tunisie du Nord ». *Geo-Eco-Trop*, 2006, **30.2**: 87-96.
24. **Elzein et Balesdent (1995)**, *Gestion du patrimoine organique des sols viticoles*. ENTAV-ITV.
25. **Encarta(2009)**. Dictionnaire encyclopédique numérique.
26. **Eswaran, H., R. Lal, et P. Reich (2001)**, “Land degradation: an overview”. *Responses to Land degradation*: 20-35.
27. **FAO(1988)**, Légende révisée. « Carte Mondiale des sols ». *Rapport sur les ressources en sols du monde N° 60, FAO/UNESCO/ISRIC* 121p.
28. **FAO(2003)**, *Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique*
29. **Feller C, Bernoux M.(2008)**, “Historical advances in the study of global terrestrial soil organic carbon sequestration”. *Waste Management*, **28**: 734-740
30. **Gobat J.M., Argano M. et Matthey W. (2010)**, « *Sol vivant : base de pédologie, biologie des sols* », 3ème Edition. Lausanne : Presse polytechnique et universitaire romande.
31. **Gras J. P., Barthes B.G., Mahaut B., et Trupin. S(2014)**, “Best practices for obtaining and processing field visible and near infrared (VNIR) spectra of top soils”. *Geoderma*, **214-215**, 126-134.
32. **Guo L.B. et Gifford M. (2002)**, «Soil carbon stocks and land use: a meta analysis». *Global Change Biology*, **8**: 345-360.

33. **H. Ben Hassine, T. Aloui, T. Gallali, T. Bouzid, S. EL Amri et R. Ben Hassen (2008)**, « Evaluation quantitative et rôles de la matière organique dans les sols cultivés en zones subhumides et semi-arides méditerranéennes de la Tunisie. » *Agrosolutions*, Vol **19 n°2** : 14p
34. **Henault C. (2009)**, *Le rôle du sol dans le stockage de carbone et la régulation du climat*. UMR Microbiologie du Sol et de l'Environnement. INRA Dijon.
35. **Hurley T.M. (2010)**, *A Review of Agricultural Production Risk in the Developing World*. St. Paul, MN: University of Minnesota, HarvestChoice.
33. **Hutchinson J.J., Campbel C.A., Desjardins R.L. (2007)**, "Some perspectives on carbon sequestration in agriculture". *Agricultural and Forest Meteorology*, **142**: pp. 288-302.
34. **IPCC (2007)**, *Fourth Assessment Report*. Working Group III 45p.
35. **Janik LJ, Skjemstad JO (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. doi: 10.1071/SR9950637
36. **Janik LJ, Skjemstad JO, Shepherd KD, Spouncer LR (2007)**, "The prediction of soil carbon fractions using mid-infrared-partial least square analysis". *Australian Journal of Soil Research*, **45**: 73-81.
37. **J. –P. F. Pallo et al. (2009)**, « Statut de la matière organique des cambisols et des lixisols sous formations naturelles de longue durée en zone Nord-Soudanienne au Burkina Faso ». 215p.
38. **Kone B., Ettien J. B., Amadji G. et Diatta S. (2008)**, « Caractérisation de la tolérance de Nerica à la sécheresse de mi-saison en riziculture pluviale ». *African Crop Science Journal*, **8(2)** : 133-145.
39. **McBratney A.B., Minasny B., Viscarra Rossel R. (2006)**, "Spectral soil analysis and inference systems: A powerful combination for solving the soil data crisis". *Geoderma*, **136(1-2)**: 272-278.
40. **Minasny B., McBratney A. B., Pichon L., Wei S., Short M. G. (2009)**, "Evaluating near infrared spectroscopy for field prediction of soil properties" *Australian Journal of Soil Research*, **47(7)**: 664-673.
41. **Morra MJ, Hall MH et Freeborn LL (1991)**, "Carbon and Nitrogen Analysis of Soil Fractions Using Near-Infrared Reflectance Spectroscopy" *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **55**: 288-291.
42. **Pirie A., Singht B., 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.
43. **Rakotonarivo O. S. (2009)**, *Etude de l'effet du modelé et de la position topographique sur les stocks de carbone de la biomasse végétale et du sol des taillis d'Eucalyptus robusta des hautes terres centrales Malgaches. Cas de Sambaina-Manjakandriana*. Mémoire de fin d'études. ESSA. Département des Eaux et Forêts. Université d'Antananarivo. 70p.

44. **Rakotovao Harisoa Narindra (2013)**, *Utilisation de la spectrométrie dans le moyen infrarouge (MIRS) pour la classification des principaux groupes de sol et établissement de modèles de prédiction du carbone organique du sol, région Itasy-Madagascar*. Mémoire DEA. ESSA. Option Forêt - Développement - Environnement. 65p.
45. **Randrianandrasana Lalaina (2013)**, *Evaluation des stocks de carbone et d'azote des sols dans la zone de production laitière de Vakinankaratra*. Mémoire de DEA. ESSA. Département des Eaux et Forêts. Université d'Antananarivo. 96p.
46. **Razafimahatratra Hery. M. (2006)**, *Evaluation des stocks de carbone du sol sous différents modes d'usage des terres dans le corridor forestier de VOHIMANA. District de Moramanga*. Mémoire de DEA. ESSA. Département des Eaux et Forêts. Université d'Antananarivo. 93p.
47. **Razafimahatratra H. (2011)**, *Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen Infrarouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat*. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques.
48. **Razafimbelo Tantely .M.(2005)**, *Stockage et protection du carbone dans un sol sous système en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres Malgaches*. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. Thèse de doctorat. 156 p.
49. **Razakamanarivo R.H.(2008)**, *Etude des potentialités de stockage du carbone dans la biomasse et dans le sol des plantations d'Eucalyptus des Hautes Terres Centrales Malgaches (cas de Sambaina-Manjakandriana) ; spatialisation et étude du devenir du carbone stocké*. Thèse : Bilan de la deuxième année, LRI-SRA - ESSA Agro-Forêts Antananarivo - UR 179 IRD-SeqBio Antananarivo et Montpellier: 75.
50. **Robert M.(2002)**, *La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion de terres. Rapport sur les ressources en sols du monde*. FAO. Institut National de Recherche Agronomique. Paris. France.
51. **Russell C.A. et al. (2002)**, "The potential of NIR spectroscopy to predict nitrogen mineralization in rice soils". *Plant Soil*, **247**: 243-252.
52. **Sanchez P.A. (2002)**, "Soil fertility and hunger in Africa". *Science*, **295**: 2019-2020.
53. **Scheiner J.D. (2005)**, *Spéciation du Carbone, de l'Azote et du Phosphore de différentes boues de stations d'épuration au cours de leurs incubations contrôlées dans deux types de sol*. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, 210p.
54. **Shepherd K.D., Walsh, M.G (2002)**, "Development of reflectance spectral libraries for characterisation of soil properties." *Soil sciences society of America Journal*, **66**: 988 - 998.
55. **Sundberg R (1999)**, "Multivariate calibration, direct and indirect regression methodology". *Board of the Scandinavian Journal of Statistics* **26**: 162-207.
56. **Tenenhaus M (1998)**, 'La régression PLS théorie et pratique'. *Edition technip, Paris*, 251 pp.



57. **Tobiasova Erika, Debska Bozena, Banach-szott Magdalena (2013)**, “Stability of organic mater of Haplic Chernozem and Haplic Luvisol of different ecosystems”. *Journal of Central European Agriculture*, **14(4)**: 1558-1566.
58. **Uaiene, R.N., Arndt, C., et Masters, W.A. (2009)**, *Determinants of Agricultural Technology Adoption in Mozambique*. Discussion papers No. 67E January 2009 National Directorate of Studies and Policy Analysis Ministry of Planning and Development Republic of Mozambique.
59. **Van Groenigen G., Mutters C., Horwath W. et van Kessel C. (2003)**, “NIR & DRIFT-MIR spectrometry of soils for predicting soil and crop parameters in a flooded field”. *Plant Soil*, **250**:155-165.
60. **Viscarra Rossel R.A. et Behrens T.(2010)**, “Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra”. *Geoderma*, **158 (1-2)**: 46-54.
61. **Viscarra Rossel R.A. et Mc Bratney A.B. (1998)**, “Laboratory evaluation of a proximal sensing technique for simultaneous measurement of soil clay and water content”. *Geoderma*, **85**:19-39.
62. **Viscarra Rossel R. A., JEON, Y.S., ODEH, I. O. A., etMcBRATNEY (2008)**, “Using a legacy soil sample to develop a mid-IR spectral library”. *Australian Journal of Soil Research*, **46**: 1-16.
63. **Viscarra RosselRA, Walvoort DJJ, McBratney AB, Janik LJ and Skjemstad JO.(2006)**, “Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties”. *Geoderma*, **131 (1-2)**: 59-75.

#### WEBOGRAPHIE

64. <http://www.govnet.gov.mz> Pgs 2-40. **MINISTÉRIO DA ADMINISTRAÇÃO ESTATAL, 2005**. Perfil do Distrito de Magude. Edição de 2005. Província de Maputo. Moçambique. Consulté le 13/01/2016
65. <http://www.govnet.gov.mz> Pgs 2-39. **MINISTÉRIO DA ADMINISTRAÇÃO ESTATAL, 2005**. Perfil do Distrito de Namaacha. Edição de 2005. Província de Maputo. Moçambique. Consulté le 13/01/2016
66. **CIRAD, 2013**. SPIR : *une technique d'analyse rapide et peu coûteuse*, <http://pigtrop.cirad.fr/content/pdf/4946> Consulté le 08/08/2016
67. <http://p-case.iata.fi.cnr.it/ap3a/> Les aptitudes agricoles et pastorales des sols dans les pays du CILSS. Consulté le 23/10/2016
68. <http://www.techniques-ingenieur.fr/> Spectroscopie et Spectrométrie Consulté le 29/11/2016



# **ANNEXES**

**ANNEXE .1. Formules des critères d'appréciation du modèle de calibration**

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})(y_i^* - \bar{Y}^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2 \sum_{i=1}^n (y_i^* - \bar{Y}^*)^2}} \right]^2$$

$$Biais = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2}$$

$$REP = \sigma_{y_i^*} / \sigma_{\mathcal{E}_i}$$

Avec

$Y_i$ : valeur mesurée

$y_{i^*}$ : valeur estimée

$Y$ : moyenne des valeurs mesurées

$Y^*$ : moyennes des valeurs prédites

$y_{i^*} \sigma$ : écart-type des valeurs prédites

$\sigma_{\mathcal{E}_i}$ : écart-type des erreurs de prédiction.

**ANNEXE .2. Protocole d'analyse Walkley & Black du Laboratoire des Radio Isotopes**

**1. OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION**

Estimation de la teneur en carbone d'un échantillon de sol, en l'absence de matériel pour la combustion (tel que l'analyseur CHN, méthode de référence actuelle).

**2. TEXTE DE REFERENCE**

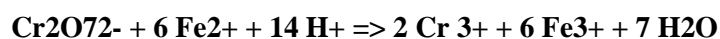
Walkley, A.; Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37:29-38.

### **3. PRINCIPE**

La matière organique est oxydée sans chauffage externe par une solution sulfurique de dichromate de potassium. On considère que la chaleur de dissolution de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (120°C) est suffisante pour oxyder 77 % du carbone (résultats expérimentaux).

L'excès de dichromate est dosé par le sel de Mohr : (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Fe (SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 6 H<sub>2</sub>O

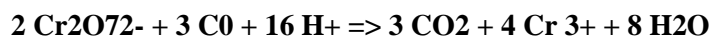
**La réaction de titrage du dichromate par le sel de Mohr peut s'écrire :**



Commentaire:

- une solution normale de sel de Mohr contient 1 mole/l (1mole Fe<sup>2+</sup> libère 1mole e<sup>-</sup>)
- une solution normale de Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup> contient 1/6 mole/l

**La réaction d'oxydation du carbone peut s'écrire :**



Commentaire:

- une mole de Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup> oxyde 1.5 mole de C
- une solution normale de Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup> (M/6) oxyde 1.5/6 = 0.25 mole de C soit 0.25 x 12 = 3 g de C

**donc 5 ml de Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup> N correspond à 3x5/1000x1000 = 15 mg de C**

### **4. MATERIELS**

- hotte aspirante
- titrateur Crison équipé d'une électrode rédox combinée
- bechers de 250 ml
- plaque isolante (plateau en bois)

### **5. REACTIFS**

- Dichromate de potassium, solution N (MK<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> = 294.19 ; solution normale pour rédox = M/6):  
Peser exactement 49.035± 0.0005 g de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> P.A. séché à l'étuve à 105°C. Dissoudre dans 800 ml d'eau distillée. Compléter le volume à 1000 ml dans une fiole jaugée.

- Acide sulfurique, solution 0.5 N environ :

Verser 14 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentré technique (d = 1,84) dans 1 litre d'eau distillée. Utiliser cette solution pour la préparation du sel de Mohr.

- Sel de Mohr [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Fe (SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 6 H<sub>2</sub>O], M=392.1, solution 0.5 N :

Dissoudre 196.1 g de sel de Mohr P.A. dans 1 litre de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.5 N. Déterminer le titre exact du sel de Mohr par le dichromate chaque jour de dosage. Conserver la solution en flacon brun. Cette solution ne se conserve pas plus de 3 jours (si conservation plus longue, dépôts de fer ferreux qu'il faudra nettoyer à l'acide). **PREPARER LE VOLUME MINIMUM NECESSAIRE**

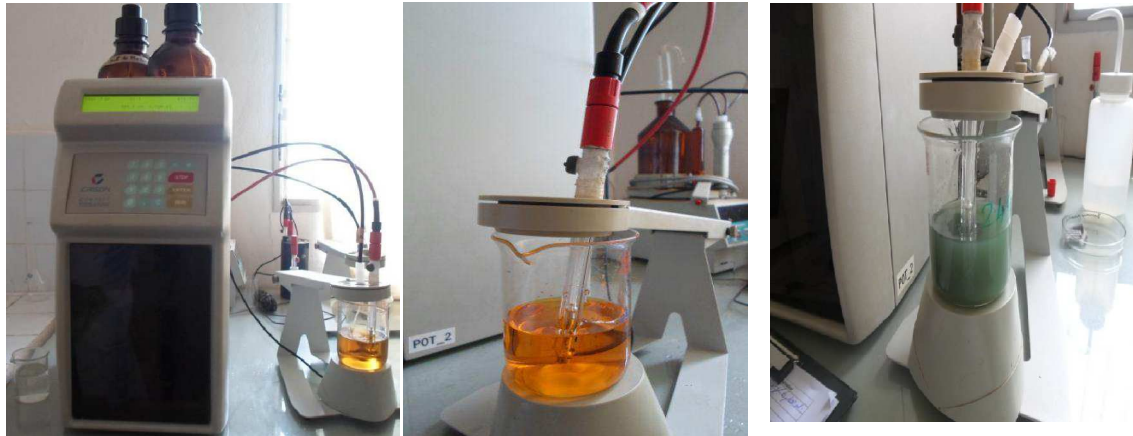
**REMARQUE** : suivant les opportunités d'approvisionnement, on peut remplacer le sel de Mohr par du sulfate de fer ferreux P.A.  $[\text{Fe}(\text{SO}_4)_2, 7 \text{H}_2\text{O}]$ ,  $M=278.0$  ; pour préparer 1 litre de solution 0.5 N, la masse à peser sera alors de 139 g.

## **6. ATTAQUE**

- Dans une fiole cylindroconique de 125 ml (ou un becher de même diamètre à la base), peser un poids P de sol broyé à 200  $\mu\text{m}$  séché à l'air suivant la procédure [*MO-001 Traitement échantillons*]. La prise P doit contenir 5 à 12.5 mg de carbone. Elle est déterminée en fonction du taux d'azote du sol pour un rapport C/N supposé égal à 10. (si on ne connaît pas la teneur en azote: faire un premier essai sur une prise de 0.5 g de terre) (compost: 0.05 g ; engrais: 0.025 g ; sol riche: 0.25 g ; sol pauvre: 0.5 g)
- Sous hotte, ajouter 5 ml de dichromate N à la pipette automatique 10 ml d'acide sulfurique concentré technique ( $d = 1,84$ ) avec la dispensette.
- Faire 2 témoins (inexpérimentés plutôt 3) sans sol (titrage du sel de Mohr par le dichromate).
- Agiter une minute. Laisser 30 minutes sur une plaque isolante résistante à la chaleur (bois).
- Ajouter environ 100 ml d'eau distillée dans chaque témoin et échantillon (la quantité exacte n'a pas d'influence, mais dosage impossible si le milieu est trop concentré).

## **7. TITRAGE RÉDOX AUTOMATISÉ (TITRATEUR CRISON)**

- Après avoir rempli de sel de Mohr le flacon réactif 2 (gauche), rincer la seringue 3 fois (**Execute Program 5**) **ATTENTION** : à la question " Return reagent into bottle ? ", répondre NO (touche 2)
  - Vérifier que c'est bien l'électrode rédox qui est branchée (anneau de platine), sinon, remplacer l'électrode pH par la rédox en dévissant la tête de l'électrode
  - Vérifier que c'est bien la pointe de burette n°2 qui est positionnée pour le dosage
  - Introduire un petit barreau aimanté dans le becher témoin (les grands barreaux bloquent)
  - Introduire l'électrode rédox et la pointe de burette dans le becher (contrairement à une burette classique, la pointe de burette doit tremper dans la solution pour une bonne sensibilité)
  - Titrer l'excès de dichromate par la solution 0.5 N de sel de Mohr (**Execute Program 3**)
  - Dosage identique pour tous les témoins et échantillons
- Rmq : dans le cas où la prise d'essai de sol est trop forte (tout le dichromate consommé), l'appareil renvoie un message d'erreur "Erreur de tendance" (le dosage vise 850 mV en tendance négative, ce qui est impossible si le potentiel est déjà inférieur à 850 mV)
- Noter le volume **RESULT** de sel de Mohr (ne pas confondre avec le volume final, volume total délivré par la seringue en fin de manip). Si ce volume sort des limites, recommencer le dosage en changeant le poids P de la prise d'essai de sol (voir ci-dessous Calcul des limites et de la prise P' pour le second essai)



*Photo 4: Titration par le sel de Mohr*

## 8. CALCUL

### 1°) Détermination du poids P de la prise d'essai :

Si on connaît la teneur en azote : calculer P à partir de la formule suivante :

$$P = \frac{7.5}{10 N^{o/oo}}$$

7.5 est le poids moyen en mg de carbone dans la prise P.

10 est la valeur moyenne du rapport C/N

N o/oo est la teneur en azote en g pour 1000 g de sol.

- Si on ne connaît pas la teneur en azote: faire un premier essai sur une prise de 0.5 g de terre.

### 2°) Calcul des limites du volume de sel de Mohr :

Soient :  $V_t$  le volume de sel de Mohr nécessaire pour le témoin

$V_s$  le volume de sel de Mohr nécessaire pour l'échantillon

$V_s$  doit être inférieur à (C supérieur à 5 mg), soit  $V_s \text{ maxi} = 0.74 V_t$

$V_s$  doit être supérieur à (C inférieur à 12.5 mg), soit  $V_s \text{ maxi} = 0.36 V_t$

**soit  $V_s$  compris entre 3.6 et 7.4ml pour 5ml de  $K_2Cr_2O_7$  N et Sel de Mohr N/2**

### 3°) Calcul de la prise P' pour le second essai :

Seulement pour le cas où V sort des limites :

Soient C mg de carbone dans la 1ère prise P :  $C \propto (V_t - V_s)^2$

C' mg de carbone dans la prise P' :  $C' \propto 8$  .

Le poids P' de sol pour la seconde prise est donné par la formule approchée :

$$P' = \frac{4P}{V_t - V_s}$$

## 9. EXPRESSION DES RÉSULTATS

5 ml de dichromate correspond à 19.5 mg de C (voir base théorique)

Soient P la prise d'essai en grammes

V<sub>t</sub> le volume de sel de Mohr 0.5 N en ml pour le témoin

V<sub>s</sub> le volume de sel de Mohr 0.5 N en ml pour l'échantillon

C<sup>0/00</sup> où le poids de carbone en g pour 1000g de terre .

$$C^{0/00} = (V_t - V_s) \times \frac{19.5}{V_t} \times \frac{1}{P}$$

On obtient la teneur en matière organique M.O. o/oo en multipliant le résultat ci-dessus par 1.724.

$$M.O. ^{0/00} = 1.724 \times C^{0/00}$$

## 10. EXPRESSION DES RÉSULTATS

Si l'humidité résiduelle du sol sec à l'air a été mesurée récemment pour d'autres analyses, utiliser le coefficient de correction existant ; sinon, la déterminer en utilisant le mode opératoire [*Humidité 105°C*].

### ANNEXE .3. Protocole de dosage de l' azote

#### 1. OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

Attaque de l' azote des sols, dosage par colorimétrie automatique du NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

#### 2. TEXTE DE REFERENCE

Méthode Laboratoire des Moyens Analytiques IRD-Dakar 2001

#### 3. PRINCIPE

Minéralisation Kjeldahl modifiée, dosage NH<sub>4</sub><sup>+</sup> par la réaction de Berthelot

#### 4. MATERIELS

- Bloc minéralisation (fabrication artisanale)
- Tubes pyrex diamètre 15 mm, hauteur 160 mm (fabrication artisanale)

#### 5. REACTIFS

- Solution mère 5000 ppm de N ( NH<sub>4</sub>Cl séché 105°C ; 1,9095g/100ml)
- Acide sulfurique concentré technique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) **PORTER LUNETTES**
- Catalyseur/ K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> P.A : 45 g<sup>+</sup> Se; 2,25g broyés intimement au mortier

**PORTER UN MASQUE POUR LE BROYAGE ET LES PESES (Sélénium toxique)**

## 6. ATTAQUE

- Peser exactement environ 0,1g de sol broyé à 0,2 mm dans une série de tubes pyrex de diamètre 15 mm, haut 160 mm
- Ajouter environ 0,2g de catalyseur pesé par différence : pot de catalyseur posé sur la balance au mg (si possible, trouver une mesurette pour ces 0,2g)
- Préparer 6 tubes pour la gamme, contenant chacun 0,2 g de catalyseur ; dans ces tubes numérotés S1, S2, S3, S4, S5, S6, ajouter respectivement la solution N 5000 ppm 0, 100, 200, 300, 400, 500  $\mu$ l
- Ajouter avec la dispensette 1 ml de  $H_2SO_4$  concentré et homogénéiser au vortex
- Placer les tubes + mini-entonnoirs dans le bloc chauffant réglé à 200°C, puis monter la température progressivement en surveillant l'ébullition jusqu'à 338°C (température de consigne) ; laisser bouillir 1h à partir du moment où l'affichage a atteint 325°C
- Laisser refroidir dans le bloc chauffant, puis placer les tubes sur un portoir plastique
- Rincer intérieur et extérieur de l'entonnoir ( **doucement : eau +  $H_2SO_4$  = énergie**), compléter à 50ml, boucher avec du parafilm et bien homogénéiser par retournement (  $\Leftrightarrow$  milieu final  $H_2SO_4$  2%)
- Dans une série de tubes, conserver environ 10 ml de chaque échantillon ou étalon et jeter le reste ; laisser décanter le solide dans les tubes pendant une nuit
- Pour le dosage colorimétrique, rediluer au  $1/10^{\text{ème}}$  en tube puis vortexer :
  - 🚰 Echantillons : 500  $\mu$ l éch+4500 $\mu$ l eau ( ou 700+6300 $\mu$ l)
  - 🚰 Etalons S1, S4 : 10 ml dans une fiole de 100ml
  - 🚰 Etalons S2, S3, S5, S6: 5 ml dans une fiole de 50ml  
(  $\Leftrightarrow$  milieu final  $H_2SO_4$  2%)

## 7. DOSAGE AUTOANALYSEUR SKALAR

- **Réactifs : cf protocole Skalar pour dosage de  $NH_4^+$**

La seule modification par rapport à la méthode  $NH_4^+$  est le gamme à 5 ppm de N ( soit 6,43 ppm de  $NH_4^+$ ) au lieu de la gamme à 5 ppm de  $NH_4$ . Dans le programme, entrez les valeurs de N.

- **Quantités de réactifs nécessaires (ne pas compter trop juste)**

- 🚰 Pour 100 échantillons à doser, compter 140 godets ( avec étalons, blancs, drifts)
- 🚰 Au rythme de 1 godet/mn, il faut compter 30 mn ( stabilisation) + 140mn ( dosage) =170 mn
- 🚰 Débit des réactifs :
  - A (solution tampon) : 0,80 ml/mn = 50ml/h ( 150 ml/100 échantillons)
  - B (salicylate) et D ( diCl-isoCN) : 0.32 ml/mn= 20ml/h (60 ml/100 échantillons)
  - C( nitroprussiate) : 0,16 ml/mn = 10 ml/h ( 30 ml/100 échantillons)

✚ Vérifier avant de lancer l'analyse que le stock de réactif est largement suffisant pour le nombre d'échantillons prévu

- Calcul

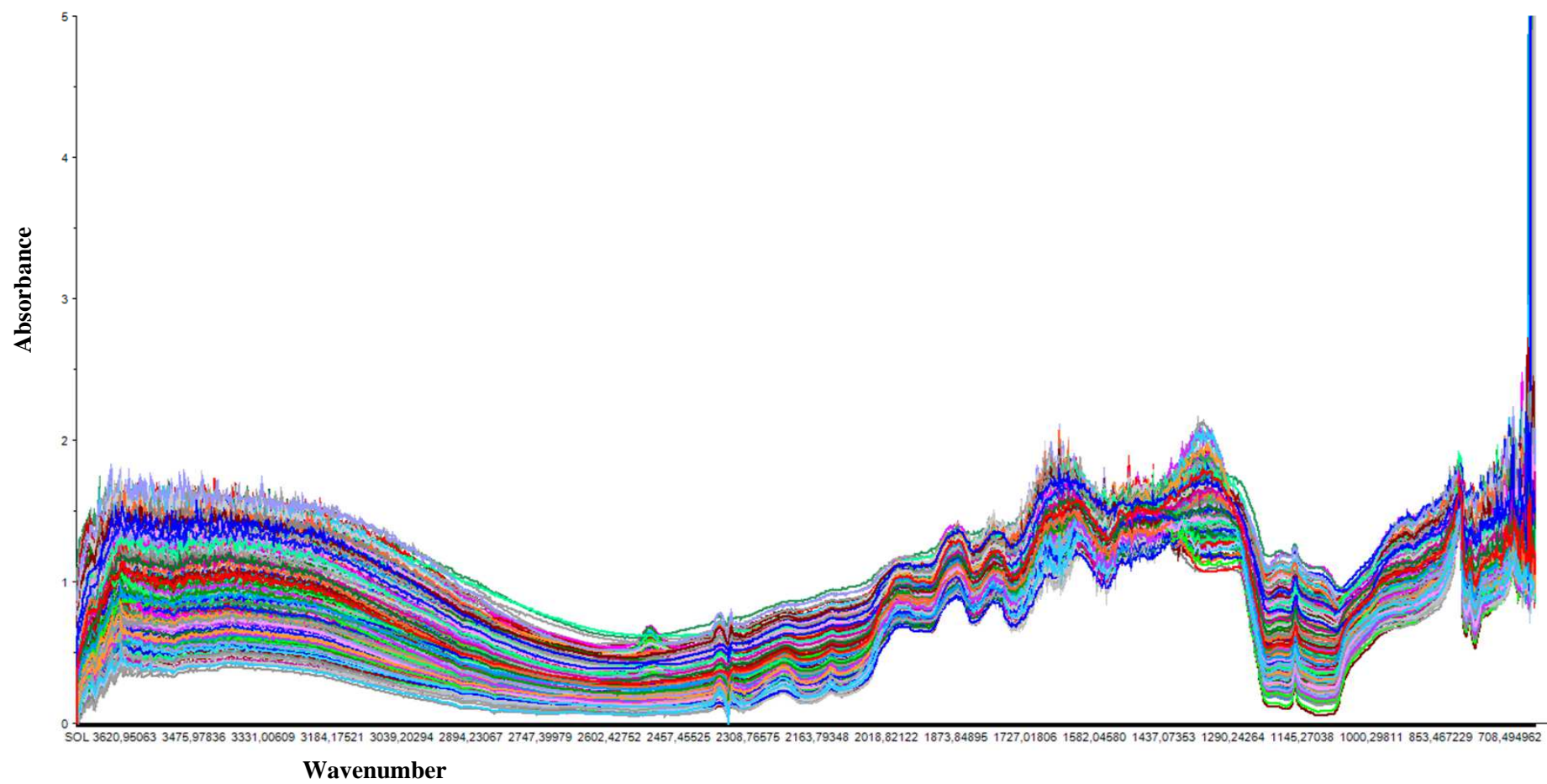
Les quantités d'azote en ppm (mg/l) dans les solutions d'attaque diluées sont directement comparables aux ppm dans les étalons. Il ne reste qu'à corriger par la dilution (\*10), ramener au volume d'extrait (/1000\*50) puis à 1g de sol (/masse de sol en g\*1) pour obtenir des mg/g de sol.

**Rappel : pour un dosage colorimétrique, on n'a jamais le droit d'extrapoler ; la valeur mesurée hors gamme ne peut servir qu'à déterminer la dilution pour refaire le dosage.**

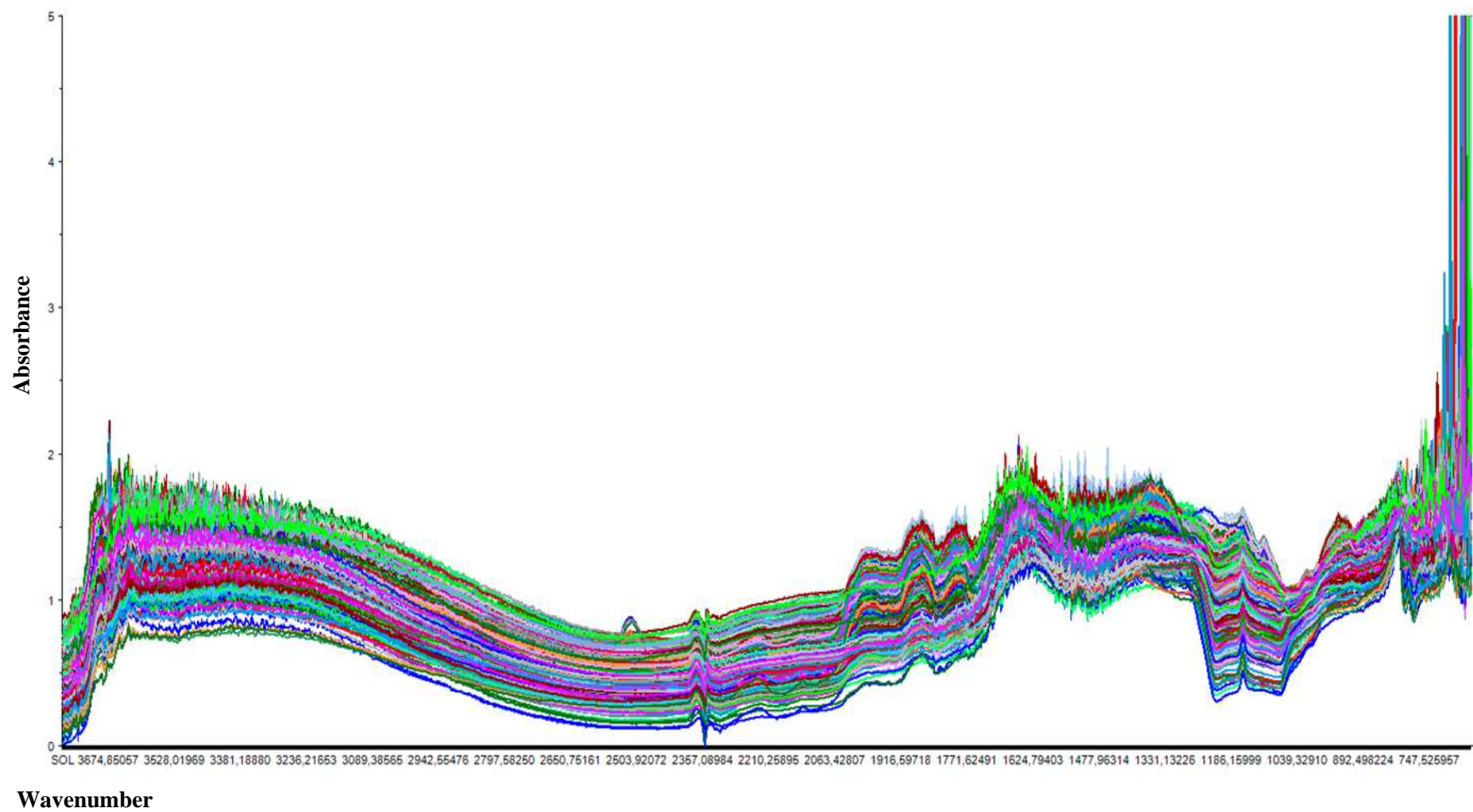


**ANNEXE .4. Visualisation des spectres en moyen infrarouge**

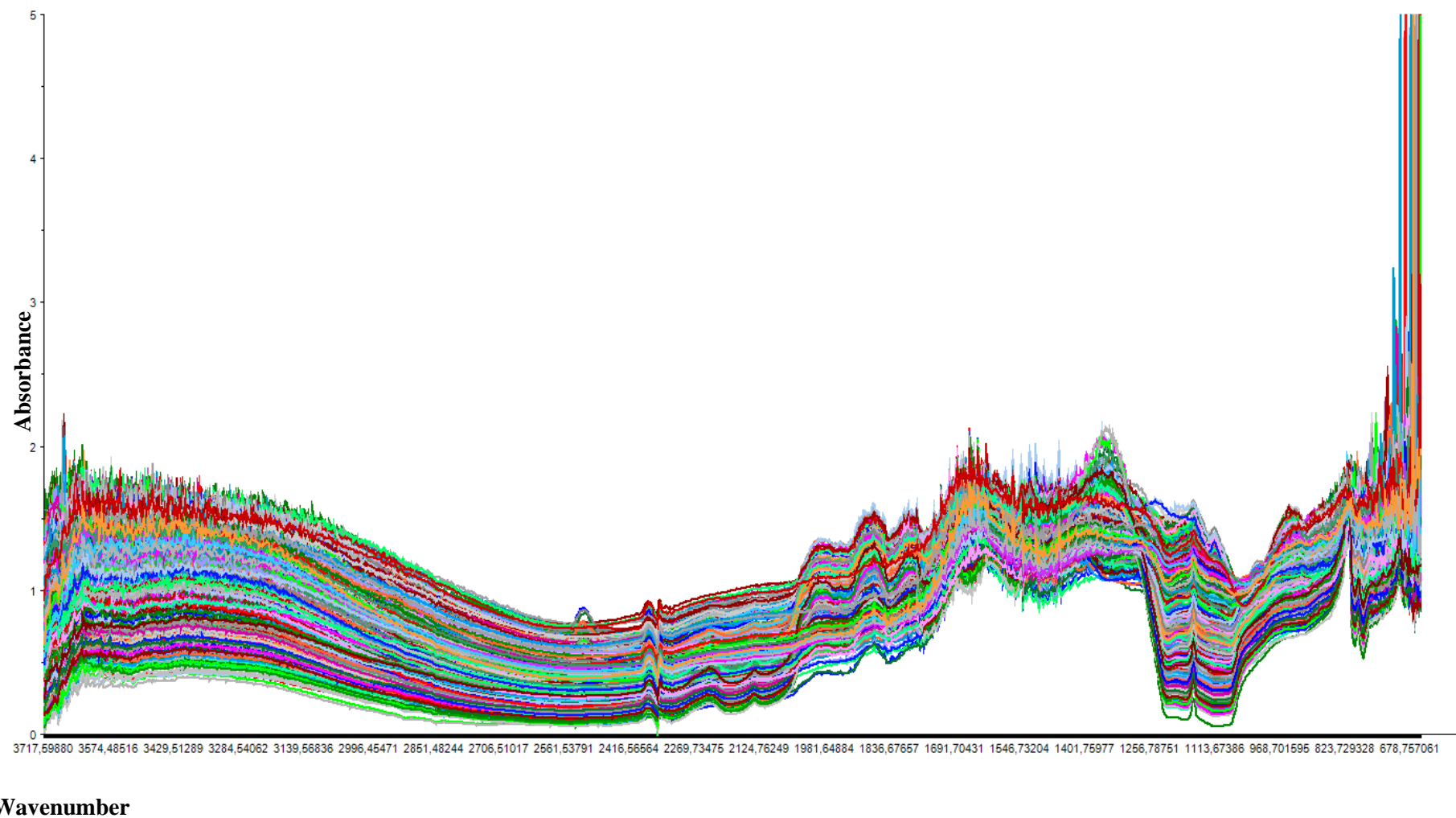
**Spectre de Chobela**



## Spectre de Changelane

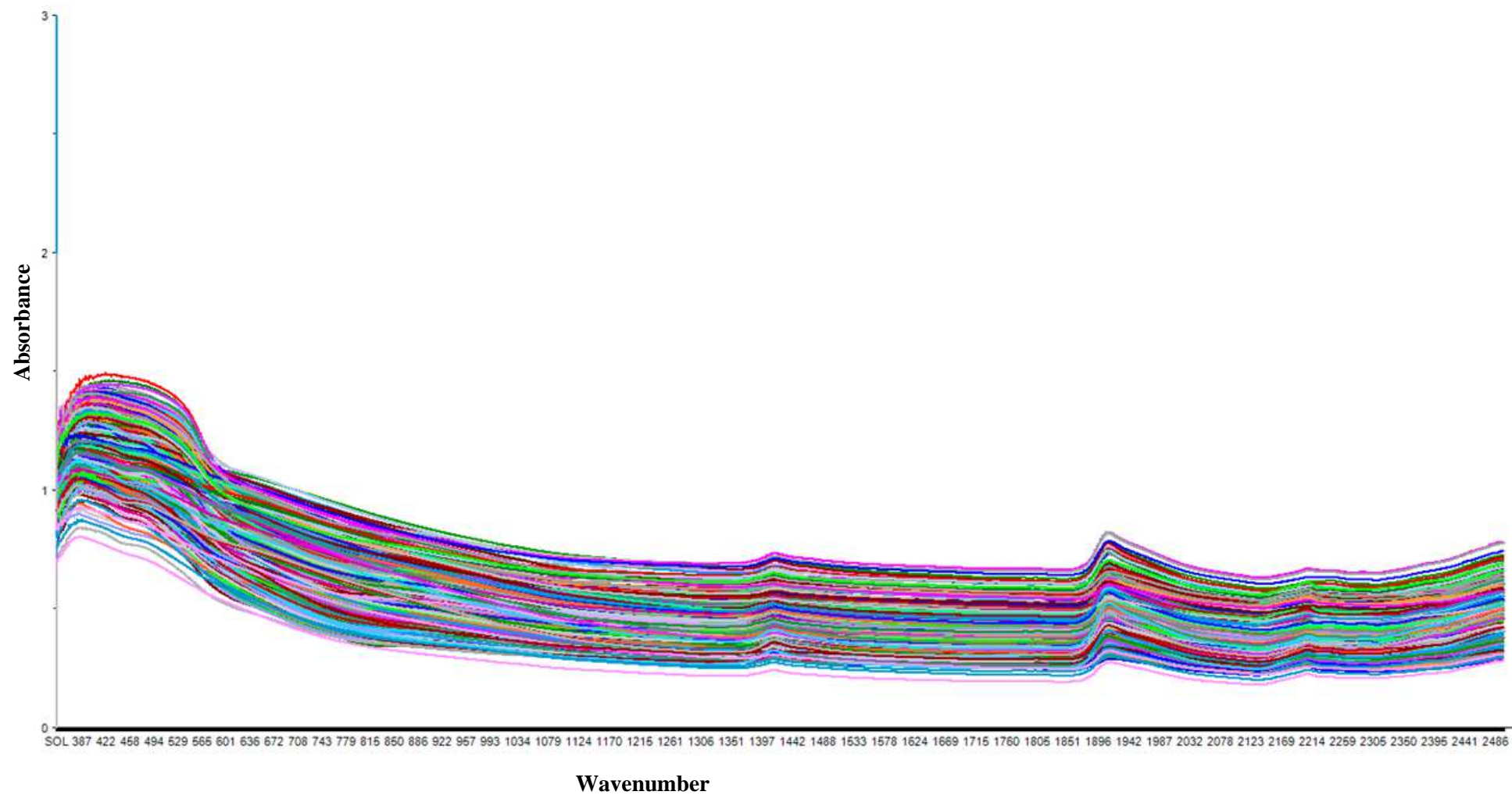


### Spectre de Changelane & Chobela



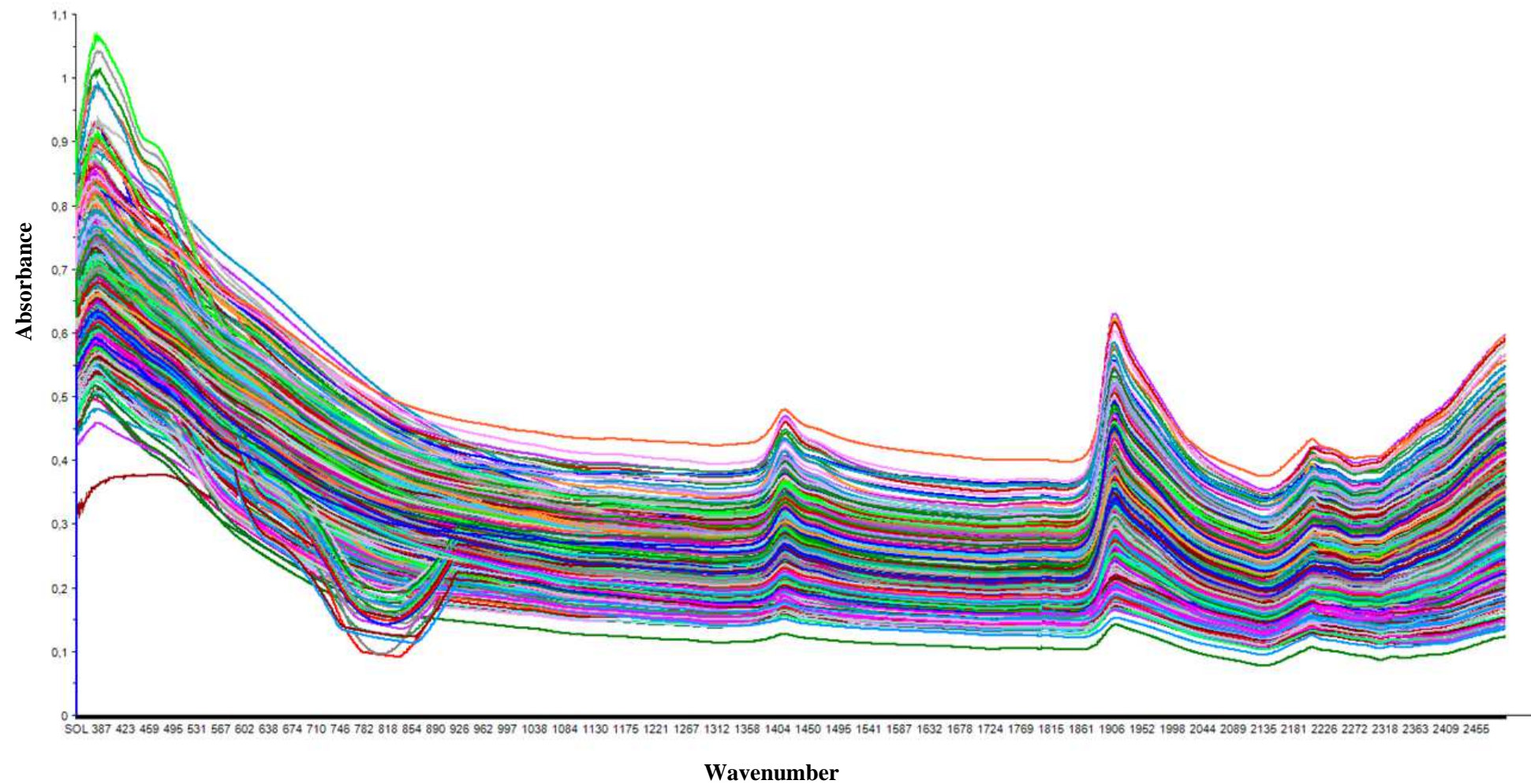
**ANNEXE .5. Visualisation des spectres en proche infrarouge**

**Spectre de Changanane**

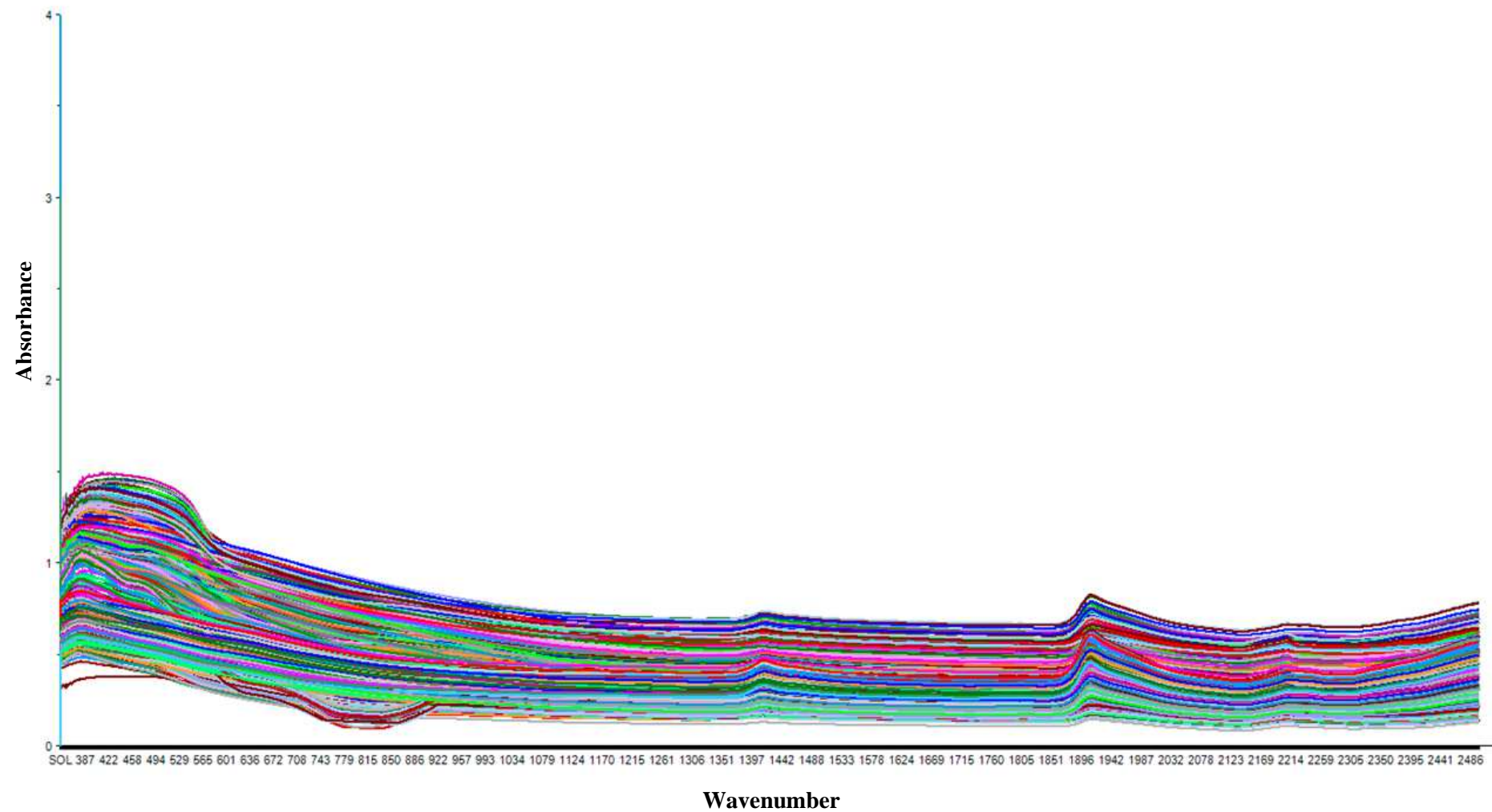


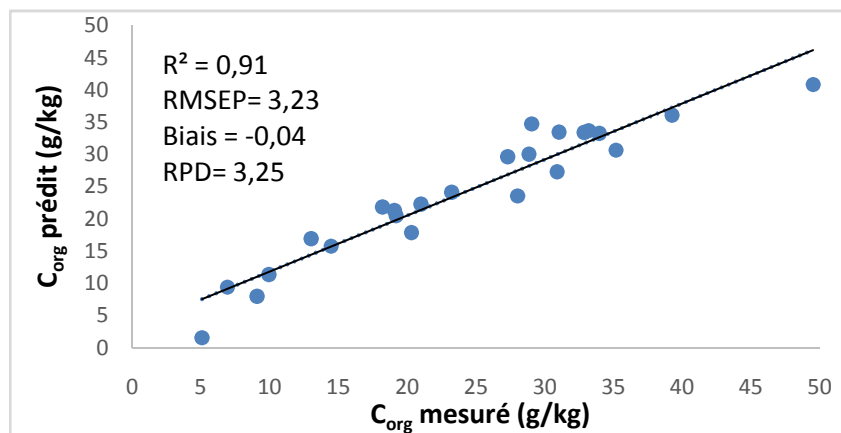
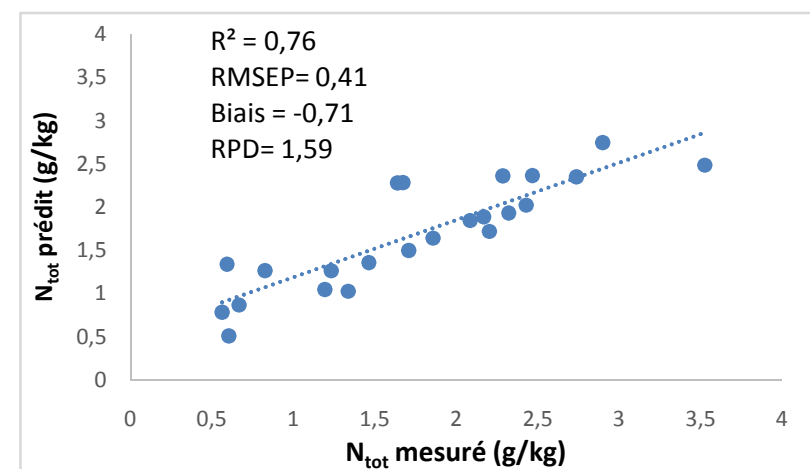
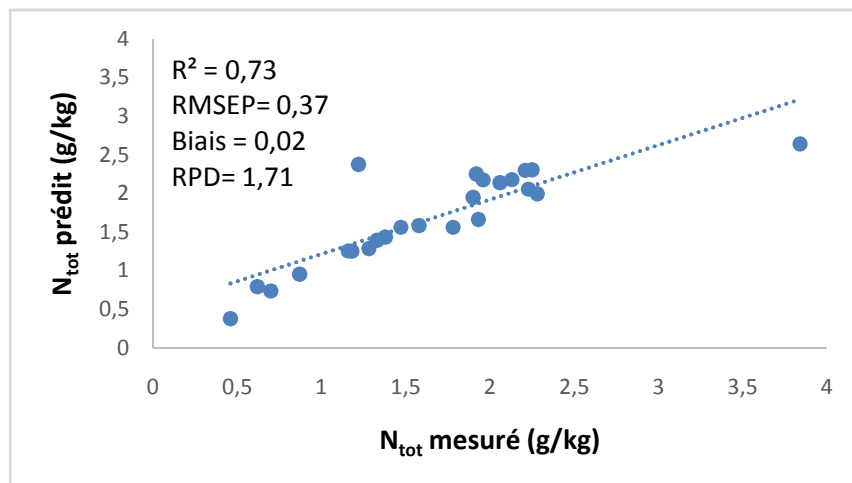
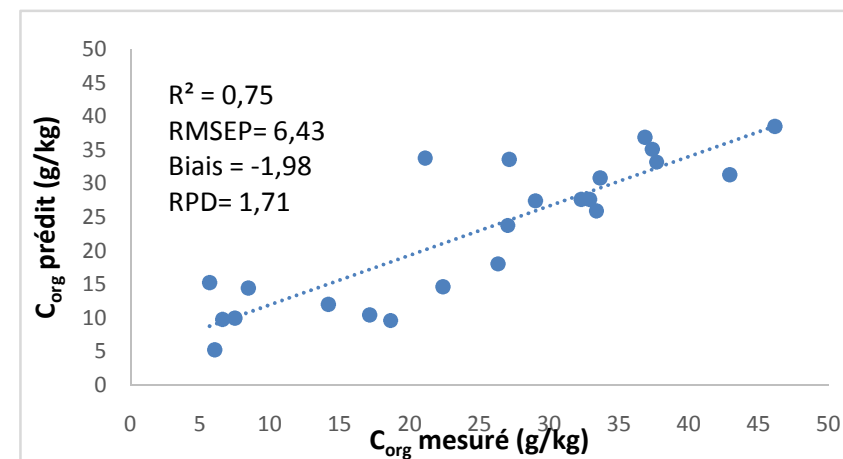


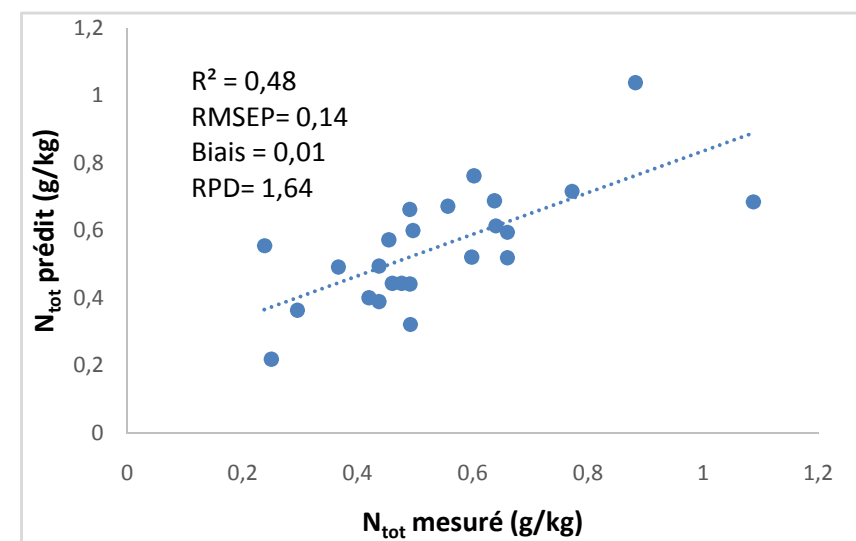
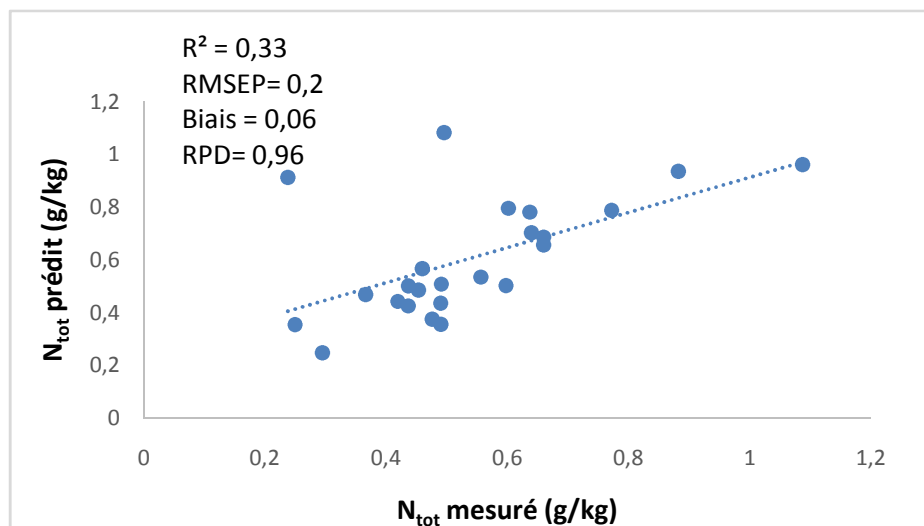
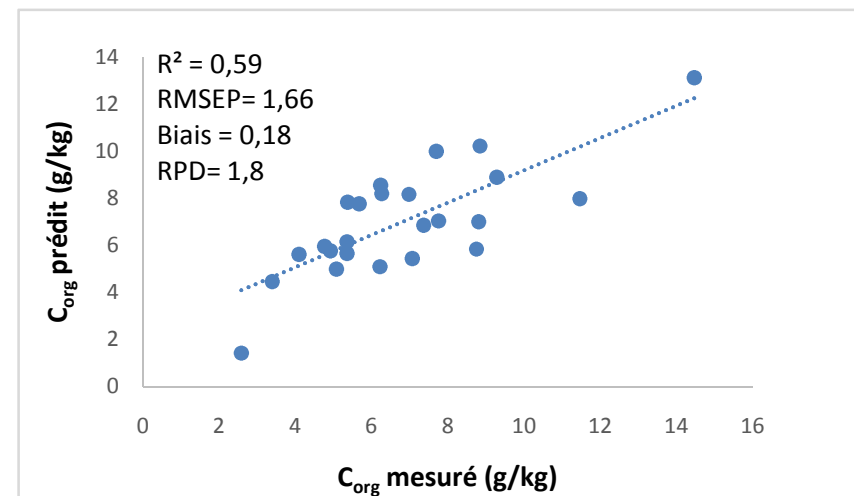
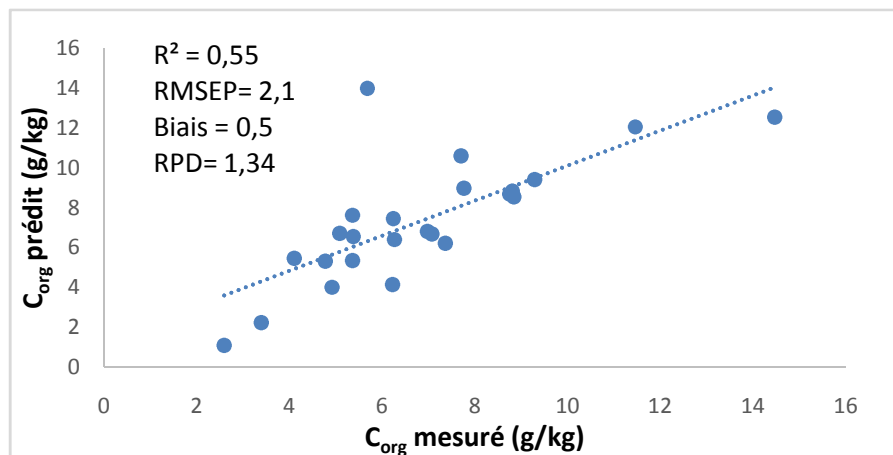
### Spectre de Chobela



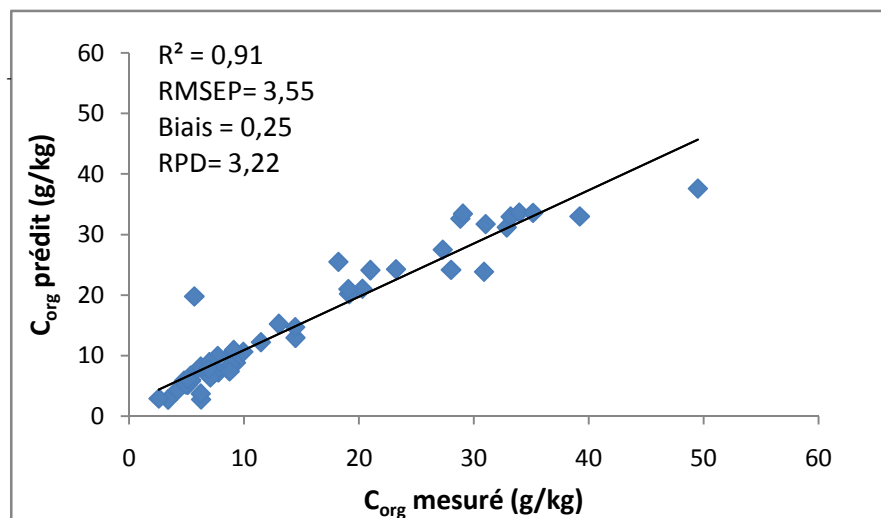
Spectre de Changelane & Chobela



**ANNEXE .6. Teneurs en carbone organique et en azote mesurées vs teneurs prédites pour les échantillons de Changalane****MIR****PIR**

**ANNEXE .7. Teneurs en carbone organique et en azote mesurées vs teneurs prédites pour les échantillons de Chobela****PIR****MIR**



**ANNEXE .8. Teneurs en carbone organique et en azote mesurées vs teneurs prédites pour les échantillons de Changalane et de Chobela****MIR****PIR**