

Table des matières

| | |
|---|------|
| Remerciements | i |
| Table des matières | iii |
| Liste des unités de mesure..... | vii |
| Liste des abréviations | viii |
| Glossaire | ix |
| Liste des figures | xi |
| Liste des tableaux | xiii |
| INTRODUCTION | |
| 1 Problématique | 2 |
| 2 Objectifs..... | 4 |
| 3 Hypothèses de la recherche..... | 4 |
| PREMIERE PARTIE : ETAT DES CONNAISSANCES RELATIF AUX SOLS FERRUGINEUX ET LEUR PROTECTION CONTRE L'EROSION HYDRIQUE | |
| I-1 Caractéristiques générales de la formation des sols à Madagascar | 7 |
| I-1-1 Relief..... | 7 |
| I-1-2 Climat..... | 9 |
| I-1-3 Géologie | 9 |
| I-1-4 Type de sol..... | 12 |
| I-2 Généralités sur la genèse des sols ferrugineux de la région à Boeny | 15 |
| I-2-1 Altération | 16 |
| I-2-2 Constituants des sols ferrugineux | 17 |
| I-3 Erosion hydrique..... | 20 |
| I-3-1 Mécanisme de l'érosion hydrique | 20 |
| I-3-2 Forme d'érosion hydrique dans la région nord-ouest | 21 |
| I-3-3 Conséquences de l'érosion..... | 23 |
| I-4 Fonctionnement des écosystèmes cultivés | 23 |
| I-4-1 Protection des écosystèmes à partir de la couverture végétale | 23 |

| | |
|--|----|
| I-4-2 Mécanisme et mesure de la protection des sols contre l'érosion | 25 |
| I-5 Spatialisation générale de la protection du bassin versant | 26 |
| I-5-1 Bassin versant | 26 |
| I-5-2 Cartographie d'un sol..... | 27 |
| DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES | |
| II-1 Présentation de sites d'étude de Boeny | 29 |
| II-1-1 Climat | 30 |
| II-1-2 Relief | 30 |
| II-1-3 Végétation..... | 30 |
| II-1-4 Géologie..... | 31 |
| II-1-5 Types de sol | 34 |
| II-2-2 Méthode de prélèvement | 36 |
| II-3 Analyses au laboratoire | 37 |
| II-2-1 Détermination du pH du sol..... | 38 |
| II-2-2 Détermination de la granulométrie | 38 |
| II-2-3 Détermination du carbone organique | 39 |
| II-2-4 Détermination de l'azote total | 40 |
| II-2-5 Détermination du P ₂ O ₅ assimilable | 41 |
| II-2-6 Détermination des bases échangeables | 41 |
| II-2-7 Détermination de la CEC ou T | 42 |
| II-4 Traitements des données | 42 |
| II-4-1 Données et paramètres étudiés | 42 |
| II-4-2 Analyses statistiques..... | 43 |
| II-5 Cartographie | 44 |
| II-5-1 Carte des sols et méthodologie d'aptitude..... | 44 |
| II-5-2 Cartographie par SIG..... | 46 |
| TROISIEME PARTIE : RESULTATS | 41 |

| | |
|--|-------|
| III-1 Distributions des points d'échantillonnage et des sols ferrugineux..... | 47 |
| III-1-1 Proportion des points d'échantillonnage dans les formations géologiques..... | 47 |
| III-1-2 Distribution des points d'échantillonnage des sols ferrugineux..... | 48 |
| III-2 Caractéristiques morpho pédologiques et physico-chimiques des sols ferrugineux..... | 49 |
| III-2-1 Caractéristiques morpho pédologiques | 49 |
| III-2-2 Caractéristiques physico-chimiques | 54 |
| III-3 Présentation spatiale des sols ferrugineux et aptitude culturale..... | 60 |
| QUATRIEME PARTIE: DISCUSSIONS | 70 |
| IV-1 Hypothèse 1 : l'ensemble de la formation géologique et relief influent-t-ils à la formation de sol ferrugineux dans la région Boeny? | 70 |
| IV-2 Hypothèse 2 : les caractéristiques morpho pédologique et physico-chimique des sols ferrugineux trouvés dans la région correspondent-t-elles à celle des caractéristiques propice à un sol ferrugineux?..... | 71 |
| IV-3 Hypothèse 3 : la délimitation spatiale des sols ferrugineux demeure-t-elle une guide de la réalisation de la lutte biologique du sol dans une grande espace géographique ? | 75 |
| CONCLUSION, LIMITES ET PERSPECTIVES | |
| Références bibliographiques | 79 |
| Annexe I : Principales roches mères des 30sites de prélèvements..... | I |
| Annexes II : Plantes rencontrées sur terrain..... | III |
| Annexe III : Liste des plantes utilisées pour le reboisement..... | IV |
| Annexe IV : Modes opératoires des analyses effectuées au laboratoire | V |
| Annexe V : Nombres des échantillons prélevés dans chaque commune | XIV |
| Annexe VI : Signification d'interprétation morphopédologique | XVI |
| Annexe VI (suite) : Signification d'interprétation morphopédologique | XVII |
| Annexe VII : Résultats morpho pédologiques détaillés | XVIII |
| Annexe VIII : Résultats d'analyse physico-chimiques au laboratoire | XXI |
| Annexe IX : Normes d'interprétation d'analyses physico-chimique | XXVI |
| Annexe X: Cartes des pentes à 5 classes | XXVII |

| | |
|---|--------|
| Annexe XI : Cartes des pentes à 3 classes | XXVIII |
|---|--------|

Liste des unités de mesure

| | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| °C | : degré Celsius |
| % | : pourcent |
| cm | : centimètre |
| Cmol _c Kg ⁻¹ | : centimole par kilogramme |
| g | : gramme |
| g kg ⁻¹ | : gramme par kilogramme |
| h | : heure |
| ha | : hectare |
| km ² | : kilomètre carré |
| m | : mètre |
| még/100g | : milliéquivalent pour 100 grammes |
| ml | : millilitre |
| mm | : millimètre |
| N | : normalité |
| nm | : nanomètre |
| ppm | : partie par million |

Liste des abréviations

| | |
|----------------|---|
| AFNOR | : Association Française de Normalisation |
| CEC | : Capacité d'Echange Cationique |
| CPCS | : Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols |
| CREAM | : Centre de Recherches, d'Etudes et d'appui à l'Analyse Economique à Madagascar |
| DRDR | : Direction Régionale de Développement Rural |
| FAO | : Food and Agricultural Organization |
| GPS | : Global Positioning System |
| INRA | : Institut National de la Recherche Agronomique |
| IRD | : Institut de Recherche et de Développement |
| MNT | : Modèle Numérique Terrestre |
| ONE | : Office Nationale de l'Environnement |
| ORSTOM | : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer |
| PGRM | : Projet de Gouvernance des Ressources Minérales |
| PLAE | : Programme de Lutte Anti-érosive |
| PNAE | : Plan National d'Actions pour l'Environnement |
| PRD | : Plan Régional de Développement |
| pH | : potentialité d'Hydrogène |
| C | : Carbone |
| Ca | : Calcium |
| Gt | : Goethite |
| Hm | : Hématite |
| H ⁺ | : ion hydrogène |
| K | : Potassium |
| KfW | : Kreditanstalt für Wiederaufbau |
| Mg | : Magnésium |
| Na | : Sodium |
| P | : Phosphore |
| S | : somme de bases échangeable |
| USGS | : United States Geological |

Glossaire

Allophane : aluminosilicate hydraté Al_2O_3 , SiO_2 mal cristallisé, voisin des minéraux argileux auxquels il paraît souvent faire transition.

Argique : revêtement d'argile associée à des matières organique dans l'horizon BT

Concrétion : amas de particules solides se trouvant dans les roches ou les sols et résultant de la formation successive et de l'agglomération de particules nouvelles sous l'action des agents physiques et chimiques

Complexe absorbant : ensemble de colloïde minéraux et organique

Détritique : sol constitué par les résidus de la désagrégation des roches, se dit aussi d'une roche composée de débris, fruits d'une décomposition des éléments solides d'organismes vivants (os, carapace, etc.) ou de l'érosion par le vent ou les courants océaniques, particulièrement puissants au moment de leur formation.

Horizon : couche du sol, homogène et plus ou moins parallèle à la surface et se différenciant des autres couches sus-ou sous-jacentes par ses caractères et ses propriétés

Intrazonaux : caractéristique des sols qui reflètent l'influence dominantes de quelque facteur local de roches mère, de relief, d'âge plus que celle de climat ou de la végétation.

Lessivage : migration de fer ou d'argile vers la profondeur du sol.

Lithosol : un sol peu évolué d'érosion qui s'installe sur des roches dures.

Morphopédologie : une approche à la fois géomorphologique et pédologique de l'étude du milieu, visant à montrer les interrelations entre les processus de formation du relief (morphogenèse) et les processus de formation des sols (pédogenèse).

Nappe de charriage : ensemble de terrains qui a été déplacé (allochtone) et est venu recouvrir un autre ensemble (autochtone) dont il était très éloigné à l'origine.

Nodule : masse globuleuse, mesurant quelques centimètres à dizaine de centimètres, voire plus, par sa composition et/ou sa structure, se différencie de la roche dans laquelle elle est incluse.

Pédogenèse : mode de formation et d'évolution des sols, elle inclut toute les formes d'action de la végétation sur le sous-sol minéral, aboutissant à la création d'un sol.

Pédotubule : caractéristiques pédologiques qui ont une forme externe tubulaire.

Profil : coupe verticale d'un sol qui met en évidence l'épaisseur et la succession des différents horizons.

Rubéfaction : processus de coloration en rouge du sol par les oxydes de fer due à l'altération des minéraux primitifs de la roche mère qui libère d'importantes quantités de fer.

Solum : tranche verticale d'une couverture pédologique observable dans une fosse ou une tranchée. C'est aussi l'ensemble des horizons A et B d'un même profil et éventuellement les couches présentent des caractéristiques génétiques liés au développement de ces horizons lorsqu'elles sont situées au niveau de l'horizon C.

Toposéquence : position en amont, au milieu et en aval d'un bassin versant.

Vertique : relatif au vertisol, sol fertile sujet à de fortes différenciations saisonnières (grande sécheresse puis extrême humidité) courant dans les régions tropicales et continentales.

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1: Carte topographique de Madagascar | 8 |
| Figure 2: Carte géologique de Madagascar..... | 11 |
| Figure 3: Carte de pédologie de Madagascar – classification (CPCS) | 14 |
| Figure 4: Mécanisme de la ferrugination | 16 |
| Figure 5 : Mécanisme de l'érosion hydrique..... | 20 |
| Figure 6: Couverture végétale | 24 |
| Figure 7: Bassin versant | 26 |
| Figure 8 : Carte de localisation de la région Boeny | 29 |
| Figure 9: Carte géologique de la région | 32 |
| Figure 10 : Points de prélèvement..... | 35 |
| Figure 11 : Ordre de prélèvement d'échantillon | 37 |
| Figure 12: Exemple d'une étiquette | 37 |
| Figure 13: Processus d'analyse physico-chimique au laboratoire | 38 |
| Figure 14: pH mètre | 38 |
| Figure 15: Solution dans le cylindre | 39 |
| Figure 16 : Titrage de solution | 40 |
| Figure 17 : Chauffage de la solution | 41 |
| Figure 18 : Spectromètre UV/VIS à la longueur d'onde de 660 nm..... | 41 |
| Figure 19 : Spectromètre d'absorption atomique | 42 |
| Figure 20 : Processus de réalisation de la carte des sols | 46 |
| Figure 21: Proportion des points d'échantillonnage sur carapace sableuse | 47 |
| Figure 22: Proportion des points d'échantillonnage sur grès | 47 |
| Figure 23: Proportion des groupes des sols ferrugineux | 48 |
| Figure 24: Distribution des sols ferrugineux par District..... | 48 |
| Figure 25: Stratification jaune et bleue | 49 |
| Figure 26: Profil types d'un sol ferrugineux rouge lessivé (profil : 7SMMR)..... | 50 |
| Figure 27: Profil d'un sol ferrugineux jaune lessivé (profil : 13SMANK)..... | 50 |
| Figure 28: Profil du sol sur carapace sableuse (profil : 1SMMRS) | 52 |
| Figure 29: Profil d'un sol ferrugineux sur carapace à Befotoana (profil : 5SMMRS)..... | 53 |
| Figure 30: Cercle de corrélation des caractéristiques physico-chimique sur grès | 56 |
| Figure 31: Cercle de corrélation des caractéristiques physico-chimique sur carapace sableuse | 57 |

| | |
|--|--------|
| Figure 32: Présentation des effets de S au sol sur carapace sableuse | 59 |
| Figure 33: Présentation des effets de sable au sol sur carapace sableuse | 60 |
| Figure 34 : Carte des sols ferrugineux de la zone d'étude | 61 |
| Figure 35: Carte d'aptitude d'Anacardium occidentale | 64 |
| Figure 36: Carte d'aptitude d'Eucalyptus..... | 65 |
| Figure 37: Carte de sol ferrugineux apte aux plantes de reboisements | 66 |
| Figure 38: Carte sol ferrugineux modérément apte aux plantes de reboisements..... | 67 |
| Figure 39: Carte de sol ferrugineux marginalement apte aux plantes de reboisements | 68 |
| Figure 40: Carte de sol ferrugineux inapte aux plantes de reboisements..... | 69 |
| Figure 41: Séchage de sol sur un plateau | V |
| Figure 42: Types des tamis..... | V |
| Figure 43: Broyage à l'aide d'un pilon et mortier | VI |
| Figure 44: Triangle des textures..... | XVII |
| Figure 45: Carte des pentes en 5 classes utilisées pour la formation gréseuse | XXVII |
| Figure 46: Carte des pentes en 3 classes utilisées pour la carapace sableuse | XXVIII |

Liste des tableaux

| | |
|--|-------|
| Tableau 1 : Types des sols selon la classification CPCS (1967)..... | 12 |
| Tableau 2: Forme d'érosion dans la région nord-ouest | 22 |
| Tableau 3 : Tableau récapitulatif des roches et des sols rencontrés dans la zone d'étude. | 42 |
| Tableau 4 : Paramètre et facteur étudié | 43 |
| Tableau 5: Classe d'aptitude | 44 |
| Tableau 6: Propositions des plantes de reboisement | 45 |
| Tableau 7 : Variation des textures des sols ferrugineux sur grès | 49 |
| Tableau 8: Profils types des sols ferrugineux sur grès. | 50 |
| Tableau 9: Variation des textures des sols ferrugineux sur carapace sableuse à pente forte ... | 51 |
| Tableau 10: Profil type des sols ferrugineux sur carapace sableuse à pente forte | 52 |
| Tableau 11 : Variation des textures de sols ferrugineux sur carapace sableuse à pente faible | 52 |
| Tableau 12: Profils types des sols ferrugineux sur carapace sableuse à pente faible..... | 53 |
| Tableau 13 : Distribution des teneurs des sols ferrugineux | 54 |
| Tableau 14: Effet significatif de caractéristiques physico-chimiques selon la corrélation de l'ACP | 58 |
| Tableau 15: Aptitude culturale de sol pour des plantes de reboisement | 62 |
| Tableau 16: Roches mère des chaque échantillon..... | I |
| Tableau 17: Nom scientifique et vernaculaire de végétations rencontrées sur terrain | III |
| Tableau 18: Plantes de reboisement apte dans la région Boeny. | IV |
| Tableau 19 : Préparation des réactifs utilisés pour la détermination de P | VII |
| Tableau 20: Tableau des profils et des horizons | XIV |
| Tableau 21: Caractéristiques morpho pédologiques des sols sur grès | XVIII |
| Tableau 22: Caractéristique morphopédologiques des sols sur carapace sableuse à pente forte | XIX |
| Tableau 23: Caractéristique morphopédologiques des sols sur carapace sableuse à pente faible et modérée | XX |
| Tableau 24 : Résultats physico-chimique détaillés | XXI |
| Tableau 25 : Norme d'interprétation de pH | XXVI |
| Tableau 26: Norme d'interprétation de bases échangeables | XXVI |
| Tableau 27: Norme d'interprétation de Phosphore Bray II (P ₂ O ₅), l'Azote Kjeldahl et carbone (C)..... | XXVI |
| Tableau 28: Norme d'interprétation de rapport entre carbone et azote (C /N) | XXVI |
| Tableau 29 : Norme d'interprétation de capacité d'échange cationique (CEC) | XXVI |

INTRODUCTION

Le sol, une ressource naturelle indispensable pour toute forme de vie, constitue la base essentielle de la vie humaine (Gobat, *et al.*, 2010). C'est un milieu vivant portant la dynamique de l'évolution. Actuellement, l'étude sur le sol fait partie des priorités des recherches internationales. Cependant, l'année 2015 a été proclamée par l'Assemblée Générale de l'ONU lors de sa soixante-huitième session : « Année internationale du sol » dont l'objectif a été de faire accroître la compréhension de l'importance des sols ainsi que ses fonctions essentielles au sein de l'écosystème (Fabien *et al.*, 2015).

A Madagascar, comme partout dans le monde, la variabilité des sols est influencée par des facteurs climatiques et géologiques. Certes, notre île dispose plusieurs types des sols et que quatre-vingts pour cent (80%) de la population malgache vit en milieu rural et dépend de l'agriculture mais leur capital « sol » est menacé par l'érosion. De ce fait, la connaissance des caractéristiques des types de sol, et leur protection présentent une grande importance car ces caractéristiques ont des conséquences sur les propriétés physico-chimiques, sur leur potentialité nutritive et sur l'orientation des actions de luttes antiérosives.

Une étude sur la caractérisation des sols contribue à la protection des versants. Cette étude a été en collaboration avec un Programme de développement de Madagascar : PLAE (Programme de Lutte Anti-Erosive) et l'Université d'Antananarivo – Faculté des Sciences, et a été financée par la République Fédérale d'Allemagne, à travers la KfW. Ce projet a pour objectif global sur les gestions rationnelles et durables des bassins versants et de la protection des périmètres irrigués dans les régions sélectionnées à travers ces diverses activités. Le PLAE a commencé en 1998 comme projet en tant que mesure d'accompagnement aux interventions sur les périmètres rizicoles de la plaine de la Basse Betsiboka, pour les protéger des impacts néfastes de l'érosion. En 2005 le « projet » est devenu « Programme de Lutte Anti-Erosive » - PLAE II - avec une extension lors de sa première phase vers les antennes de Soavina et de Bezaha. Une deuxième extension a été entamée en 2008, et une troisième phase d'extension a eu lieu depuis l'année 2014 (PLAE, 2010).

Les principales activités du projet pendant cette phase III se focalisent sur l'appui aux villageois à réaliser leur projet de reboisement à vocation énergétique, à protéger leur terrain des aménagements antiérosives et à sécuriser leur droit de propriété foncière sur le terrain mis en œuvre. Dans toutes les étapes de projet, le PLAE adopte une approche participative à travers la responsabilisation des villageois. Deux antennes sont opérationnelles pour l'exécution et l'évaluation des activités sur les terrains : L'antenne Boeny basée à Marovoay Région Boeny, et celle de Diana basée à Antsiranana.

Les sols ferrugineux occupent en grandes parties la zone d'intervention du PLAÉ à Boeny, où les formations sédimentaires dominent dans cette région. Notre travail concerne « **l'étude des sols ferrugineux pour la contribution à la protection des bassins versants dans le site d'intervention de PLAÉ à Boeny** ». Ceci nous amène à évoquer les problèmes des versants dans la zone d'étude, tels : la dégradation de la couverture végétale sur les bassins versants, la dégradation des sols par l'érosion hydrique, et l'ensablement des bas-fonds. Notre étude tente de répondre aux questions : « *en quoi la caractérisation des sols ferrugineux et la végétalisation constituent un facteur déterminant pour la lutte antiérosive ?* ».

Afin de répondre à cette question, des hypothèses de recherche ont été avancées :

Hypothèse 1 : l'ensemble de formation géologique et relief influent-ils à la formation de sol ferrugineux dans la région Boeny;

Hypothèse 2 : les caractéristiques morpho pédologique et physico-chimique des sols ferrugineux trouvés dans la région correspondent-elles à des caractéristiques propices à un sol ferrugineux ;

Hypothèse 3 : la délimitation spatiale des sols ferrugineux demeure-t-elle la guide de la réalisation de la protection biologique du sol ferrugineux dans une grande espace géographique?

Ces hypothèses seront amplement détaillées ultérieurement avec les problématiques et les objectifs. D'autres parties seront également à traiter telles que l'état de connaissances relatif aux sols ferrugineux et leur protection contre l'érosion hydrique, les matériels et méthodes, les résultats, les discussions, limites et perspectives. Justement à ce propos, notre étude se basera sur la mise en évidence des caractéristiques du sol et la lutte antiérosive biologique.

1 Problématique

Comme partout dans la région de Madagascar, la destruction du sol due à l'érosion hydrique constitue principalement la grande menace pour les sols, surtout sur les versants. Pour le cas de la région Boeny, ces dégâts résultent de trois grands problèmes :

✓ Les feux de brousse et l'utilisation des bois comme source d'énergie de la population, en l'occurrence le charbon, constituent l'une des grandes causes de la destruction de forêt primaire. En 2005, le taux annuel de la déforestation était de 1,19 %. Cette dernière conduit à la dénudation des sols, en rendant facile l'action de l'eau pour arracher le sol, qui va accélérer la destruction des versants. Entre l'année 1998 à 2005, 60 000 ha de bassins versants dégradés ont été localisés dans 10 communes de Marovoay et en 2005, 300 ha de bassins versants dégradés se trouvaient dans 2 communes de District d'Ambato-Boeny (PNAE, 2016). Les

besoins de la population en matière de sources d'énergie augmentent avec la croissance démographique de la région, de plus l'utilisation de la nouvelle technologie sur des énergies renouvelables n'est pas encore très reconnue dans les zones paysannes. Dès lors, des sensibilisations sur l'idée qu'il est intéressant d'intensifier la plantation des bois à vocation énergétique, aux alentours du district, pour minimiser les impacts négatifs sur les sols ont circulé. Cela ne serait pas non seulement pour parer à l'exploitation forestière actuelle mais également sur les besoins futurs de la population. Pour avoir un bon résultat sur le développement des arbres, il faut que le sol soit capable de produire en maximum, donc, avoir les conditions adéquates pour la bonne croissance des plantes.

✓ La grande plaine de Marovoay constitue une zone de potentialité importante en riziculture, les exploitants récoltent quatre fois dans un an. La riziculture est donc la base du développement social et économique de la population. Actuellement, les rizières sont menacées par l'ensablement et l'inondation. 2 625 ha des rizières ont été ensablés et 21 350 ha des rizières ont été affectés par des inondations en 2005 (ONE, 2007). Alors que l'accroissement démographique continue sa lancée, celui des surfaces cultivées semble en stagnation. Afin de satisfaire les besoins en nourriture, les formes d'intensification agricole constituent une alternative à l'extension des surfaces cultivées (Razafimahatratra, 2011). A côté de cela, la protection des sols sur les versants constitue un levier pour la diminution des ensablements des rizières. En effet, la connaissance des caractéristiques des sols prédominants dans l'amont des rizières s'avère importante, afin de pouvoir identifier les techniques propices pour minimiser les dégâts dans les périmètres irrigués dans l'aval.

✓ Les sols des versants dans la région Boeny, en dehors de ceux des bas-fonds, sont constitués principalement des sols ferrugineux. Ces sols sont caractérisés : par des textures à dominance sableuse et sablo-limoneuse (Roederer, 1971) qui peuvent facilement être arrachées par le ruissellement par manque de cimentation d'argile et surtout s'il n'y a pas de plantes qui assurent la stabilité de la structure du sol. Ces espèces de plantes cultivées devraient s'adapter à la nature de sol et l'action de l'érosion de chaque zone utilisée doit être, du moins, atténuée (Baize, 2010). Ces « actions » nécessitent une bonne connaissance des caractéristiques de la couverture pédologique et la réalisation, sur la base de cette connaissance, du découpage de cette couverture considérée comme homogène vis-à-vis de l'intervention envisagée. La cartographie des sols est donc importante.

2 Objectifs

L'objectif principal de cette étude est de mettre en relation l'identification des caractéristiques de sol ferrugineux sur les versants et sa protection face à l'érosion hydrique.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- identifier les facteurs de la formation des sols ferrugineux dans la région de Boeny ;
- déterminer les caractéristiques morpho pédologique et physico-chimique des sols ferrugineux ;
- faire la délimitation spatiale des sols ferrugineux afin de pouvoir se préparer davantage au budget pour la protection des sols dans une grande espace géographique ; et de proposer les plantes pour la lutte biologique, plus précisément pour les plantes utilisées au reboisement à vocation énergétique.

3 Hypothèses de la recherche

Les hypothèses relatives se basent sur le sol ferrugineux des versants de la région et son aptitude à convenir aux plantes de reboisements : elles sont de trois ordres

3-1 Hypothèse 1 : l'ensemble de formation géologique et relief influent-ils à la formation de sol ferrugineux dans la région Boeny ?

Le climat, la végétation, les reliefs et les roches mères constituent les facteurs de la formation du sol (Maurice *et al.*, 2011). Selon Calvet (2003), les deux premiers facteurs concernent des zones étendues. Par contre, les facteurs locaux (roche mère et reliefs) sont liés à une zone réduite, c'est à dire au niveau d'un bassin versant. Pour le cas d'étude des sols ferrugineux de la région Boeny, il paraît mieux de prendre en considération ces facteurs locaux pour l'étude des sols ferrugineux dans cette région car l'étude a été effectuée à l'échelle des toposéquences des versants.

Cependant, dans le cas de formation des sols podzoliques qui se forment sur les différents matériaux, les facteurs locaux ne sont pas primordiaux par rapport au climat qui impose souvent les grands traits de l'évolution du sol (Calvet, 2003). D'autre cas, les sols ferralitiques rouges sur le pourtour de la Montagne d'Ambre et en divers endroits de centre de Madagascar dérivent des roches volcaniques (Ségalen, 1994), et tous les socles anciens de haut plateau recouvrent abondamment des sols ferralitiques dérivés des formations géologiques granito-gneissiques. Il a été montré par Ségalen (1968) pendant la détermination des produits minéraux amorphes des sols à hydroxydes tropicaux que les constituants minéraux des sols ferrugineux varient en fonction des roches mères parentales qu'ils dérivent. Au Burkina Faso les sols, de type ferrugineux tropical lessivé, sont issus de l'altération des cuirasses ferrugineuses latéritiques, riches en sesquioxydes de fer et d'alumine (Koulibaly, 2010). Au Sénégal, Mali, Tchad, les

sols ferrugineux peuvent être formés sur des roches cristallines ou sédimentaires diverses, sur des alluvions anciennes ou récentes, sur d'anciens sols remaniés. Face à ces données, la question se pose : la formation des sols ferrugineux de la région Boeny dépend-elle de la formation géologique et de la pente ?

3-2 Hypothèse 2 : les caractéristiques morpho pédologique et physico-chimique des sols ferrugineux des sols ferrugineux trouvés dans la région correspondent-elles à des caractéristiques propices à un sol ferrugineux ?

La transformation progressive de la roche mère constitue l'altération. Cette dernière va conduire à la formation d'un sol. Les caractéristiques des sols formés varient selon leurs facteurs pédogénétiques. Mais pour un sol donné, il existe des caractéristiques similaires pour pouvoir classifier formellement un tel type des sols. La base de référence pédologique (2008), ainsi que la classification CPCS (1967) ont été mises en place et utilisées comme base de la caractérisation de toutes recherches concernant le sol.

Plusieurs recherches ont été faites sur le comportement des sols dans les zones tropicales (Ségalen, 1968). Par conséquent, de différentes caractéristiques physico-chimiques des sols ferrugineux dans cette zone ont été trouvées. D'ailleurs la couverture pédologique ne se déplace pas par elle-même (Baize, 2010). Elle se modifie lentement in situ (évolution pédogénétique), elle peut être détruite partiellement ou totalement. Certains de ses éléments constitutifs se renouvellent à des rythmes variés, d'autres peuvent être entraînés et redéposés plus loin par colluvionnement, alluvionnement, lessivages latéraux, et autres. Ceci implique l'importance de la caractérisation des sols et la comparaison des résultats obtenus par rapport aux caractéristiques des sols ferrugineux déjà connues dans les autres zones. En revanche, les résultats caractéristiques de notre recherche dans la région de Boeny ne doivent pas être loin de ceux trouvés par ces différents chercheurs.

Du point de vue morphologique, les sols ferrugineux ont des couleurs rouges en topographie surélevée et jaunes dans les zones plus déprimées (Randriamboavonjy, 1993). Le sol est à dominance sableuse. En cas de dénudation des glakis, ces produits fins doivent pouvoir traverser les surfaces planes et être évacués sans obstacles (Segalen, 1968).

D'où l'importance de l'identification des caractères physico-chimiques des sols ferrugineux pour bien pouvoir les distinguer.

3-3 Hypothèse 3 : la délimitation spatiale des sols ferrugineux demeure-t-elle une guide de la réalisation de la lutte biologique du sol dans une grande espace géographique?

La protection des sols ne se limite pas sur une petite surface de sol mais à une grande étendue bien définie. La meilleure protection de sol réside donc dans la bonne gestion de la

réalisation de travail. La cartographie aide non seulement à l'accomplissement du travail de cotés techniques mais surtout aux gestions de travail de projet de lutte antiérosive. Par sa nature propre, la cartographie n'implique pas l'existence d'une classification générale préétablie; elle comprend, en revanche, une classification particulière adaptée et limitée au terrain étudié ainsi qu'à l'objectif de l'étude (Baize, 1986). Ceci implique que l'utilisation de la carte pourrait participer à la réalisation des activités des lutttes antiérosives biologiques.

Le reboisement constitue l'une des méthodes de lutttes biologiques pour minimiser l'effet désastreux de l'érosion hydrique. C'est la mise en valeur des terrains non exploitables par les agriculteurs. Lorsqu'on effectue un reboisement, l'identification du comportement de sol à cultiver est très importante car les plantes doivent s'adapter aisément au sol afin qu'elles puissent accomplir leurs rôles dans le bon fonctionnement des écosystèmes. Il nécessite de suivre les normes appropriées à la technique de reboisement comme le piquetage, la trouaison, la plantation proprement dite ainsi que l'entretien. Toute cette procédure devrait effectuer dans un temps bien planifié en fonction du comportement saisonnier car la saison de pluie constitue la meilleure période de plantation, mais surtout en fonction du fond de roulement de travail. Le planning de travail de réalisation ainsi que le cout de la protection envisageable doit se faire en avant afin de pouvoir estimer le budget nécessaire et la décision à prendre pendant la campagne du travail. La cartographie aide à l'estimation des dépenses au travail à réaliser car la superficie réelle sur terrain, qui est représentée sur la carte, peut être exploitée sur table.

Du côté technique de la réalisation du travail de lutte antiérosive plus précisément sur le reboisement, la connaissance de la caractéristique des sols permet de savoir son aptitude aux plantes et permet de saisir le bon choix des espèces utilisées. Ces caractéristiques peuvent figurer dans la carte avec leur superficie. Il en résulte donc des idées sur les nombres des plantes utilisées en fonction de la densité de plantation qui dépend de type de plantation (agroforesterie ou monoculture intensive) ou de type de production souhaitée (bois de chauffe ou bois d'œuvre). La cartographie des sols aide à la prise de décision des techniciens pour le choix de plante en fonction de l'écologie des espèces cultivées et celui du climat de la zone d'intervention. Ces plantes doivent s'adapter aisément sur le sol.

Il est donc important de connaître les sols, ses caractéristiques, et leur répartition pour leur conservation et leur protection.

**PREMIERE PARTIE : ETAT DES
CONNAISSANCES RELATIF AUX SOLS
FERRUGINEUX ET LEUR
PROTECTION CONTRE L'EROSION
HYDRIQUE**

I-1 Caractéristiques générales de la formation des sols à Madagascar

Madagascar est situé au sud-ouest de l'Océan Indien, à proximité de l'Afrique orientale séparé par le Canal de Mozambique (Chaperon, 1993). Il se trouve d'une part entre les latitudes sud 11°57' et 25°29' et d'autre part les longitudes est 43°14' et 50°27', avec une superficie de 592 040 km² (USGS, 2018). « L'Ile Rouge » s'étend sur un maximum de 500km de large aux points les plus éloignés de l'est à l'ouest, et 1600 km de long dans une direction nord-sud entre 12° et 26° de latitude sud, recoupant ainsi le Tropique du Capricorne (Tucker *et al.*, 2012).

I-1-1 Relief

Le relief divise Madagascar en trois grands ensembles : du nord au sud : une bande côtière étroite à l'est, des hauts plateaux au centre et une zone de plateaux plus bas et de plaines à l'ouest (Chaperon, 1993 ; Universalis, 2015) (figure 1).

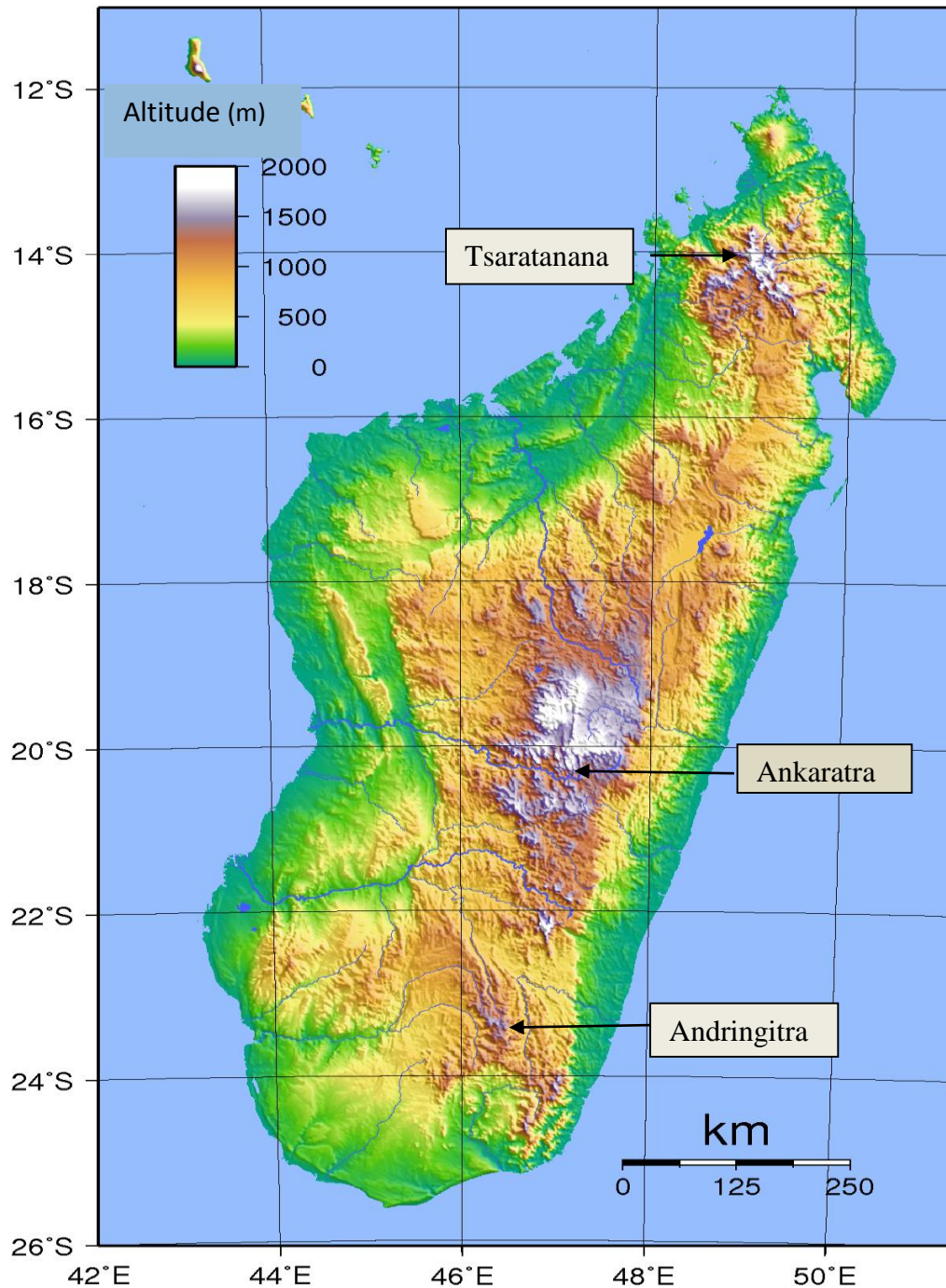


Figure 1: Carte topographique de Madagascar
(Sadalmelik, 2007)

Les hauts plateaux centraux ont une altitude oscillant entre 800 et 1 500 m et couvrent 60% de l'île ; ils s'élèvent brusquement lorsqu'on approche le pays par la côte est et descendent beaucoup plus doucement vers les vastes plaines de l'ouest. Les hauts plateaux comptent 3 principaux massifs : au nord, le Tsaratanana, qui possède le plus haut sommet de l'île, un pic volcanique de 2 876 m d'altitude, au centre l'Ankaratra et au sud l'Andringita.

I-1-2 Climat

Madagascar se trouve dans la zone intertropicale qui lui confère des climats tropicaux chauds et humides (Razafimahatratra, 2011). Des variations des régions climatiques ont été observées selon l'altitude et la latitude de chaque région et selon le gradient de pluviométrie allant du nord-est au sud-ouest (Razafimahatratra, 2011) :

- à l'est et au nord-ouest : climat tropical humide avec de fortes précipitations entre 2 000 et 3500 mm par an ;
- à l'ouest et au nord : climat tropical semi humide avec une précipitation annuelle de moins de 800 mm. La saison sèche est très marquée ;
- sur les hautes terres centrales: climat tropical d'altitude, avec la pluviométrie annuelle est supérieure à 1 500 mm ;
- le sud-ouest : climat aride avec une pluviosité de 400 à 600 mm ;
- l'extrême sud : climat très aride, peu arrosé avec une pluviosité annuelle moins de 400 mm vers Toliara.

Compte tenu de la température, la haute terre centrale a une température moyenne en dessous de 20°C et atteint jusqu'à 31°C. A l'ouest et au nord-ouest, elle est comprise entre 25°C à 40°C ; et dans la côte orientale, moyen ouest et sud, la moyenne annuelle est de l'ordre de 20° à 25°C.

I-1-3 Géologie

Madagascar présente deux ensembles de formations géologiques différentes : le socle cristallin occupant 2/3 de sa superficie à l'ouest et la formation sédimentaire occupant les 1/3 à l'est (figure 2). Le socle cristallin est le résultat du métamorphisme de formation sédimentaire primitive déposée dans une aire géosynclinale à la suite d'une orogénèse majeure datée de 2 600 millions d'années (Besairie, 1969). De ce fait, les roches cristallines sont très plissées. Ce socle est divisé en six domaines géologiques selon Tucker (2012). Ce sont : le domaine d'Antongil, domaine d'Antananarivo, domaine d'Ikalamavony, domaine Anosyen-Androyen, domaine de Bemarivo, domaine de Vohibory. Ce socle précambrien est constitué par des terrains métamorphiques stratifiés (gneiss, leptinites, granites stratoïdes, etc.) et par des intrusions acides (granites, microgranites, rhyolites) et basiques (gabbros, basaltes). L'âge de ces intrusions est divers, les plus récentes correspondent aux grandes dislocations du Crétacé supérieur et au volcanisme début du quaternaire (Chaperon, 1993). Le centre et le nord de Madagascar sont séparés du sud par la zone de cisaillement Ranotsara (Windley *et al.*, 1994) qui est orientée nord-ouest – sud-est. Cette subdivision est basée sur les différences d'âge

observées entre les deux unités. Au nord de cette zone de cisaillement, les roches sont Archéennes tandis qu'au sud ces dernières sont datées du Protérozoïque (Hottin, 1976).

Madagascar possède trois grands bassins sédimentaires : (i) le bassin d'Ambilobe au nord, (ii) le bassin de Mahajanga le long de la côte au nord-ouest, et (iii) le grand bassin de Morondava de plus de 1 000 km de long sur la côte ouest qui ont apparus par l'édifice volcanique et la dislocation du Gondwana (Tucker, 2012). Les roches sédimentaires n'ont subi aucune action orogénique notable et se sont déposées régulièrement (Besairie, 1946). Ils présentent actuellement un très faible pendage vers l'ouest.

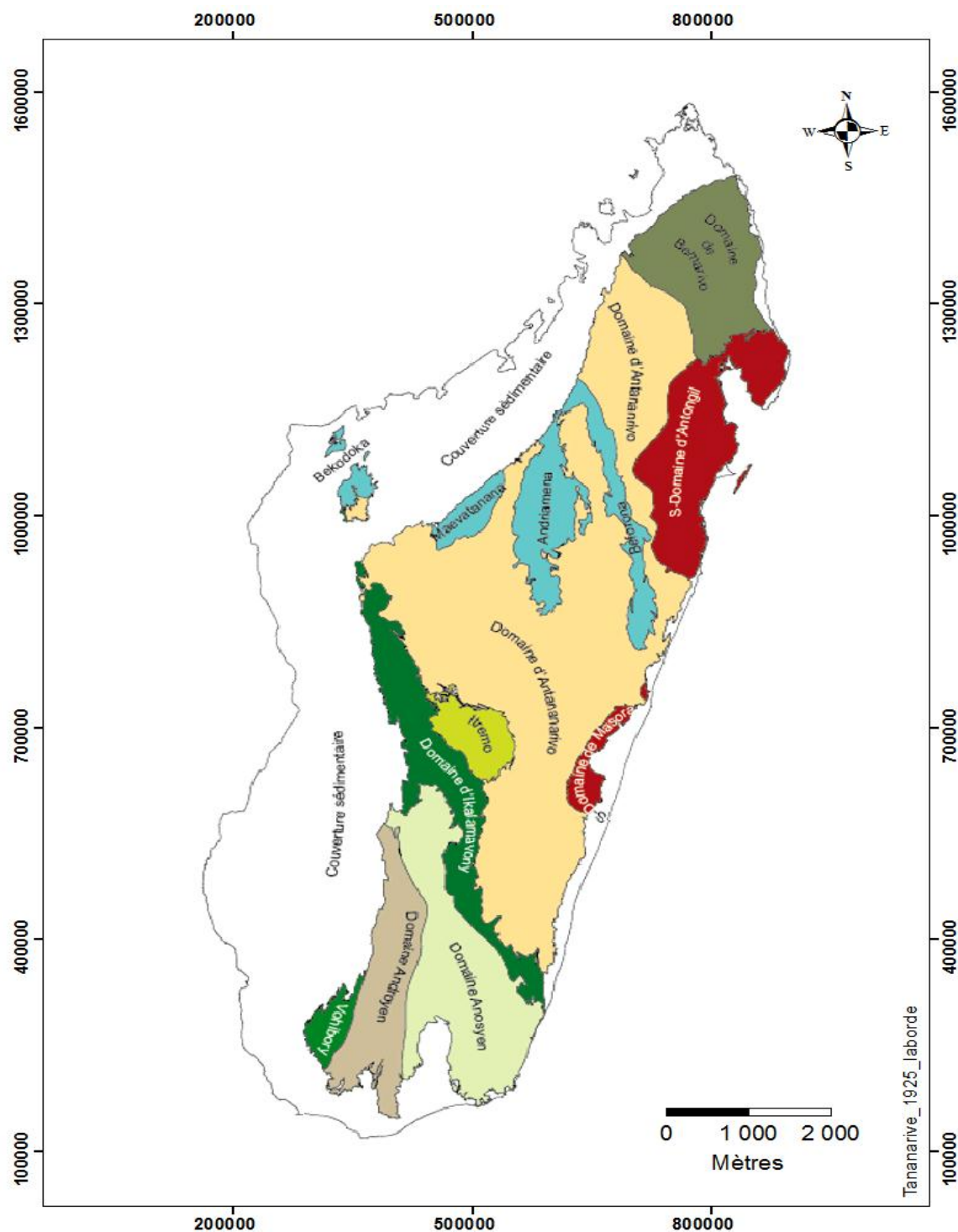



Figure 2: Carte géologique de Madagascar
(Tucker *et al.*, 2012, modifié)

Légende

| | | | |
|---|-------------------------|---|---|
|  | Couverture sédimentaire |  | Domaine de Bemarivo |
|  | Domaine d'Antongil |  | Domaine de Vohibory |
|  | Domaine d'Antananarivo |  | Nappe d'Itremo |
|  | Domaine d'Ikalavavony |  | Nappe de Tsaratanana, Maevatanana, Andriamena, Beforona |
|  | Domaine Anosyen | | |
|  | Domaine Androyen | | |

I-1-4 Type de sol

Les premiers travaux de pédologie sur le sol de Madagascar ont été commencés par les travaux de Lacroix *et al* en 1926 (Hervieu, 1961). Puis des diverses études et prospections pédologiques ont été réalisées par les chercheurs de l'ORSTOM et ceux de la Recherche Agronomique de Madagascar depuis 1946 (Hervieu, 1967 ; Roederer, 1971).

La classification française des sols de la Commission de pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS) de 1967 (figure 3) était le système de classification utilisé par les pédologues de l'ORSTOM pour les sols de Madagascar (Razafimahatratra, 2011). Cette classification des sols a permis de définir les principaux sols de Madagascar, présentés dans le tableau 1:

Tableau 1 : Types des sols selon la classification CPCS (1967).

| Types de sols | Superficie (km ²) | Aire relative (%) | Caractéristique | Localisation |
|----------------------|-------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|
| Sols ferralitiques | 274 561 | 46,5 | Sols profonds, kaolinites, des oxydes libres (goethite, hématite, gibbsite). | sur socle et épanchements volcanique |
| sols ferrugineux | 164 510 | 27,8 | la présence de l'horizon B textural (Bt) | ouest et sud-ouest de Madagascar |
| Sols fersiallitiques | 16 375 | 2,8 | oxydes de fer accompagné d'argile | |
| Sols peu évolué | 62576 | 10.6 | faible teneur en matière organique | versant occidental |
| Sols hydromorphes | 15 172 | 2,6 | phénomènes de réduction du fer | rizières de bas fond |
| Sols podzolisés | 5 598 | 0,9 | le profil différencié | |
| Vertisol | 5 341 | 0,9 | une teneur élevée (jusqu'à 70%) en argiles gonflantes | ouest et nord de l'Ile |
| Andosol | 542 | 0,1 | l'évolution sur une roche mère volcanique très altérable | roche mère volcanique |
| Calcimagnésique | <i>Non cartographié</i> | | carbonate de calcium | Roche calcaire |

Ces données montrent que près de 75% de la superficie totale de l'Ile est occupé par des sols ferralitiques et des sols ferrugineux. Les sols ferralitiques sont caractérisés par une décomposition très poussée des minéraux primaires. Ils sont dominés par les argiles kaolinitiques, des oxydes libres et bien cristallisés comme la goethite, l'hématite, et la gibbsite

(Razafimahatratra, 2011). Les sols ferrugineux et les sols fersiallitiques sont des sols à sesquioxyde de fer et de manganèse. Ils sont localisés dans la partie ouest et surtout au sud-ouest de Madagascar. Les sols peu évolués sont des sols à faible degré d'évolution et d'altération, caractérisés par une faible teneur en matière organique. Les sols hydromorphes sont dominés par l'effet d'un excès d'eau (hydromorphie) (Hervieu, 1961). Ils sont caractérisés par des phénomènes de réduction du fer (Roederer, 1971). Ils sont souvent aménagés en rizière de bas fond (Razafimahatratra, 2011). Les sols podzolisés ont un profil profondément différencié. Les vertisols sont caractérisés par une teneur élevée (jusqu'à 70%) en argiles gonflantes appelées « montmorillonites ». L'andosol s'évolue par la présence d'une roche mère volcanique très altérable produisant des allophanes (produits mal cristallisés). Les sols calcimagnésiques sont caractérisés par la présence en quantité importante (ou ayant une influence dominante) de carbonate de calcium ou de carbonate double de calcium et de magnésium ou de sulfate de calcium.

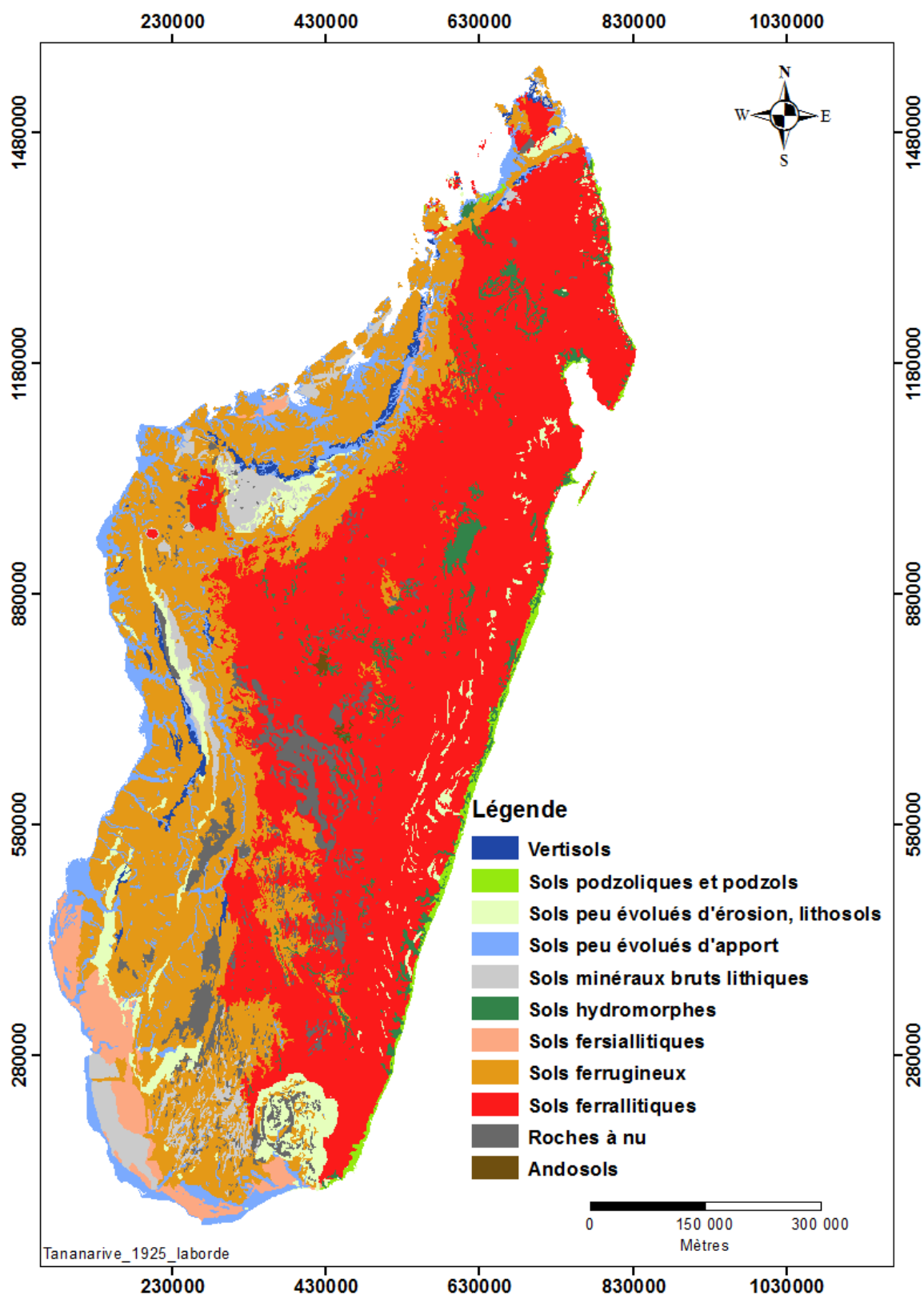


Figure 3: Carte de pédologie de Madagascar – classification (CPCS)
(Delenne et Peletier, 1981 ; modifié)

I-2 Généralités sur la genèse des sols ferrugineux de la région à Boeny

Les sols ferrugineux sont des sols intrazonaux, beaucoup moins épais de 1 à 3 m, de couleur rouge ou jaune selon le drainage du sol (Segalen, 1961). Ils font partie des sols les plus répandus à Madagascar après les sols ferralitiques. Ils longent la côte ouest et sud-ouest de l'île, occupent 27% de la superficie soit 164 510 km² (Razafimahatratra, 2011). Ils sont beaucoup plus étendus sur roches et matériaux sédimentaires (Chaperon, 1993).

La pédogenèse des sols ferrugineux est définie en fonction du climat, de la végétation, du relief, de sa roche mère et aussi en fonction du temps. Ces sols se forment essentiellement dans les régions où règne une très longue saison sèche, dans des zones à pluviométrie 500 à 1 200 mm, et dans le type de climat soudanien (six mois sec et six mois humides) ou climat soudano sahelien (quatre mois humide et quatre mois sec) (Segalen, 1967). Les végétations des forêts sèches ou des graminées couvrent les paysages de sols ferrugineux (Randriamboavonjy, 1993). Les reliefs relativement planes à pente douce associés à des reliefs tabulaires cuirassés ou non, ou à des affleurements granitiques isolés ou en massifs constituent les modelés des sols ferrugineux (Segalen, 1961; Randriamboavonjy, 1993).

Selon la classification CPCS (1967), les sols ferrugineux possèdent trois groupes: sol ferrugineux peu lessivé, lessivé et appauvri (Roederer, 1971 ; Ségalen, 1994), constitué par un lessivage d'argile et de fer et qui se trouve sur carapace et sur plateau horizontal (Roederer, 1971). Selon la classification FAO (1974), les arenosols et les luvisols correspondent aux sols ferrugineux. *Arenosols* : caractérisés par des sols à texture sableuse au moins jusqu'à 100 cm de profondeur. Ils ont aussi moins de 35% de fragments de roches ou autres fragments grossiers sur les 100 premiers centimètres (Baize, 2008). En outre, les arénosols ne sont pas affectés (ou peu) par des excès d'eau. *Luvisols* : caractérisés par la présence d'un horizon argique dont la capacité d'échange cationique est supérieure ou égale à 24 cmolc kg⁻¹ d'argile.

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

I-2-1 Altération

L'ensemble de processus chimique et mécanique sur des roches mères riches en quartz (Soltner, 1999), comme le sable, grès, granite, gneiss a conduit à la formation des sols ferrugineux (Segalen, 1967 ; Maurice, *et al.*, 2011). Ces processus se passent à des échelles de temps millénaire (Fox, 2011), et sont influencés par des facteurs passifs tels que la roche mère, la topographie et des facteurs actifs tels que le climat, la végétation, les microorganismes et l'homme (Roederer, 1971).

Selon Soltner (1999), la formation des sols ferrugineux correspond au deuxième degré de l'évolution des sols riches en oxyde et alumine (figure 4). Elle s'est produite après la fersiallisation et avant la ferralitisation. Sous les actions du vent, de l'eau et de la température, les roches ont subi une altération incomplète des minéraux primaires. De ce fait, l'orthose et la muscovite ont encore subsisté (Duchauffour, 1988), et le fer se sépare des minéraux constitutifs des roches et son individualisation dans le sol sous des nouvelles formes (amorphes ou cristallisés ou organiques) dans l'ensemble constitue le fer libre (Ségalen, 1971).

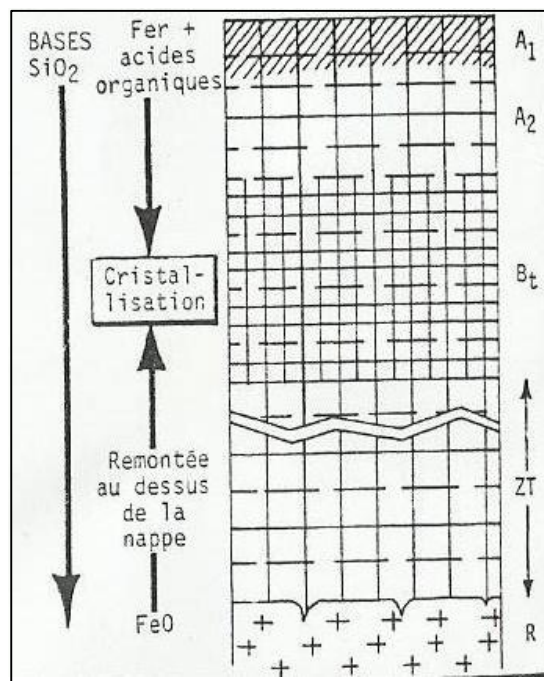


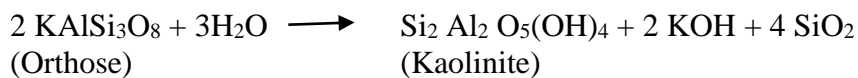
Figure 4: Mécanisme de la ferrugination
(Soltner, 1999)

Cependant, il y a une perte de silice importante, d'où des argiles pauvres en silice de type 1/1 (Kaolinite) sont formés majoritairement, les argiles minoritaires de types 2/1 (illite) et les bases sont lessivés. Eventuellement, il y a rubéfaction des oxydes de fer (Segalen, 1977), en milieu bien drainé et sur roche mère riche en fer. La teinte du sol due à la cristallisation sous forme d'oxyde de Fe^{3+} (ferrique) Fe_2O_3 est variée selon trois facteurs : la richesse en fer de la

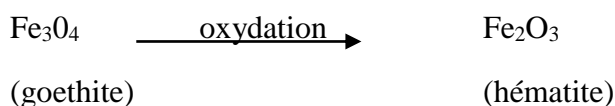
roche mère, la topographie, les contrastes saisonniers. Ce sont la goethite ($\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$) de couleur ocre, si le dessèchement est plus modéré ou progressif ; l'hématite (Fe_2O_3) de couleur sang rouge: si le dessèchement est extrême (Roederer, 1971). En cas de formation de nappe, la migration ascendante et oblique du fer ferreux peut produire deux phénomènes. D'une part, la solution ferreuse vient en surface, le fer est réoxydé et précipité puis il se durcit autour d'un noyau. Ce qui est témoigné par la présence de concrétion dans les sols ferrugineux (Bourgin, 1960), qui est fréquemment en relation avec l'action d'une nappe temporaire (Chaperon, 1993). D'autre part, la solution ferreuse se concentre en certains points pour former, par cristallisation, des cuirasses ferrugineux (Soltner, 1999).

Le processus chimique, qui fait apparaître des produits ferrugineux dans le sol, comprend hydrolyse, oxydation et déshydratation (Ségalen, 1971). Dans le climat chaud et sec, cette décomposition chimique n'est active qu'après les pluies, entraînant une désagrégation granulaire, la chaleur facilite la désagrégation par expansion (Maurice *et al.*, 2011)

L'hydrolyse : conduit à la richesse en sesquioxides des sols ferrugineux. Selon Gobat *et al.*, (2010), la réaction suivante explique la formation de la kaolinite par hydrolyse de l'orthose ou de feldspath potassique :



L'oxydation : consiste à la libération sous forme ferrique Fe^{3+} de fer présent à l'état Fe^{2+} dans le réseau cristallin de certains silicates, elle le déstabilise (Gobat *et al.*, 2010). Elle se produit lorsque la température est élevée. Le composé de fer, de manganèse et les sulfures sont très sensibles à cette altération.



La réduction solubilise le Fe^{2+} à partir de l'oxyde et l'hydroxyde de Fe^{3+} présent dans le ciment de ferrugineux de certain grès (Gobat *et al.*, 2010).

I-2-2 Constituants des sols ferrugineux

Le sol est un réservoir de matières organiques et minérales, et aussi le milieu de transformation de ces matières (Gobat *et al.*, 2010).

➤ Constituants minéralogiques

Les constituants minéralogiques du sol définissent la texture du sol (FAO, 2015). Ils sont composés de minéraux argileux et essentiellement des éléments sableux lorsqu'ils proviennent des grès.

Les minéraux argileux : La kaolinite domine dans la minéralogie des sols ferrugineux tropicaux sur des matériaux sableux et gréseux (Ségalen, 1968 ; Chatelin, 1969 ; Segalen, 1974). A part cette fraction colloïdale, les minéraux argileux de type 2/1 (l'illite surtout, mais aussi montmorillonite, vermiculite interstratifiés) sont fréquemment présents mais en petite quantité et peuvent être parfois absents (Boyer, 1973 ; Segalen, 1994). Ces phyllosilicates se différencient par le rapport entre la Si et Al et par la distance entre les unités cristallines (Segalen, 1974).

Les éléments sableux : regroupent les éléments volumineux (cailloux > 20 mm et graviers > 2 mm), les éléments moyens (sables grossiers > 200 micromètres) et les éléments fins (sables fins > 20 micromètres et limons > 2 micromètres). Dans la formation gréseuse, ces éléments se présentent en élément siliceux comme les grains de quartz SiO_2 qui sont pratiquement inaltérables chimiquement (Calvet, 2003).

La fraction granulométrique des sols ferrugineux est liée à la topographie qui est la cause essentielle de la genèse de ces sols. Dans la topographie surélevée, les sols sont généralement plus sableux par rapport au niveau inférieur. Le drainage sur la partie inférieure des glacis est moins bon, et à partir duquel la nappe remonte très vite dès la saison de pluies, le lessivage oblique favorise la différence de la granulométrie entre la surface et la partie inférieure du profil (Segalen, 1967 ; Randriamboavonjy, 1993).

➤ **Constituants organiques**

Les constituants organiques d'un sol ferrugineux proviennent de la décomposition des débris végétaux, des restes et des détritiques d'origine animale enfouis dans le sol. Ils représentent moins de 0,1 % du volume total d'un échantillon de terre (Hatier, 1987) et sont souvent biodégradables. Les matières organiques fraîches (MOF), qui ne sont pas décomposées, comprennent tous les constituants du sol formés d'hydrates de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et, le plus souvent, d'azote. 50 % à 90 % de ces MOF se décomposent rapidement par la minéralisation primaire entraînant une libération des molécules simples (H^+ et OH^-) et des composés minéraux (Soltner, 2005). Ces produits de minéralisation peuvent se perdre dans l'atmosphère et par lixiviation, absorber par les plantes (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , NH_4^+), fixer par l'argile et l'humus (CEC), réabsorber par le microbe (Hatier, 1987). Ces divers constituants suscités peuvent être identifiés par des analyses physico-chimiques.

La texture des sols ferrugineux tropicaux est souvent sableuse (Hervieu, 1961 ; Besairie, 1972 ; Roederer, 1971 ; Ségalen, 1977). Ce sont aussi des sols poreux. Du point de vue physico-chimique, le sol ferrugineux a les caractéristiques suivantes :

➤ **Réaction du sol**

La réaction du sol est faiblement à moyennement acide avec $5.5 < \text{pH} < 6.5$ (Hervieu, 1960). Selon Ségalen (1994), il est proche de 6,0 (compris entre 5.0 et 7.0). Le pH_{eau} diminue de 6,8 en surface à 5,9 vers 65 cm (Roose, 1978). Le pH neutre en surface devient acide en profondeur (Randriamboavonjy, 1996).

➤ **Carbone et azote**

Le taux de carbone (C) et azote (N) dans le sol ferrugineux varie d'une région à une autre, et selon la roche mère parentale. Pour un sol lessivé, le C n'atteint pas $0,25 \text{ g kg}^{-1}$, et les teneurs en N sont médiocres, cas des sols centre Haute-Volta sous savane soudano sahélienne en Afrique de l'Ouest issus des granites (Roose, 1978). Au Sénégal, au Mali, au Niger, au Tchad, les sols les plus sableux ont une teneur de 3.5 g kg^{-1} de C avec 0.3 g kg^{-1} de N, (Dabin, 1967). Pour un sol non lessivé, le sol Dior a une teneur en C moyenne de 2.5 g kg^{-1} qui diminue lentement vers la profondeur de 1 à 2 g kg^{-1} tandis que le N peut varier de 0.1 g kg^{-1} à 0.3 g kg^{-1} (cas du sol de Dabin). Dans le sol beige, le C et N sont à peine supérieurs à ceux des sols Dior ($\text{C}=3 \text{ g kg}^{-1}$ et $\text{N}=0.3 \text{ g kg}^{-1}$). Pour le sol ocre plus argileux, le C peut atteindre 5 g kg^{-1} et le N est de 0.4 g kg^{-1} . Au Burkina Faso, les sols ferrugineux tropicaux lessivés et non lessivés contiennent de faible quantité de M O généralement bien décomposé, Carbone 4 et 3.9 g kg^{-1} , l'azote 0.4 et 0.3 g kg^{-1} . Le sol ferrugineux dans la partie moyen ouest de Madagascar est pauvre en MO (inférieur à 16.7 g kg^{-1}) et sont diminués vers la profondeur du profil (0.4 g kg^{-1}) (Randriamboavonjy, 1996).

➤ **P₂O₅**

Le P₂O₅ est très faible dans le sol ferrugineux, environ 0.02 g kg^{-1} soit 2 ‰, du fait qu'il n'existe pratiquement pas de minéraux primaires contenant de phosphores dans le sol (Hervieu, 1961 ; Dabin, 1970). Il est environ de 0.25 ‰ dans le sol ferrugineux (Baise, 2009). A Madagascar, la teneur en P est de 0.005 ‰ à 0.01 ‰ dans le sol ferrugineux de Kirindy, (Randriamboavonjy, 1996).

➤ **CEC et T**

La capacité totale d'échange T ou capacité cationique est la quantité maximale de cation de toutes sortes qu'un poids déterminé de sol est capable de retenir à un pH donné (surtout H⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, Na⁺, et en quantité plus faible Nh⁴⁺, Mn⁺⁺, Cu⁺⁺, Zn⁺⁺, Al⁺⁺⁺, Fe⁺⁺⁺) (Duchaufour, 1997). En général, la CEC moyenne pour un sol ferrugineux est de l'ordre de 10 cmol kg^{-1} (Hervieu, 1961 ; Roederer, 1971;). Elle est faible, inférieur à 10 cmol kg^{-1}

(Baize, 2009 ; Randriamboavonjy, 1996). Le degré de saturation est presque toujours compris entre 400 g kg^{-1} et 600 g kg^{-1} , et atteint parfois 800 g kg^{-1} (Ségalen, 1994).

➤ **S**

La somme des bases fréquemment présentes sur le complexe d'échanges est la somme des cations alcalins et alcalino-terreux Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} et Na^{+} (Baize, 2000). Ils jouent un rôle essentiel dans la neutralisation de l'acidité du sol, le maintien de l'activité biologique général, et la structuration du sol (Duchaufour, 1997). Parmi les cations échangeables, le calcium (1 à $8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) et le magnésium (1 à $36 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) sont les mieux représentés. Le potassium (0.04 à $0.4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) et surtout le sodium échangeable (0.02 à $0.08 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) sont peu abondants, même au niveau du gley (Roose, 1978). Le sol ferrugineux est faible en réserve minérale avec une $S < 5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Hervieu, 1961 ; Roederer, 1971). D'après Ségalen (1994) la teneur en S est de $3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

I-3 Erosion hydrique

L'érosion hydrique est un enlèvement de la surface du sol sous l'action de l'eau (FAO, 2015). Selon la recherche effectuée par le Cornell University à Madagascar, la région occidentale souffre de plus en plus de cette érosion (ONE, 2007).

I-3-1 Mécanisme de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique se produit principalement lorsque l'écoulement de la surface transporte des particules de sol détachées par l'impact des gouttes de pluie ou le ruissellement : « effet splash », (figure 5) et entraînant en suspension, puis en saltation et reptation vers l'aval de la pente pour former un charriage de fond avant de se sédimenter (Ministère de la coopération, 1993).

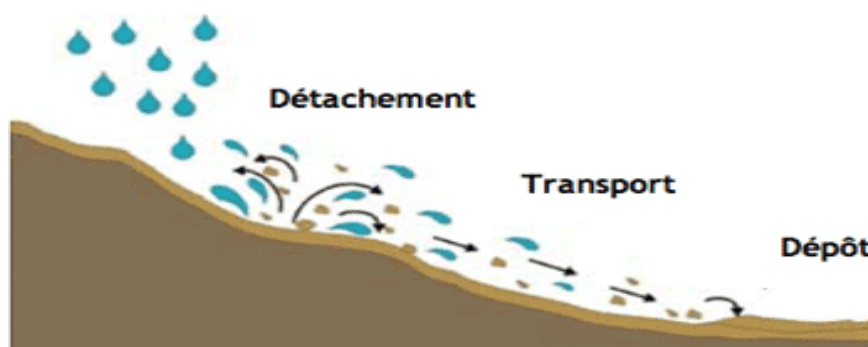


Figure 5 : Mécanisme de l'érosion hydrique

Ces processus de transports de ruissellement dépendent de différents facteurs (Roose, 1994) tels que:

- la vitesse de ruissellement qui résulte de la pente, de la nature de la surface du sol et du volume d'eau ;
- la morphologie du terrain qui varie selon l'intensité de la pente (plus la pente est forte, plus les rigoles se creusent pour devenir de plus en plus profondes) ;
- la nature du sol (résistance au ruissellement) ;
- la couverture végétale qui s'avère utile pour la protection du sol contre l'érosion puisqu'elle freine les ruissellements et diminue l'effet splash ;
- l'action de l'homme aggravant l'effet de l'érosion à cause de la déforestation, l'incendie, le surpâturage et les cultures sur-brulis.

I-3-2 Forme d'érosion hydrique dans la région nord-ouest

L'érosion hydrique est classifiée en trois formes (Fournier, 1960; Chaperon, 1993 ; Roose 1994 ; Roose *et al.*, 1999 ; ONE, 2007 ; Rajoelison, 2008). Les caractéristiques de ces trois formes d'érosion ont été récapitulées dans le tableau 2 :

Tableau 2: Forme d'érosion dans la région nord-ouest

| Type d'érosion | Forme | Localisation |
|-----------------------------------|---|--|
| Erosion en nappe ou sheet érosion | <ul style="list-style-type: none"> - Stade initial de l'érosion hydrique - Deux mécaniques : <ul style="list-style-type: none"> * Application de l'énergie des gouttes de pluie à la surface du sol * Ruissellement en nappe | Sommet de versant (Zone sédimentaire de l'ouest) |
| Erosion linéaire ou rill érosion | <ul style="list-style-type: none"> - Stade secondaire de l'érosion hydrique - ruissellement accompagné de végétation et d'énergie cinétique emportant des particules de plus en plus grosse - formation successive des échancrures, des griffes, des rigoles et des ravines de façon parallèle de l'aval de vers l'amont | Sur un versant ou dans un creux |
| Erosion en « lavaka » | <ul style="list-style-type: none"> - Stade avancé de l'érosion hydrique - déplacement de la couverture pédologique due au déséquilibre massique et aux frottements des matériaux avec la formation géologique - Forme de ravin en V (berge à pente constante) pour les matériaux tendres/homogènes et en U (berge vertical) pour les couches plus cohérentes | Sur un versant |

Le tableau 2 montre l'évolution de l'érosion. L'érosion a commencée par le sheet érosion qui a un effet érosif maximal au sommet d'un versant mais il s'agit d'accumulation dans les bas versants (Roose, 1999). Cette manifestation s'est produite dans le nord-ouest de Madagascar. Dans ce cas, les sables comblent toutes les dépressions (Chaperon, 1993). Puis, l'érosion linéaire se produit après que le ruissellement se concentre dans le creux. A ce stade, les rigoles forment des ruissellements parallèles avec des dimensions de plus en plus profondes. Le ruissellement a pris la végétation et a emporté les graviers, et cailloux. L'évolution d'érosion s'est produite successivement selon la profondeur : Griffes (quelques cm), Rigole (10 à 20cm), nappe ravinant (10 à 20cm de profondeur et plusieurs mètres de large), Ravine (supérieur à 50 cm de profondeur) (Roose, 1994). Ces ravines se développent toujours de l'aval vers l'amont par l'érosion régressive et peuvent être une des causes de formation des "lavaka" (Chaperon,

1993) qui est un stade avancé de l'érosion et constitue un phénomène courant à Madagascar (Roederer, 1971).

Les bassins de Betsiboka fait partie des zones les plus touchées par ce phénomène d'érosion accélérée (Chaperon, 1993). En 2015, la superficie totale de lavaka de la Région Boeny est estimée à 2 469 ha, dont les districts de MahajangaII, Marovoay, 'Ambato Boeny ont plus de 50 lavakas (PNAE, 2016).

I-3-3 Conséquences de l'érosion

○ Perturbation des régimes hydrauliques

La rareté de la couverture végétale accentue fortement les effets érosifs de pluie par l'accroissement de ruissellement. Elle affecte l'irrégularité ou l'insuffisance de l'alimentation de nappe phréatique. Ce qui conduit à la perturbation de débit ou tarissement de source et au manque d'eau sur l'irrigation de la rizière. En 2005, huit rivières ont été ensablées, treize sources ont été taries et cinq lit de rivière ont été changés (ONE, 2007).

○ Appauvrissement du sol et abandon de terre cultivable

Dans les zones érodées, le décapage des horizons rend l'appauvrissement du sol. Par conséquent, la teneur en humus et en éléments nutritifs des sols décroissent. La capacité de rétention en eau diminue. La superficie de terre cultivable diminue. En 2005, seulement 86% des rizières fertiles de la région restent cultivables et 67,4 % des tanety ont été dégradés (ONE, 2007).

○ Ensablement des bas-fonds et inondation des rizières

Dans les zones de dépôt, les sables s'accumulent, ce qui provoque la sédimentation des canaux d'irrigation et la diminution des périmètres agricoles. En 2005, 2 625 ha des rizières de la région ont été ensablés et 21 350 ha des rizières ont été inondés à Ambato-Boeny, Majunga II et Mitsinjo (ONE, 2007). Ceci touche les domaines socio-économiques car le rendement de la production agricole diminue.

I-4 Fonctionnement des écosystèmes cultivés

I-4-1 Protection des écosystèmes à partir de la couverture végétale

La couverture végétale (figure 6) telle que le système de culture semis direct sous couverture végétale (SCV) constitue l'une des méthodes d'agriculture de conservation les plus pratiquées à part le travail minimal de sol et la diversification des espèces cultivées (Hammouda, 2010). Ce système commence à trouver leur place comme alternative dans la restauration des sols dégradés des pays tropicaux et dans l'amélioration de la productivité végétale (Ramaroson, 2012). Il a été introduit à Madagascar au début des années 1990, avec 3 objectifs : réduire

l'érosion hydrique, accroître la fertilité des versants de collines ou tanety, et améliorer l'efficience en eau. L'adoption de ces systèmes est réellement observée depuis les années 2000.

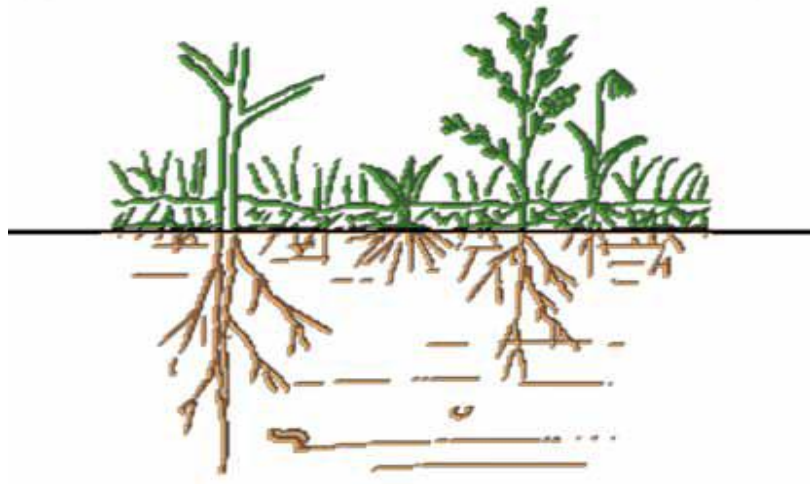


Figure 6: Couverture végétale
(Guil *et al.*, 2013)

Ce système consiste à recouvrir les interlignes de la culture principale par des matières végétales mortes (paillis ou mulch) appelées couverture végétale morte ou par des matières végétales vivantes (légumineuse) appelées couverture végétale vivante. Dans cette dernière, la culture principale et la couverture végétale sont cultivées en même temps. Il faut être attentif au choix de la culture de couverture afin de ne pas provoquer de concurrence (lumière, eau, intrants). Le couvert végétal, vivant et permanent, est une espèce pérenne, parfois fourragère. Elle est partiellement détruite, ou maintenue à l'état de vie ralentie (non compétitive) jusqu'à ce que la culture principale soit suffisamment développée.

D'après Séguy *et al* (2009), le SCV fonctionne de la même manière qu'un système forestier naturellement stable, durable et basé sur la forte activité biologique qui se concentre majoritairement dans la biomasse (phytomasse, litière et microflore du sol) et approvisionne les horizons superficiels du sol. La couche d'humus non négligeable peut maintenir la fertilité du sol et protéger contre l'érosion. La pratique de ce système garantit la couverture permanente du sol, limite la baisse du taux de matière organique lors de la mise en culture, augmente l'activité biologique, et améliore le statut azoté du sol (cas des légumineuses). Il présente donc un double intérêt sur la structure du sol (actions en profondeur) et sur la protection contre l'érosion hydrique (actions sur la surface du sol).

- Actions en profondeur du sol des plantes de couverture

Les racines des plantes qui s'introduisent et s'agrandissent dans les fissures, permettent de fragmenter le sol, ceux-ci conduisent à l'amélioration de la structure de sols. En enrichissant la

matière organique, la couverture végétale participe à l'amélioration de la stabilité de la structure du sol ainsi qu'au fournisseur d'éléments nutritifs nécessaires à la vie des plantes. De plus, elle favorise la vie biologique dans le sol, ce qui participe à l'augmentation de la porosité et aux maintiens de l'humidité dans le sol. Ainsi, comparativement au labour conventionnel, le SCV augmente la proportion des pores moyennes dans la couche superficielle tandis qu'en profondeur une augmentation totale de la porosité (Nivotiana, 2010).

- Actions sur la surface du sol de la couverture végétale.

Les litières permettent de diminuer l'effet splash sur le sol, et réduire les ruissellements (Roose, 1994). Elles assurent l'infiltration d'eau dans le sol, qui peut être stockée pendant et après la pluie jusqu'à sa saturation (Guil, 2013). De plus, les litières contribuent à la séquestration d'une quantité importante de carbone dans le sol (FAO, 2015), une diminution des doses d'engrais et de produits chimiques utilisées qui tendent à polluer les nappes phréatiques et l'air environnant; une réduction des déforestations qui détruisent la biodiversité (Nivotiana, 2010)

I-4-2 Mécanisme et mesure de la protection des sols contre l'érosion

a- Mécanisme de la protection des sols contre l'érosion hydrique

Ce mécanisme consiste à favoriser la structure des sols afin d'atténuer l'arrachement des sols par les ruissellements. L'absence de couverture favorise l'agression par la pluie (Griffon, 1999), par contre, l'intégration des plantes à fort potentiel de production de biomasse donne un aspect qualitatif au sol. Le non travail de sol limite la vitesse de la décomposition de la matière organique. Cependant, l'accumulation des résidus organiques en SCV augmente l'activité biologique du sol en surface. Ce qui intensifie le processus de minéralisation. Par conséquent, la CEC du sol augmente, l'acidité du sol diminue et la quantité d'éléments minéraux disponible pour les plantes cultivées accroît. D'où, les plantes de couverture assurent le rôle de « pompes biologiques » en favorisant la remontée des minéraux du sol pour être accessibles aux plantes cultivées (Seguy *et al.*, 2009). De plus, leurs racines assurent l'ancrage mécanique de l'arbre (Gobat *et al.*, 2010).

b- Mesure de la protection des sols contre l'érosion hydrique

La protection du sol est l'art de maintenir la bonne caractéristique physico-chimique du sol (Griffon, 1999). Ces techniques et méthodes consistent à remettre en valeur les sols dégradés en améliorant la fertilité du sol et à protéger le sol contre l'érosion hydrique. La mise en œuvre des mesures bien étudiées s'impose pour atténuer les effets désastreux de l'érosion. La mesure de lutte antiérosive peut varier selon les contextes locaux tels que géologique, topographique, végétation, ainsi que la rentabilité de l'opération envisagée. Ces mesures peuvent être

biologiques, ou mécaniques. Selon Roose (1994), la lutte biologique constitue la meilleure lutte anti érosive. Cette lutte consiste à protéger le sol par des plantes de couverture (couvertures vivantes) ou mulchs (couvertures mortes), mais aussi par des couverts boisés naturels, des plantations sous ombrage ou des jardins ligneux (Griffon, 1999). Son objectif sert à maintenir le sol sur la pente et en amont des phénomènes d'érosion. Selon Roose (1994), plusieurs façons peuvent être appliquées comme le reboisement, les techniques culturales améliorées ; haie-vive, engrais vert ou jachères amélioré ou prairie temporaire, la culture en bande, la rotation et association de culture. Par ailleurs, les plantes herbacées peuvent avoir des richesses en énergie facilement accessible, et la litière végétale améliorante riche en azote ou en cellulose mais pauvre en lignine active les processus bactériens dans le sol (Gobat *et al.*, 2010).

I-5 Spatialisation générale de la protection du bassin versant

I-5-1 Bassin versant

Le bassin versant (BV) est une zone géographique limitée par des lignes des crêtes et qui possède un exutoire commun pour tous ses écoulements de surface (figure 7).

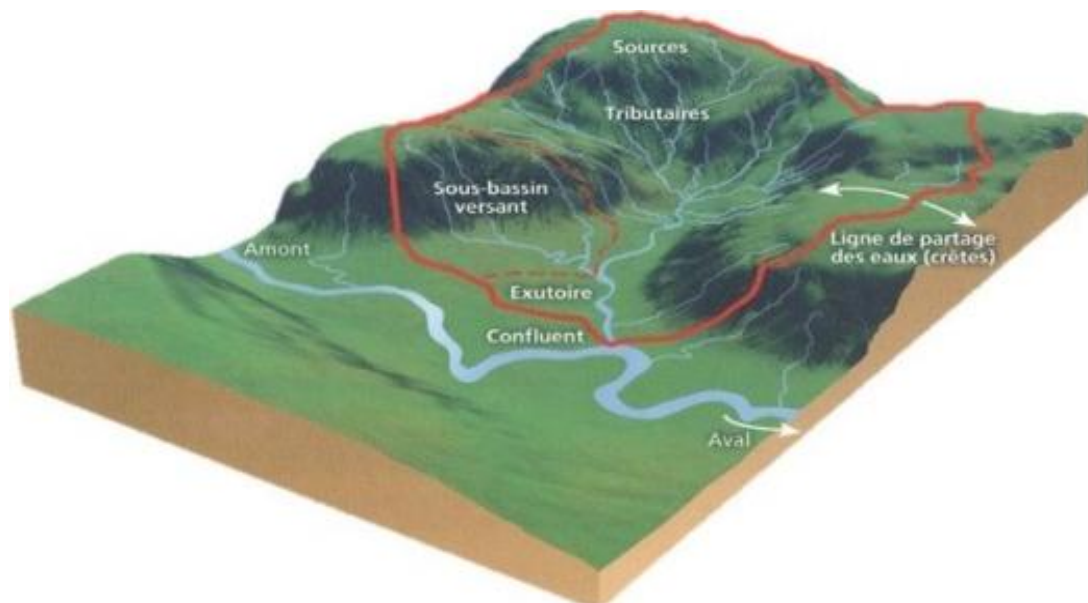


Figure 7: Bassin versant
(www.geologues-prospecteurs.fr)

C'est donc défini comme la totalité de la surface topographique drainée par les cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section. Il est constitué par de sommet, talweg, ligne de partage des eaux et toujours associé à des cours d'eau (Neméry *et al.*, 2010). Le bassin versant a pour rôle principal de collecter les eaux de pluie et de concentrer les écoulements vers les cours d'eau. Par conséquent, ses rôles sont très importants pour les paysans car le bassin versant assure l'alimentation en eau des périmètres irrigués (Légras *et al.*, 2014).

Les problèmes rencontrés sur le bon fonctionnement d'un bassin versant sont liés au mécanisme de l'érosion hydrique. Plus la pente est importante, plus la vitesse du ruissellement est accélérée, notamment si les couvertures végétales qui s'y trouvent sont insuffisantes. Concernant la nature du sol, les terrains perméables et fissurés contiennent une grande capacité d'infiltration, ce qui provoque une crue moins rapide. De ce fait, le débit d'étiage et le stock souterrain sont devenus plus importants. Pour un sous-sol imperméable, la crue est plus rapide et le débit d'étiage est moins important ainsi que le stock souterrain (Neméry *et al.*, 2010 ; Valérie, 2011 ; Légras *et al.*, 2014).

I-5-2 Cartographie d'un sol

La cartographie pédologique est l'une des méthodes les plus courantes pour analyser et présenter l'organisation du sol dans l'espace (Gascuel, 2010). C'est aussi la base obligatoire de tout plan d'aménagement, quel que soit son échelle, et de toute mise en valeur de sol quel que soit son orientation.

→ Rôles de la cartographie

La cartographie pédologique sert à localiser un tel type de sol dans une espace géographique bien définie. Elle consiste à la reconnaissance d'espèces naturelles et à la délimitation de leur extension spatiale (Baize, 1986). Elle révèle la répartition et la délimitation du sol dans l'espace. C'est une opération qui vise à replacer chaque unité de sol dans le paysage, à mettre en relief les relations qui existent entre chaque type de sol et son milieu et à faire apparaître le sol voisin (Duchaufour, 1988). La carte permet de représenter en surface réduite l'espace réelle sur terrain, sa possession facilite l'utilisation du sol et aide à déterminer l'aptitude du sol.

→ Paramètres considérés à la réalisation de la cartographie pédologique

Dans un premier lieu, la réalisation de la cartographie pédologique nécessite un travail de représentation fidèle que possible de la réalité, sur le plan géographique (carte locale par exemple), sur le plan des échelles de fond topographique (petite échelle), et sous l'angle technique (étude semi-détaillée) (Mireille, 1993). Ceci doit précéder d'une étude sur terrain, car une approche complémentaire sur terrain est utile pour vérifier la validité des informations recueillies et pour cerner la réalité des unités définies (extension, contour et types d'organisation) (Bornand *et al.*, 1989). Dans le second lieu, pour présenter une petite région, la composition et l'organisation de la couverture pédologique dépendent évidemment de la diversité du contexte géologique (stratigraphie, pétrographie) et topographique (accidents du relief) (Gascuel *et al.*, 2010). Troisièmement, l'utilisation d'une banque de données cartographiques par le système d'information géographique s'avère importante. Ceci permet la

réalisation des projections et la restitution de ces données selon des thématiques particulières et de croiser ce type de données avec d'autres tels le climat, pente, végétation provenant de fichiers différents (Bornand *et al.*, 1989).

DEUXIEME PARTIE :
MATERIELS ET METHODES

Pour la vérification des hypothèses de ce travail et notamment pour atteindre les objectifs fixés auparavant mais aussi les résultats escomptés, la méthode de travail a été répartie en quatre phases: la phase de travail sur terrain, la phase d'analyse physico-chimique des échantillons au laboratoire, suivi d'un traitement des données par l'analyse statistique et la phase de traitement de la carte par SIG.

II-1 Présentation de sites d'étude de Boeny

La région Boeny se situe dans la partie nord-ouest de Madagascar, entre la latitude 230 000 m et 520 000 m et entre la longitude 1 000 000 m et 12 200 000 m (figure 8). La Région est délimitée à l'est par la Région de Sofia, à l'ouest par la Région Melaky et au sud par la Région Betsiboka (PDR, 2005).

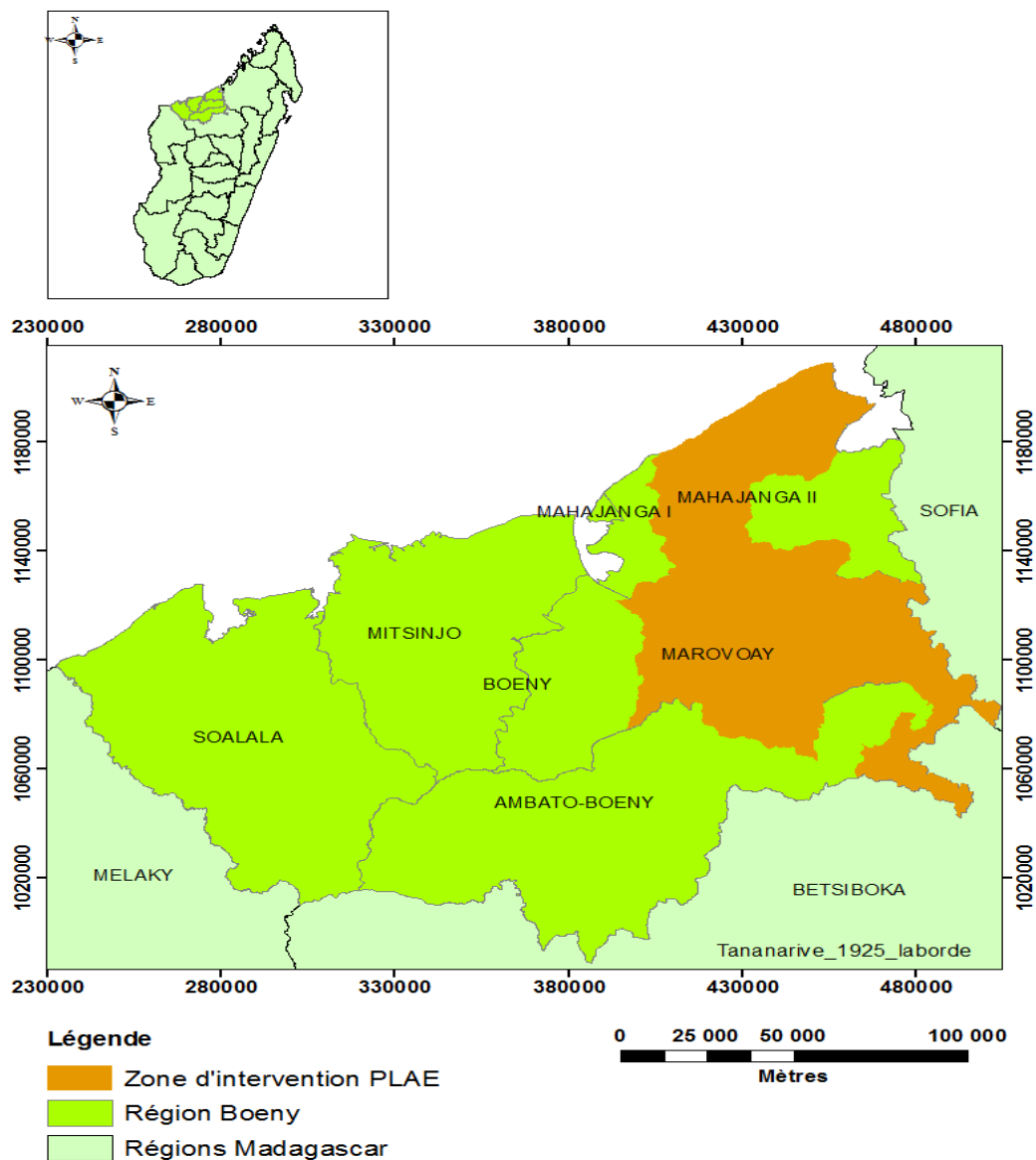


Figure 8 : Carte de localisation de la région Boeny
(BD 500)

Les zones étudiées concernent Ambato-Boeny, Marovoay et Majunga II. Des sols ont été prélevés dans les versants des sites d'intervention du PLAE.

II-1-1 Climat

Le climat de la zone d'étude est de type tropical sec pendant la saison sèche (mai à octobre) et fortement influencé par la mousson durant la saison humide de novembre à avril. Durant la période de 1980 à 2010, la température moyenne durant la saison sèche est de 26°C et durant la saison chaude et humide, elle est de 28°C. La température moyenne annuelle est de 27°C. La pluviométrie totale moyenne est entre 1000 et 1200 mm (PDR, 2005 ; PNAE, 2015). D'après les données d'observation, la température minimum moyenne annuelle de la région Boeny est de 22°C tandis que la température maximum moyenne annuelle est de 32°C.

II-1-2 Relief

La zone d'étude possède un relief varié plongeant plus ou moins lentement vers le Canal de Mozambique, due au phénomène de basculement vers l'ouest du socle. Il apparaît donc un relief de cuesta résultant de l'alternance de couche dure et de couche tendre qui présente un pendage généralement faible vers la mer (Chaperon, 1993). Dans la District de Majunga II, les reliefs disséqués recouvrent l'unité paysagique. La partie sommitale de ce type de relief présente une surface aplatie et associée à des versants à pente large et abrupte qui se termine par des 'Matsabory' dans les bas-fonds (Mandimbiharisoa, 2015). Tandis que les reliefs moutonnés et à caractère ondulé quasiment uniforme occupent la morphologie dans le District de Marovoay. Ils présentent une partie sommitale large, entourés par des versants à pente forte ou à pente douce. Les talwegs résultants de ces deux versants se dirigent en général vers l'ouest (Besairie, 1972). Des reliefs très accidentés formés par une succession des petites montagnes et de petites vallées en bas (Randriamboavonjy, 1996) ont été rencontrés dans le District d' Ambato Boeny.

II-1-3 Végétation

En général, la zone d'étude est constituée par des savanes herbeuses et arbustives développées sur des sols ferrugineux et lithosol. Cette savane herbeuse est souvent parsemée par des palmiers à *Medemia nobilis*, *Hyphanae shatan* et du *Zizyphus* avec quelques vestiges de la strate arborée d'*Albizzia jobercina*, de *Ficus sakalavarum*, de *Dalbergia*, de *Pourpartia* et de *Tamarindus indus*. Les prairies sont très variées. La dégradation des forêts sèches par l'exploitation forestière et les feux de brousse conduisent à la formation d'un tapis graminéen à base d'*Aristida multiconlis*, *Hyparrhenia ruffa*, *Hétéropogon contortus* (Randriamboavonjy, 1996). En 2015, 2 870 677 ha de la région Boeny a été recouvert par des formations végétales,

dont : raphière : 0,9%, mangrove (dense et dégradée) : 2,2%, culture : 11,3%, forêt sèche (dense et dégradée) : 16,1% et savane (arborée et herbeuse) : 69,5% (PNAE, 2015).

II-1-4 Géologie

La région Boeny fait partie de la formation sédimentaire de nord-ouest de Madagascar, plus précisément dans le bassin de Majunga. Les formations comprennent Karoo, constituées par des dépôts continentaux, formées lors de la séparation de Madagascar et des grandes Indes (Sri Lanka, Inde et Seychelles) du continent Africain, depuis la Paléozoïque et pendant tout le Mésozoïque (Goncalves, 2002); et les formations Post-Karoo, constituées par des dépôts marins et continentaux, déposées du Jurassique supérieur au Quaternaire.

La région a été formée par une succession de formation géologique monoclinale qui s'étend du groupe d'Isalo à actuel inclinée à faible pendage vers le nord-ouest (Rajaomazava, 1992), et qui est perturbée par des intrusions éruptives Crétacées (Chaperon, 1993). Cette formation sédimentaire a été formée d'une série stratigraphique comprenant à la base :

- des séries gréseuses, grésocalcaire et parfois schisteuses du Karoo et du Jurassique inférieur ;
- des séries calcaires et marno-calcaires du Jurassique supérieur, du Crétacé marin et de l'Eocène ; où s'intercale des grands coulées basaltiques ;
- des séries gréseuses du Crétacé continental et du Pliocène (Besairie, 1972 ; Chaperon, 1993) (figure 9).

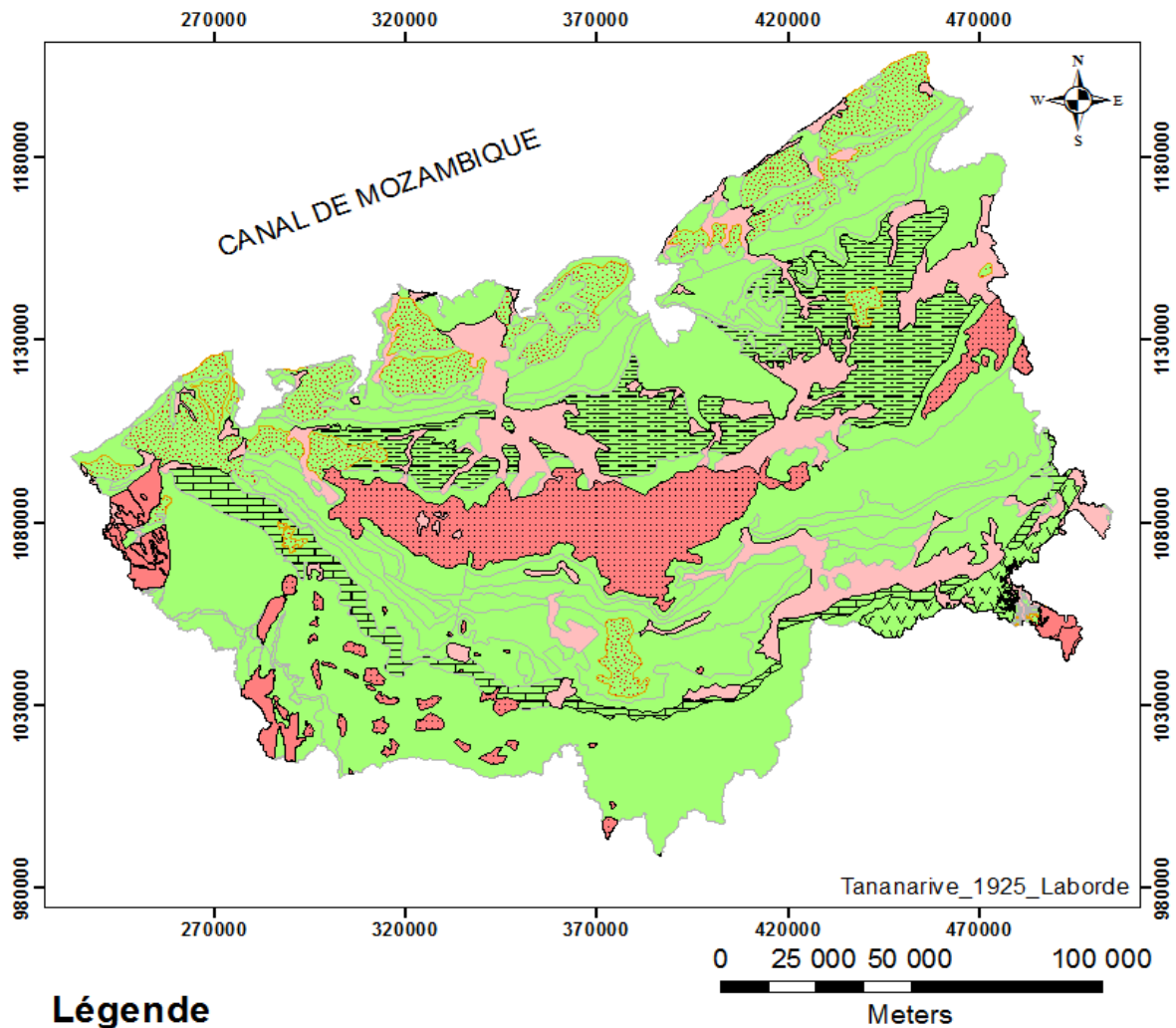


Figure 9: Carte géologique de la région (BD500)

Dans cette partie ouest de Madagascar, les cuestas, les plaines alluviales, et les carapaces sableuses ont été constitués comme les éléments les plus marquants du paysage (ONE, 2007). Ces éléments sont issus des roches détritiques comme les grès et des roches carbonatées comme le calcaire et les marnes.

- La carapace sableuse

Ce sont des formations de surface le plus souvent sablo-argileuse ou sableuse. Ces sols sont parfois difficiles à distinguer car il s'agit d'une couverture d'altération de transport par le ruissellement (Hervieu, 1966).

- La formation gréseuse

La formation sédimentaire gréseuse constitue la majeure partie de série continentale de l'Isalo dans le Crétacé et dans le Pliocène (Hervieu, 1966). Elle est constituée par des sables siliceux cimentés par de la silice, d'argile, du calcaire, des oxydes de fer (Besairie, 1972). Cette cimentation des grès est attaquée par hydrolyse avec une altération argileuse ou latéritique. Les sables siliceux sont libérés en surface et sont transportés par les eaux de ruissellement ou par le vent, pour former une carapace sableuse. La couleur de la partie supérieure d'un profil dans cette carapace sableuse est rouge. Ceci est dû à la migration de fer sous forme d'oxyde tandis que la base du profil est de couleur claire (Besairie, 1972).

Vers le Crétacé supérieur, le bassin de Majunga a subi une régression marine. Ce qui provoque l'existence des stratifications entrecroisées ou obliques dans la formation gréseuse. Elles sont souvent constituées des cortèges minéralogiques à zircon et disthène, ceux qui caractérisent surtout le grès de l'Ankarafantsika (Besairie, 1973). La mer s'abaisse vers la fin de l'ère secondaire puis une transgression s'est produite en quaternaire, ce qui donne une cimentation très développée du calcaire dans la formation gréseuse.

- La formation calcaire gréseuse ou marneuse

Cette formation est fréquente dans l'Isalo Jurassique et dans le crétacé supérieur (Hervieu, 1966). Le calcaire est constitué par de la calcite. Leur formation dans la partie ouest de Madagascar est pendant l'ère secondaire. Ces calcaires sont souvent associés par des grès (calcaire gréseuse) renfermant de quartz, ou par des marnes (calcaire marneux) renfermant des argiles (Besairie, 1972). La formation marneuse est constituée par des mélanges d'argile et du calcaire. L'altération de cette formation est transportée par l'action d'érosion pour former un sol riche en minéraux fertilisants, peu humifères, caractérisant des alluvions (Hervieu, 1966).

- La coulée basaltique

Dans la partie occidentale, cette formation géologique s'est produite pendant l'ère secondaire. Elle est la résultante d'émission fissurale et constituée de basalte avec un type particulier très abondant nommé sakalavite (Besairie, 1973). Aux environs de Marovoay, elle s'interrompt sur une courte distance. Elle s'intercale entre le sédiment grésocalcaire du Crétacé supérieur ou moyen et la roche basaltique. Lorsqu'elle repose sur le grès du crétacé, la coulée

basaltique présente une «cuesta». La coulée basaltique disparaît sous le sédiment calcaire mais le plus souvent se noie dans la carapace sableuse rubéfiée (Hervieu, 1966).

II-1-5 Types de sol

Selon CREAM (2009), trois types des sols prédominent dans la région Boeny :

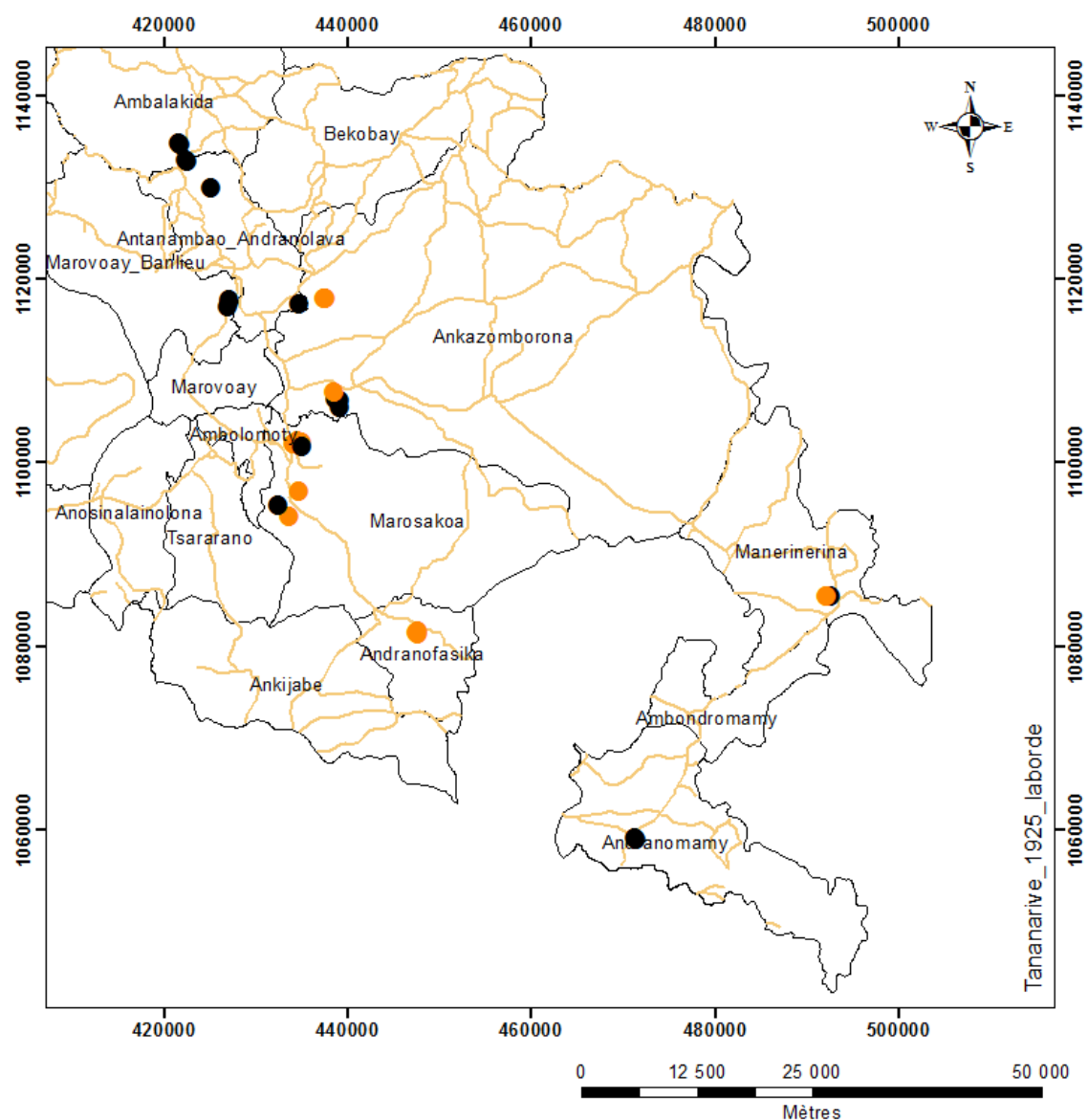
- les sols hydromorphes des bas-fonds, occupent en général la partie des embouchures des fleuves Mahavavy, Betsiboka et Mahajamba ;
- les sols peu évolués se trouvent sur les bourrelets de chaque berge des grands fleuves, et les petites parties des zones littorales. Ils sont constitués par des dunes de sables peu fertiles et des marécages d'eau douce. Ces types de sols représentent l'essentiel des rizières rencontrées dans la région ;
- les sols ferrugineux rouges occupent généralement les positions surélevées des versants et les sols ferrugineux jaunes dans les zones légèrement déprimées (Randriamboavonjy, 1996). Notre étude est figée uniquement à ce type de sol par le fait qu'il est majoritaire par rapport à notre échantillonnage.

II-2 Prélèvements du sol

II-2-1 Sites de prélèvement

Le choix des sites de prélèvement ont été planifié selon la variation des formations géologiques existantes dans la zone d'étude et selon l'assistance et la collaboration de l'unité de coordination du projet. Ainsi nous avons pris les échantillons selon la toposéquence d'un versant (haut, mi-versant et bas-versant). Les points d'échantillonnages ont été repérés par le GPS et le SIG a permis de les projeter sur une carte de la zone d'intervention (figure 10). Le logiciel ArcGis 10.1 a été utilisé pour cette étude, à partir d'une projection Laborde et en utilisant les coordonnées en degré décimaux.

Les sols ont été prélevés dans des 29 sites éparpillés dans les districts de Majunga II, Ambato-Boeny et Marovoay soit 81 échantillons prélevés. 32 de ces derniers se trouvent dans des sols ferrugineux et les restes appartiennent à des autres types des sols.



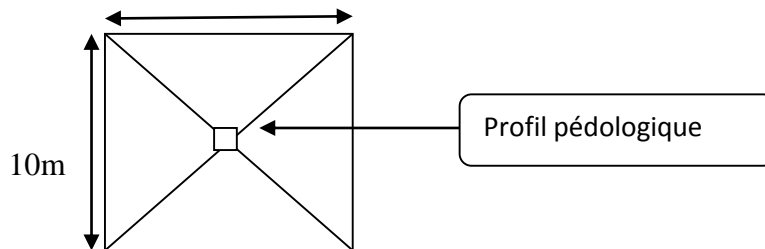
Légende

- Autres sols
- Sols ferrugineux
- Route

Figure 10 : Points de prélèvement
(BD500)

II-2-2 Méthode de prélèvement

Le prélèvement consiste à choisir au hasard, un carré de 10 m x 10 m à l'intérieur de chaque type de sol suivant la toposéquence. Une fosse pédologique de 1 x 1 x 0,5 m est creusée à l'intérieur du carré à l'aide de l'angady.



Le prélèvement a été réalisé comme suit :

- nettoyer la paroi de la fosse en procédant par grattage par mouvement de haut vers le bas en utilisant des lames d'angady et de couteau ;
- délimiter les horizons suivant la couleur (la notation se réfère au code de *Munsell Soil Color Chart*), la texture et l'enracinement. Avec le colorimètre « *color Munsell chart* », les mesures qualitatives de la couleur du sol sont réalisées par le biais de 3 variables : H (Hue), V (Value) et C (Chroma). Ces variables expriment la perception spatiale de la couleur. La teinte H est représentée par les lettres R (rouge), YR (jaune-rouge) et Y (jaune) précédée des nombres 0 à 10. La teinte devient plus jaune et moins rouge avec l'augmentation du nombre. La valeur V se situe sur une échelle de 0 (noir absolu) à 10 (blanc absolu) et le chroma C entre 0 (gris neutre) et 20 (Razafimahatratra, 2011) ;
- observer les profils pédologiques en analysant les caractéristiques morpho pédologiques de chaque type de sol ;
- prélever les échantillons (500 g à 1000 g par échantillon), La prise d'échantillon commence par l'horizon inférieur jusqu'à l'horizon de surface de façon à éviter la contamination de terre provenant de ceux d'en haut (figure 11) ;

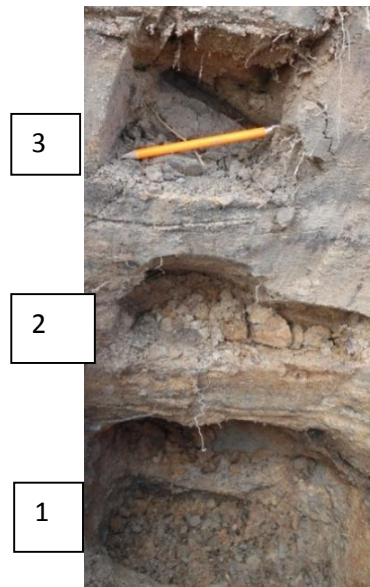


Figure 11 : Ordre de prélèvement d'échantillon

- reboucher la fosse, quant aux échantillons prélevés, ils sont mis en sachet avec leurs étiquettes respectives (figure 12), indiquant les codes de point, la date, le numéro du profil et la profondeur de chaque horizon, pour faciliter le travail au laboratoire de pédologie sis à Tsimbazaza.

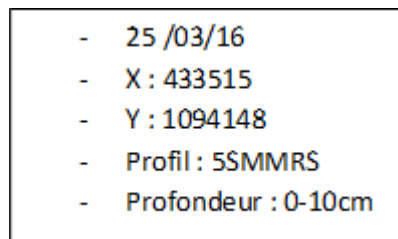


Figure 12: Exemple d'une étiquette

II-3 Analyses au laboratoire

Les étapes à suivre pour l'analyse physico-chimique des échantillons au laboratoire se résument dans la figure 13.

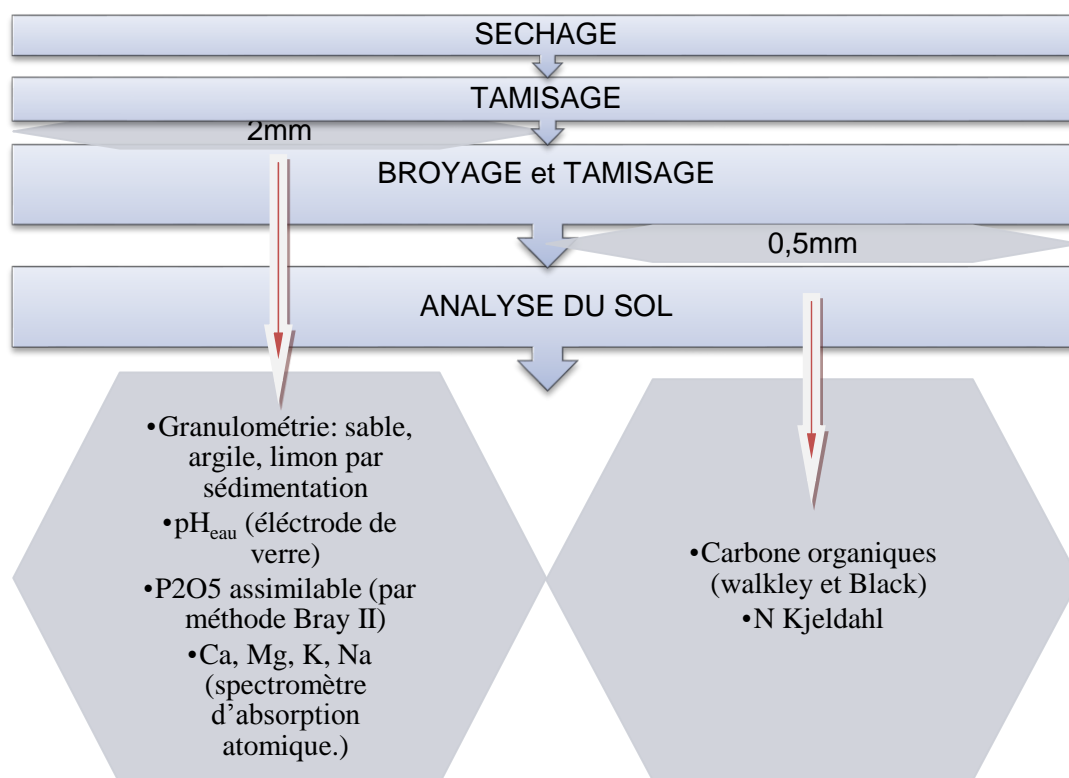


Figure 13: Processus d'analyse physico-chimique au laboratoire

II-2-1 Détermination du pH du sol

Le pH_{eau} du sol a été déterminé par lecture directe au pH-mètre à électrode en verre (figure 14), selon un rapport sol/solution de 1/2,5 et après un temps d'équilibre de 4 heures.



Figure 14: pH mètre

10 g de sol de 2 mm de diamètre avec 25 ml d'eau distillée ont été utilisés pour cette analyse. Le principe est de trouver la différence de potentiel créée entre une électrode de verre et une électrode de référence plongée dans une solution à analyser qui est la fonction linéaire du pH.

II-2-2 Détermination de la granulométrie

La méthode de « sédimentation et décantation successive » a été utilisée pour l'analyse granulométrique à trois fractions (sables, limon et argiles) (figure 15).



Figure 15: Solution dans le cylindre

Ce principe d'analyse consiste à la dispersion des différentes particules du sol dilué par le métaphosphate de sodium. La vitesse de sédimentation V a été utilisée tel que

$$V = \frac{2 \cdot r^2 (D_s - D_l)}{9\eta}$$

r = rayon de particules supposant sphérique

D_s et D_l = densité de solide et de liquide

η = viscosité du liquide

Les sables se déposent beaucoup rapidement puis les limons et enfin les argiles.

- Calcul du pourcentage :

Les formules utilisées sont :

$$\begin{aligned}\% \text{sable} &= 100 - 2[L_{40} - L_{B40} + 0,36(t_{40}^\circ - 20)] \\ \% \text{argile} &= 2[L_{2h} - L_{B2h} + 0,36(t_{2h}^\circ - 20)] \\ \% \text{limon} &= 100 - (\% \text{sable} + \% \text{argile})\end{aligned}$$

Avec : L_{B40} : la lecture après 40s de blanc ;

L_{B2h} : la lecture après 2 h de blanc ;

L_{40} : la lecture après 40 s de l'échantillon ;

L_{2h} : la lecture après 2 h de l'échantillon ;

t_{40}° : la t° après 40 s ;

t_{2h}° : la t° après 2 h ;

$0,36(t^\circ - 20)$: correction en température t° en $^\circ\text{C}$

Les valeurs de proportion des particules sont projetées sur le triangle de texture afin de déterminer la texture du sol.

II-2-3 Détermination du carbone organique

Le carbone organique (Corg) a été déterminé par la méthode de Walkley et Black (1934) qui comprend deux phases :

-l'oxydation du carbone organique par le bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$). L'excès sera ensuite déterminé à l'aide d'une solution de sulfate ferreux.

-La titration ou dosage de l'excès de bichromate de potassium en utilisant la diphénylamine comme indicateur d'oxydoréduction (figure 16).



Figure 16 : Titrage de solution

- calcul

$$C \text{ organique} = (N_{ox} V_{ox} - N_{red} V_{red}) 0,39 / \text{masse}$$

Avec : Ox= bichromate de potassium

Red= sulfate ferreux

Le taux de la MO est obtenu par la formule suivante :

$$MO\% = C \% \times 1,72$$

II-2-4 Détermination de l'azote total

L'Azote total a été analysé par minéralisation de Kjeldahl. Elle se fait en deux étapes: la minéralisation de l'azote organique et la distillation de l'azote.

Un mélange de 1g de sol à 0.5 mm de diamètre, 1 catalyseur de minéralisation et 10 ml d'acide sulfurique concentré a été chauffé fortement (environ 430 °C) pendant 30 minutes (figure 17). Cette solution a été ajoutée d'eau distillée après refroidissement. 10 ml de la prise d'essai et 10 ml de la solution de soude ont été introduites dans l'appareil à distillation de l'azote. Entraîné à la vapeur et fixé à l'état de borate, le distillat est ensuite dosé par une solution titrée d'acide sulfurique. La quantité d'azote dans 1g de sol est $(N \times V \times 50 / 10) \times 14 \times 10^{-3}g$. Dans 100 g de sol : $N = (N \times V \times 50 / 10) \times 14 \times 10^{-3} \times 100 g$ or $N = 0,01 N$ alors :

$$N \% = V \times 0,07$$



Figure 17 : Chauffage de la solution

II-2-5 Détermination du P_2O_5 assimilable

Le P_2O_5 assimilable a été déterminé par la méthode Bray II. Cette méthode consiste à extraire le phosphore du sol par la solution de molybdate d'ammonium et la solution diluée de chlorure stanneux.

2 g de sol à 2 mm de diamètre et 14 ml de la solution attractante ont été utilisés. La solution a été filtrée avec un papier filtre Watman N° 42 après une agitation pendant 1 mn. Le filtrat ainsi obtenu contient le P assimilable contenu dans l'échantillon de sol. Après l'étalonnage, il faut homogénéiser dans un tube à essai 2 ml de filtrat, 5 ml d'eau distillée, 2ml de la solution de molybdate d'ammonium et 1 ml de la solution diluée de chlorure stanneux. Il faut également attendre 20 mn pour la stabilisation de la coloration ainsi obtenue, puis effectuer les mesures au spectromètre UV/VIS à la longueur d'onde de 660 nm avec un facteur multiplicatif de 3,5 (figure 18).



Figure 18 : Spectromètre UV/VIS à la longueur d'onde de 660 nm

II-2-6 Détermination des bases échangeables

Les bases échangeables ont été déterminées par dosage spectrométrique des cations Ca^{2+} et Mg^{2+} en absorption atomique, puis de Na^+ et K^+ en émission de flamme. 10g de sol de 2mm de diamètre se mettent en contact avec 40 ml d'acétate d'ammonium 1M. Après avoir tournoyé et reposé la solution pendant 1 heure ou plus, elle doit être filtrée par un papier filtre. La lecture de chaque cation a ensuite été réalisée avec un spectromètre d'absorption atomique (figure 19). Le contenu de l'entonnoir sert à la détermination de la capacité d'échange cationique.



Figure 19 : Spectromètre d'absorption atomique

Calcul : $S = Ca^{++} + Mg^{++} + K^+ + Na^+$ (en méq/100g)

II-2-7 Détermination de la CEC ou T

La capacité d'échange cationique (CEC) a été mesurée à partir de la solution d'extraction des bases échangeables. En ajoutant 50 ml de la solution d'éthanol 60% dans l'entonnoir pour enlever le sel d'ammonium libre puis ajouter la solution de NaCl et faire l'extraction NH_4^+ . Cette opération se continue jusqu'à l'obtention d'un volume de 100 ml. Le dosage volumétrique est effectué sur le distillat. Un témoin est préparé dans les mêmes conditions.

- Calcul

CEC=Lecture de la concentration/masse atomique (en méq/100g).

Taux de saturation (V) : représente la proportion de CEC occupé par les cations échangeables, exprimé en %.

$$V\% = (S/T) \times 100$$

II-4 Traitements des données

II-4-1 Données et paramètres étudiés

Les données utilisées pour la vérification de l'hypothèse 1 sont les échantillons de chaque type de sol dans les trois districts de la zone d'étude (tableau 3).

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des roches et des sols rencontrés dans la zone d'étude.

| District | | Marovoay | | Majunga II | | Ambato-Boeny | |
|----------------------|------------------|----------|----|------------|----|--------------|----|
| Formation géologique | Type des sols | NE | NP | NE | NP | NE | NP |
| grès | Sols ferrugineux | 12 | 4 | - | - | 3 | 1 |
| | Autres sols | 22 | 8 | 15 | 5 | 9 | 3 |
| carapace sableuse | Sols ferrugineux | 10 | 4 | - | - | 8 | 3 |
| | Autres sols | 2 | 1 | - | - | - | - |
| TOTAL | | 46 | 17 | 15 | 5 | 20 | 7 |

NB : NE : nombres d'échantillon ; NP : nombre des profils

Ledit tableau montre le nombre des échantillons et des profils, et aussi les types de sol de chaque formation géologique gréseuse et carapace sableuse.

Les caractéristiques physico-chimiques: pH_{eau} , C, N, P, S, CEC, argile, limon, sable sont utilisées pour la vérification de l'hypothèse 2 (tableau 4).

Tableau 4 : Paramètre et facteur étudié

| Paramètre étudié | Facteur étudiée |
|---|---|
| Sol sur carapace x caractéristique physico-chimique selon la corrélation de l'ACP | Sol sur carapace sableuse <ul style="list-style-type: none"> • Sur pente forte • Sur pente faible |
| | caractéristique physico-chimique selon l'ACP (pH_{eau} , C, N, P, S, CEC, argile, limon, sable) <ul style="list-style-type: none"> • Corrélé positivement • Corrélé négativement |

NB : C : carbone ; N : azote ; P : phosphore ; S : somme des bases ; CEC : capacité d'échange cationique)

Les paramètres étudiés pour vérifier l'hypothèse 3 sont présentés avec les facteurs étudiés (tableau 4). Les paramètres comprennent les caractéristiques physico-chimiques corrélées au sol sur carapace sableuse que nous prendrons connaissance après l'ACP (Analyse en composante principal). Dans la rubrique facteur étudié se trouve la corrélation de l'ACP par comparaison des moyennes des échantillons prélevé dans les sols ferrugineux sur carapaces. Le sol sur carapace sableuse concerne le sol sur pente faible et sur pente forte.

II-4-2 Analyses statistiques

Après les différentes analyses au laboratoire, les données obtenues ont été traitées avec Excel 2010 de Microsoft et avec le logiciel libre R : les données sont présentées en graphique secteur pour identifier la proportion de type des roches et de type des sols dans chaque District.

Un ACP (Analyse en composante principal) a été utilisé pour effectuer les caractéristiques physico-chimiques de chaque échantillon prélevé dans les sols ferrugineux. Les résultats sont présentés schématiquement par un cercle des corrélations qui permet d'extraire rapidement les quantités des informations intéressantes (Baccini, 2010). Les fonctions granulométriques (Sable, limon, argile), le pH_{eau} , l'azote, le carbone, le phosphore, le magnésium, le calcium, le potassium, le sodium, et la CEC ont été les variables mesurés. Le cercle de corrélation présente les résultats statistiques suivants : chaque ligne représente une variable ; et l'angle que fait entre deux lignes donne la relation des variables. Deux variables séparés par un angle inférieur à 90° sont corrélés positivement, tandis que l'angle 180° représente une corrélation négative. Les angles 90° entres deux axes reflètent une indépendance.

Un test paramétrique «Test de Tuckey » a été employé pour déterminer les effets significatifs des facteurs étudiés (tableau 4) selon la corrélation de l'ACP par comparaison des moyennes. Le paramètre considéré pour ces facteurs est le p-value inférieur à 0,05. Les résultats sont décrits schématiquement par des « boîtes à moustaches » afin de représenter les distributions et les différentes valeurs qui résument les données statistiques : le minimum, les 3 quartiles Q1, Q2 (médiane), Q3, et le maximum (Le Guen, 2002).

II-5 Cartographie

II-5-1 Carte des sols et méthodologie d'aptitude

Dans notre travail, la cartographie des sols sert à importer la répartition spatiale de l'aptitude des plantes de reboisement au sol (tableau 5). Son rôle est de pouvoir localiser les degrés d'aptitude des plantes sélectionnées. Ce degré d'aptitude a été tiré de la méthode d'évaluation d'aptitude d'un sol diffusé par la FAO à partir des années 70. Selon cette méthode, l'aptitude culturale a été évaluée selon les différentes hiérarchies dans le tableau 5.

Tableau 5: Classe d'aptitude

| Niveaux | Classe d'aptitude |
|------------|--|
| S : apte | S1 : apte |
| | S2 : modérément apte |
| | S3 : marginalement apte |
| N : inapte | N1 : non apte pour des raisons économiques |
| | N2 : non apte pour des raisons physiques |

(FAO, 1976 ; Bartelli, 1979 ; Andrea *et al.*, 2001)

Le niveau S désigne les plantes aptes au sol. Ce niveau comporte trois classes : apte (S1), modérément apte(S2), marginalement apte (S3). Le niveau N indique les plantes inaptes au sol. Dans ce cas N1 implique l'inaptitude pour des raisons économiques et N2 pour des raisons physiques.

Les plantes de reboisement ou de lutte antiérosive ayant une écologie convenable au climat de la Région de Boeny ont été sélectionnées. Les Cinq paramètres de l'écologie de chaque plante ont été considérés pour l'identification de la classe d'aptitude. Cependant, la méthodologie est de faire correspondre l'écologie de chaque plante à celle du milieu de la zone d'étude. Ce sont la température, la pluviométrie, l'altitude, la texture et le pH du sol (annexe III). Lorsque les 5 paramètres considérés d'un échantillon du sol coïncident à l'écologie d'une plante, cette dernière est classée en S1. Si l'un des 5 paramètres de sol ne correspond pas à ceux

de la plante, elle est classée en S2. Quand il s'agit de deux des 5 paramètres de sol ne correspondent pas à ceux de la plante, elle est marginalement apte (S3). Les plantes inaptes (N2) au sol se regroupent dans les classes inférieures ou égales aux deux paramètres qui coïncident au sol en question. La classe N1 traitant l'aptitude pour des raisons économiques n'a pas été utilisée dans notre travail, car notre étude a été figée sur les caractéristiques morpho pédologiques et physico-chimiques du sol. Le groupe dominant des échantillons de même classe détermine la classe d'aptitude des plantes dans chaque type des sols ferrugineux.

Le tableau 6 présente les propositions des plantes de reboisements sélectionnées à partir de la comparaison d'écologie de chaque plantes avec l'écologie de la région.

Tableau 6: Propositions des plantes de reboisement

| Nom scientifique | Famille | Nom vernaculaire |
|---|-----------------------|---|
| <i>Anacardium occidentale</i> | <i>Anacardiaceae</i> | Pomme-cajou |
| <i>Cassia siamea</i> ; <i>Tamarindus</i> | <i>Caesalpinaceae</i> | Cassia du Siam Tamarinier |
| <i>Terminalia catappa</i> | <i>Combretaceae</i> | Badamier |
| <i>Sesbania</i> | <i>Fabaceae</i> | Agati |
| <i>kaya madagascariensis</i> <i>kaya senegaliensis</i> <i>Azadiracta indica</i> , | <i>Meliaceae</i> | Cailcédra Margoussier, Nim |
| <i>Acacia mangium</i> <i>Acacia albida</i> <i>Albizia lebeck</i> <i>Calliandra calothyrsus</i> <i>Acacia auriculiformis</i> | <i>Mimosaceae</i> | Acacia soyeuse Faidherbier Acacia langue de femme ; Bois noir calliandre calothyrses Acacia à forme d'oreille |
| <i>Eucalyptus camaldulensis</i> <i>Melaleuca leucodendron</i> <i>Eucalyptus citriodora</i> | <i>Myrtaceae</i> | Eucalyptus Cajepontier Gommier citron |
| <i>Grevillea banksii</i> | <i>Proteaceae</i> | Grevillaire rouge |
| <i>Gmelina arborea</i> <i>Tectona grandis</i> | <i>Verbenaceae</i> | Peuplier d'Afrique Bois de teck |

(Ministère de la coopération, 1978 ; Département des eaux et forêt, 1993 ; Emile, 1998 ; <http://www.tela-botanica.org> ; [http:// www.xycol.net/](http://www.xycol.net/) ; <http://www.tropicos.org/>)

II-5-2 Cartographie par SIG

Du fait que la formation des sols est liée à la roche mère et au relief (Maurice *et al.*, 2011), ces deux facteurs ont été utilisés pour la réalisation de la délimitation spatiale des chaînes des sols (figure 20).

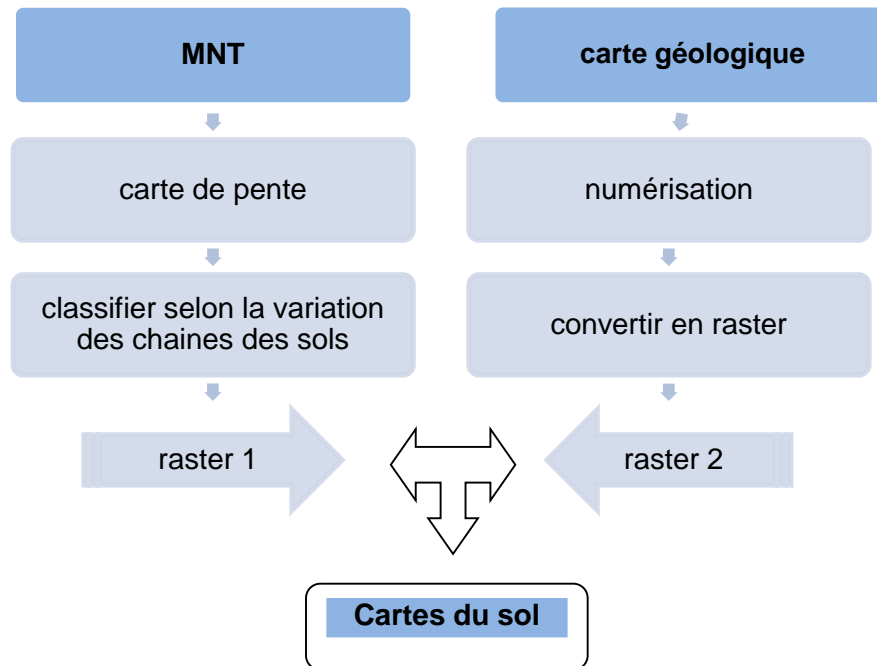


Figure 20 : Processus de réalisation de la carte des sols

Une carte de pente a été réalisée à partir d'un MNT (Modèle Numérique Terrestre) de 40m de résolution. Elles ont été classifiées selon les chaînes des sols rencontrés lors du travail sur terrain. Le raster obtenu a été combiné avec un raster de la formation géologique couvrant les points de prélèvement. Les cartes géologiques (raster) 100 000^{ème} portant la feuille numéro LM 40, LM41, NO40 ont été utilisées afin que le résultat de la délimitation spatiale soit plus précis. Ce «shapefile» obtenu par la numérisation a été converti en raster afin qu'il puisse se combiner avec la carte de pente. L'interaction des deux rasters (pente et géologie) a donné un nouvel raster qui délimite les différents types des sols. Le logiciel ArcGis 10.1 a été utilisé pour le traitement de la carte en employant la projection Laborde.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS

III-1 Distributions des points d'échantillonnage et des sols ferrugineux

III-1-1 Proportion des points d'échantillonnage dans les formations géologiques

Les points de prélèvement se répartissent dans des formations géologiques gréseuses et sur carapaces sableuses. Leur distribution dans chaque formation géologique est présentée dans les figures 21 et 22. Les sols ferrugineux ont des points d'échantillonnage moins important en grès tandis qu'ils sont plus abondants dans les carapaces sableuses.

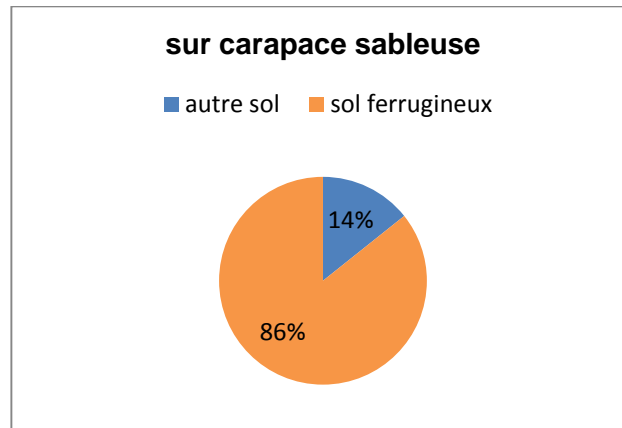


Figure 21: Proportion des points d'échantillonnage sur carapace sableuse

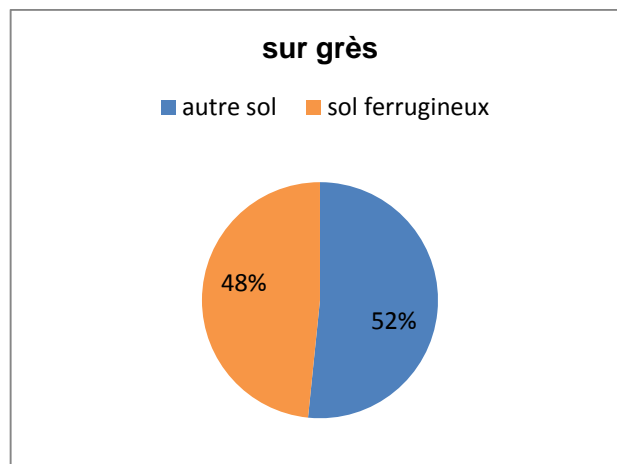


Figure 22: Proportion des points d'échantillonnage sur grès

III-1-2 Distribution des points d'échantillonnage des sols ferrugineux

Les sols ferrugineux rencontrés sur terrain sont groupées selon la formation géologique et la pente du relief (figure 23).

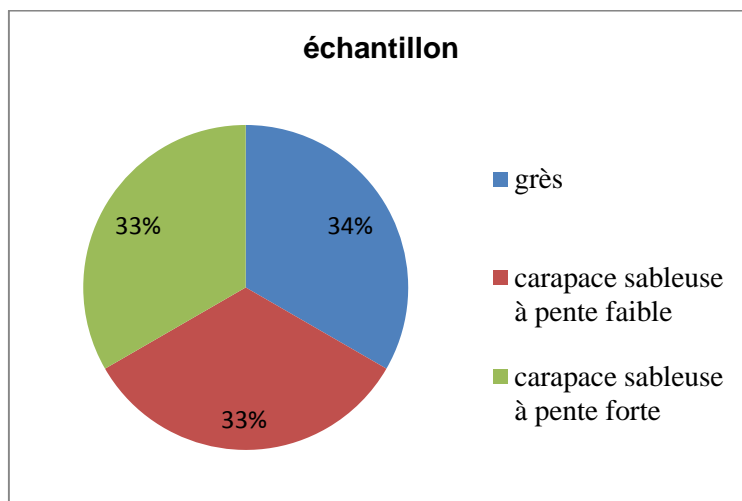


Figure 23: Proportion des groupes des sols ferrugineux

Les sols ferrugineux lessivés sur grès occupent 34% des échantillons ; 33% des sols sont sur la carapace sableuse à pente faible et 33% des sols sont sur la carapace sableuse à pente forte

III-1-2-2 Proportion des sols ferrugineux dans chaque District

Les points d'échantillonnages des sols ferrugineux repartissent dans trois Districts (figure 24).

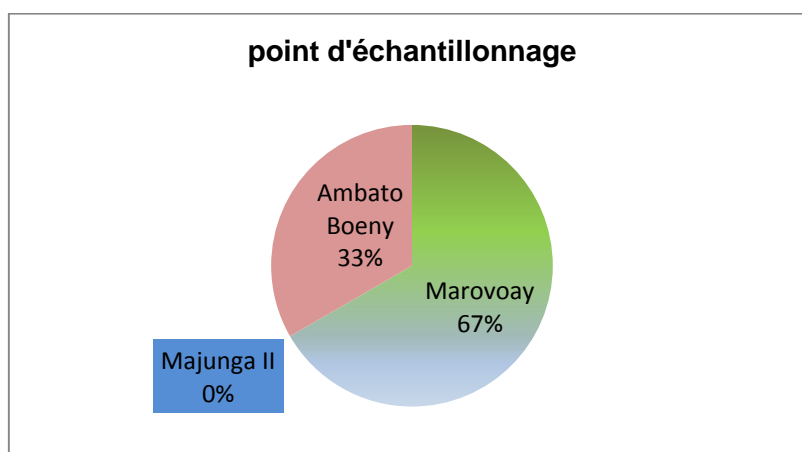


Figure 24: Distribution des sols ferrugineux par District

A Marovoay, 67% des sols sont prélevés à la fois dans des formations gréseuses et dans la carapace sableuse, 33% des sols appartiennent au district d'Ambato Boeny. Le District de Majunga II ne contient que des échantillons sur des autres types des sols.

III-2 Caractéristiques morpho pédologiques et physico-chimiques des sols ferrugineux

Les analyses détaillées des variabilités sont rapportés en annexe (annexe VIII).

III-2-1 Caractéristiques morpho pédologiques

Les caractéristiques morpho pédologiques ont été groupées selon la formation géologique et le degré de la pente. Toutes les échantillons ont une caractéristique similaire du point de vue structure et texture. Les sols ayant une texture sableuse et limono-sableuse ou sablo-limoneuse correspondent à une structure particulière ou grumeleuse. Tandis que les sols à texture limon très sableuse sont souvent à structure polyédrique. La description morpho pédologique de chaque échantillon est rapportée en annexes (annexe VII).

➤ Les sols ferrugineux lessivés sur grès

Les couleurs de ces sols sur le sommet est 2,5YR 3/6 (rouge foncé) à 2,5YR 4/6 (rouge) dans l'horizon supérieur et 2,5YR 4/6 (rouge) à 5YR 4/6 (rouge jaunâtre) en profondeur. Sur le versant, la couleur de la surface du sol varie de 7,5YR 3/2 (fort brun) à 7,5YR 4/4 (marron) et de 5YR 3/4 (brun rougeâtre) à 5Y 5/6 (olive) en profondeur.

Tableau 7 : Variation des textures des sols ferrugineux sur grès

| TEXTURE | PROFIL |
|-----------------------------------|------------------|
| Sableuse | 7SMMRS |
| Sablo-limoneuse à limono-sableuse | 13SMANK |
| limon très sableuse | 11SMANK, 12SMANK |

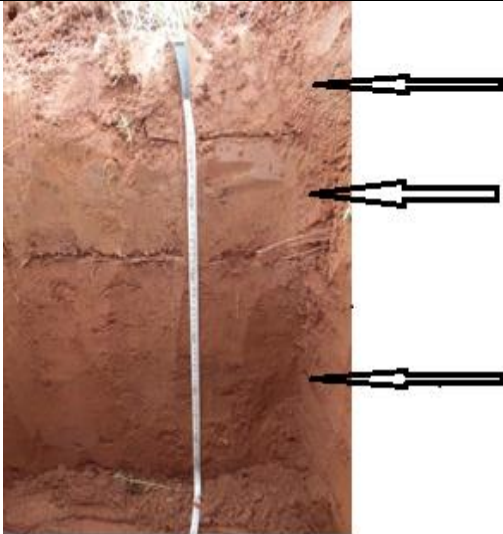
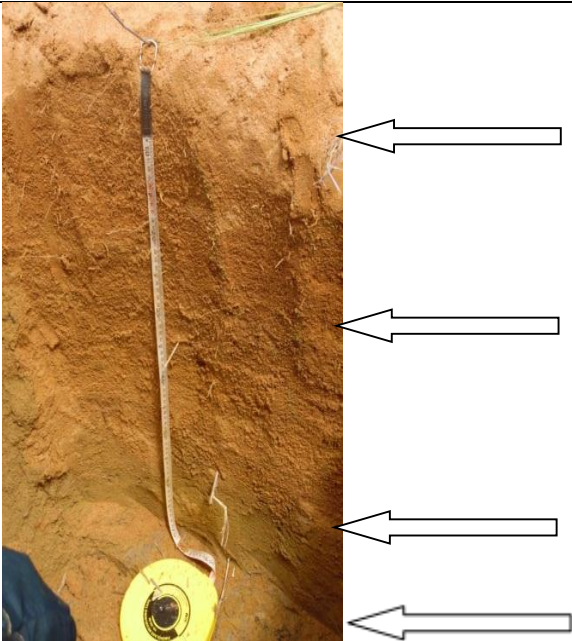
NB : 7, 11, 12, 13 : numéro du profil ; SM : nom des personnes qui ont participées à l'échantillonnage (Sahondra et Mirana) ; MRS : Marosakoa ; ANK : Ankazomborona.

Les profils de ces sols présentent une succession de texture sableuse, sablo limoneuse à limono sableuse, limon très sableuse (tableau 7), d'épaisseur variable et de topographie différente allant du sommet au versant. La porosité du sol est microporeuse dans l'horizon supérieur et poreuse dans les horizons sous-jacents. Les racines sont abondantes dans le niveau supérieur du profil et diminuent avec la profondeur. Le sol est humide vers la fin de la profondeur des profils. Des stratifications jaune et bleue apparaissent dans le fond des profils. Elles sont dues au lessivage d'argile et de fer ainsi qu'aux mouvements d'oscillation de l'eau dans le sol (figure 25). Le tableau 8 présente la description des profils types y concernant.



Figure 25: Stratification jaune et bleue

Tableau 8: Profils types des sols ferrugineux sur grès.

| Profils types | Description |
|--|--|
|  <p>Figure 26: Profil types d'un sol ferrugineux rouge lessivé (profil : 7SMMR)</p> <p><u>Localisation</u> X : 434589 Y : 1096833 Altitude : 71m</p> <p><u>Topographie</u> : sommet</p> | <p>0 - 13cm : texture sableuse, structure particulaire et facile à écraser par les doigts, abondance de racine et bonne porosité. Un peu humide. Couleur d'horizon 2,5YR 3/6 dark red (rouge foncé);</p> <p>13-27cm : texture sableuse, structure particulaire et facile à enfoncer le couteau, Plus humide moins abondante de racine et bonne porosité, la couleur de l'horizon est de 2,5YR 3/4 dark reddish brown (brun rougeâtre foncé) ;</p> <p>27cm et plus : texture sableuse, structure particulaire et facile à écraser par les doigts, Plus humide ; moins abondante de racine et bonne porosité, la couleur de l'horizon est de 2,5YR 4/6 red (rouge).</p> |
|  <p>Figure 27: Profil d'un sol ferrugineux jaune lessivé (profil : 13SMANK)</p> <p><u>Localisation</u> : X : 437430 Y : 1117838 Altitude : 53m</p> <p><u>Topographie</u> : versant</p> | <p>0 -34 cm : texture sablo-limoneuse, structure particulaire, friable et facile à écraser par les doigts, abondance de racine et bonne porosité couleur d'horizon 7,5YR 4/4 dark brown (brun);</p> <p>34-54cm : texture sableuse, structure pulvérulente. Un peu humide, peu de racine, la couleur de l'horizon est de 7,5YR 4/6 strong brown (fort brun) ;</p> <p>54-70cm texture LS, structure grumeleuse, difficile à enfoncer le couteau, stratification de couleur jaune et bleue, la couleur de l'horizon est de 5Y 4/4 olive ;</p> <p>70cm et plus : texture LS. structure polyédrique absence de racine .sol humide en profondeur, la couleur de l'horizon est de 5Y 5/6 olive.</p> |

➤ **Les sols ferrugineux lessivés sur carapace sableuse à pente forte**

La couleur de ces types de sols sur les versants est de 2,5 YR 3/2 (rouge foncé) à 5Y 3/6 (brun rougeâtre) et 3,5 Y 3/6 (rouge jaunâtre). Le sol a une couleur variée de 5YR 3/8 (gris) à 10YR 3/2 (brun foncé), dans le sommet. Ces couleurs du sol indique que le drainage est moyennement bien et les horizons est riche en fer.


Tableau 9: Variation des textures des sols ferrugineux sur carapace sableuse à pente forte

| TEXTURE | PROFILS |
|---------------------|-----------------|
| Sablo-limoneuse | 1SMMRS, 2SMMRS |
| Limon très sableuse | 3SMMRS, 31SMADF |

NB : 1, 2, 3, 31 : numéro du profil ; SM : nom des personnes qui ont participées à l'échantillonnage (Sahondra et Mirana) ; MRS : Marosakoa ; ADF : Andranofasika.

La texture du sol varie de sablo-limoneuse à limon très sableuse (tableau 9). L'infiltration d'eau dans ce sol est assez lente par rapport à la texture S. La rétention en eau est donc considérable. Le sol est poreux et l'enracinement est abondant dans la partie supérieure des horizons. Les racines diminuent vers la profondeur du profil. Le tableau 10 présente la description des profils types y concernant.

Tableau 10: Profil type des sols ferrugineux sur carapace sableuse à pente forte

| Profil type | Descriptions |
|--|--|
|  <p>Figure 28: Profil du sol sur carapace sableuse (profil : 1SMMRS) <u>Situation</u> : X : 434067 Y : 1102012 Altitude : 28m <u>Topographie</u> : versant</p> | <p>0 - 26 cm : texture sablo-limoneuse, structure grumeleuse et compacité facile à enfoncer le couteau, abondance de racine avec une bonne porosité. Présence de termite. et présence des cailloux 0,5 à 1 cm de diamètre et concrétion de couleur noire et rouge (dimension 1,2 cm) sur la partie supérieure. La couleur d'horizon est 2,5YR 3/2 dark red (jaune rouge) ;</p> <p>26 - 48 cm : texture sablo-limoneuse, structure grumeleuse et facile à enfoncer le couteau, peu de racine et bonne porosité ; la couleur de l'horizon est de 5YR 3/6 dark red ;</p> <p>48 cm et plus : texture sableuse .structure particulière et facile à écraser par les doigts, moins abondante de racine, la couleur de l'horizon est de 2,5YR 4/4 reddish brown (brun rougeâtre).</p> |

➤ **Les sols ferrugineux sur carapace sableuse à pente faible et modérée**

Sur le sommet plat, la couleur du sol varie de 7,5R 3/8 (rouge foncé) à 10R 3/6 (rouge) en surface et 2,5Y 4/4 (brun rougeâtre) à 10R 3/4 (rouge) dans la profondeur. Dans les versants la couleur est de 2,5YR 4/6 à 5YR 5/8 (rouge jaunâtre) dans la surface et 2,5YR 5/8 à 2,5YR 4/8 (rouge) dans la profondeur.

Tableau 11 : Variation des textures de sols ferrugineux sur carapace sableuse à pente faible

| TEXTURE | PROFILS |
|----------------------------|---------|
| Sablo-limoneuse | 5SMMRS |
| Sableuse | 30SMADF |
| Limono-argilo-sableuse | 29SMMNR |
| Limono-sableuse à sableuse | 32SMADF |

NB : 5, 30, 29, 32 : numéro du profil ; SM : nom des personnes qui ont participées à l'échantillonnage (Sahondra et Mirana) ; MRS : Marosakoa ; ADF : Andranofasika ; MNR :Manerinerina.

La texture du sol varie de sablo-limoneuse à limono-argilo-sableuse et, à sableuse (tableau 11). De ce fait, l'eau s'infiltré moyennement rapide dans le sol. Le sol a donc une moyenne

capacité de rétention en eau. La structure à dominance particulaire dans les profils des sols à sablo-limoneuse et sableuse implique que le sol a une structure instable par défaut de la granulométrie et par manque de ciment argilo-humique. Ce type de sol est vulnérable à l'érosion. L'enracinement est bon jusqu'à 50 cm de profondeur sur les sommets. Les racines sont peu jusqu'à 60 cm dans le sol sur versant. Elles sont absentes au plus de 60 cm. En général, le profil de sol est assez dense. Le tableau 12 présente la description de profil type y concernant.

Tableau 12: Profils types des sols ferrugineux sur carapace sableuse à pente faible


| Profil type | Description |
|--|---|
|  | <p>0 - 10 cm : texture sablo-limoneuse, structure particulaire et facile à enfoncer l'angady, en surface, présence de termitière jusqu'à 60 cm de haut, abondance de racine et bonne porosité .présence de termite Couleur 10 R 3/6 dark red ;</p> |
| | <p>10 - 25 cm : texture sablo-limoneuse. structure particulaire, facile à enfoncer le couteau, sol un peu humide. Abondance de racine, la couleur de l'horizon est de 10 R 3/4 dark red ;</p> |
| | <p>25 -60 cm : texture sablo-limoneuse structure particulaire, facile à enfoncer l'angady, présence de grande racine, la couleur de l'horizon est de 10 R 3/4 dark red.</p> |

Figure 29: Profil d'un sol ferrugineux sur carapace à Befotoana (profil : 5SMMS)

Localisation : X : 433515
Y : 1094148
Altitude : 96m

Topographie : versant

III-2-2 Caractéristiques physico-chimiques

III-2-2-1 Distributions des teneurs en fonctions des sols ferrugineux

Le tableau ci-dessous représente le minimum, le maximum, et la moyenne des teneurs des sols ferrugineux selon la formation géologique.

Tableau 13 : Distribution des teneurs des sols ferrugineux

| Propriétés physico-chimiques | Unité | sol ferrugineux sur carapace sableuse | | | | sol ferrugineux sur grès | | | |
|------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------|---------|----------|--------------------------|--------|---------|----------|
| | | min | max | Moyenne | écartype | min | max | Moyenne | écartype |
| pH _{eau} | | 4.34 | 5.58 | 4.78 | 0.35 | 4.10 | 5.24 | 4.62 | 0.34 |
| C | g kg ⁻¹ | 0.70 | 12.50 | 2.70 | 2.70 | 0.50 | 6.40 | 2.80 | 1.99 |
| N | g kg ⁻¹ | 0.10 | 1.00 | 0.30 | 0.20 | 0 | 0.90 | 0.30 | 0.23 |
| C/N | | 2.34 | 17 | 10.22 | 4.18 | 2.64 | 26.64 | 12.56 | 5.64 |
| P | ppm | 0.30 | 18.60 | 3.55 | 4.08 | 0.50 | 36.60 | 6.72 | 10.64 |
| Ca | cmol _c kg ⁻¹ | 0.04 | 20.50 | 3.91 | 7.01 | 0.07 | 12 | 2.59 | 3.85 |
| Mg | cmol _c kg ⁻¹ | 0.12 | 42.5 | 5.42 | 10.99 | 0.02 | 29.20 | 5.05 | 9.27 |
| K | cmol _c kg ⁻¹ | 0.03 | 4.87 | 0.75 | 1.48 | 0.07 | 0.90 | 0.37 | 0.28 |
| Na | cmol _c kg ⁻¹ | 0.10 | 4.13 | 0.82 | 1.19 | 0.12 | 1.61 | 0.59 | 0.45 |
| S | cmol _c kg ⁻¹ | 0.49 | 62.13 | 10.89 | 19.33 | 0.32 | 43.21 | 8.59 | 13.59 |
| CEC | cmol _c kg ⁻¹ | 1.80 | 84.10 | 14.11 | 21.53 | 2.00 | 43.20 | 12.95 | 12.59 |
| V | | 14.31 | 115.70 | 46.31 | 32.02 | 8.71 | 102.15 | 49.16 | 34.16 |
| Argile | g kg ⁻¹ | 60 | 180 | 105.60 | 37.10 | 40 | 230 | 115.30 | 64.35 |
| limon | g kg ⁻¹ | 0 | 230 | 47.20 | 52.90 | 30 | 270 | 94.70 | 71.10 |
| Sable | g kg ⁻¹ | 690 | 920 | 847.20 | 63.80 | 690 | 910 | 790 | 80.98 |

Le tableau 13 nous montre que le pH_{eau} a une teneur min-max de 4.34 - 5.58 et une moyenne \pm SD de 4.77 ± 0.35 dans le sol ferrugineux sur carapace sableuse. Sa teneur min-max est de 4.1 - 5.24 avec une moyenne \pm SD de 4.62 ± 0.34 sur grès. L'acidité du sol se trouve donc de l'extrêmement acide à très fortement acide. Le C a une teneur min-max de 0.70 - 12.50 g kg⁻¹ et une moyenne \pm SD de 2.70 ± 2.70 g kg⁻¹ dans le sol ferrugineux sur carapace sableuse. Sa teneur min-max est 0.50 - 6.40 g kg⁻¹ avec une moyenne \pm SD de 2.80 ± 1.99 g kg⁻¹ sur grès. Le N a une teneur min-max de 0.1 - 1 g kg⁻¹ et une moyenne \pm SD de 0.30 ± 0.2 dans le sol ferrugineux sur carapace sableuse. Sa teneur min-max est 0 - 0.9 avec une moyenne \pm SD de 0.3 ± 0.23 g kg⁻¹ sur grès. La teneur moyenne \pm SD de C/N est de 10.22 ± 4.18 sur carapace sableuse et de 12.56 ± 5.64 sur grès. Ces teneurs inférieures à 15% indiquent que la décomposition de matière organique est très élevée dans le sol ferrugineux. Le P a une teneur min-max de 2.34 - 17 ppm et une moyenne \pm SD de 3.55 ± 4.08 ppm dans le sol ferrugineux sur carapace sableuse. Sa teneur min-max est 0.50 - 36.60 ppm avec une moyenne \pm SD de

6.72 ± 10.64 ppm sur grès. Ces teneurs indiquent que les sols ferrugineux sur carapace sableuse sont pauvres en P assimilable alors que le sol ferrugineux sur grès a une teneur en P moyenne.

Caractéristique des complexes absorbant :

- Cations échangeables : Le Ca a une teneur min-max de $0.40 - 20.5$ cmol_c kg⁻¹ et une moyenne \pm SD de 3.91 ± 7.01 cmol_c kg⁻¹ dans le sol ferrugineux sur carapace sableuse. Sa teneur min-max est $0.07 - 12$ cmol_c kg⁻¹ avec une moyenne \pm SD de 2.59 ± 3.85 cmol_c kg⁻¹ sur grès. Le Mg a une teneur min-max de $0.12 - 42.5$ cmol_c kg⁻¹ et une moyenne \pm SD de 5.42 ± 10.99 cmol_c kg⁻¹ dans le sol ferrugineux sur carapace sableuse. Sa teneur min-max est de $0.02 - 29.02$ cmol_c kg⁻¹ avec une moyenne \pm SD de 5.05 ± 9.27 cmol_c kg⁻¹ sur grès. Le K a une teneur min-max de $0.03 - 4.87$ cmol_c kg⁻¹ et une moyenne \pm SD de 0.75 ± 1.48 cmol_c kg⁻¹ dans le sol ferrugineux sur carapace sableuse. Sa teneur min-max est $0.07 - 0.9$ cmol_c kg⁻¹ avec une moyenne \pm SD de 0.37 ± 0.28 cmol_c kg⁻¹ sur grès. Le Na a une teneur min-max de $0.1 - 4.13$ cmol_c kg⁻¹ et une moyenne \pm SD de 0.82 ± 1.19 cmol_c kg⁻¹ dans le sol ferrugineux sur carapace sableuse. Sa teneur min-max est $0.12 - 1.61$ avec une moyenne \pm SD de 0.59 ± 0.45 sur grès.

- Somme des bases échangeables (S) : La teneur min-max de S est de $0.49 - 62.12$ et une teneur moyenne \pm SD de 10.89 ± 19.33 cmol_c kg⁻¹ sur carapace. Sa teneur min-max est de $0.32 - 43.21$ avec une moyenne \pm SD de 8.59 ± 13.59 cmol_c kg⁻¹ sur grès. Ces teneurs sont moyennes pour un sol ferrugineux.

- CEC : Elle a une teneur min-max de $1.8 - 84.1$ cmol_c kg⁻¹ et une moyenne \pm SD de $14.11 - 21.53$ cmol_c kg⁻¹ sur carapace. Sa teneur min-max est de $2 - 43.20$ cmol_c kg⁻¹ avec une moyenne \pm SD de 12.95 ± 12.59 cmol_c kg⁻¹ sur grès.

Caractéristique des fractions granulométriques (argiles, limons, sables)

Les argiles ont une teneur min-max de $60 - 180$ g kg⁻¹ et une teneur moyenne \pm SD de 105.6 ± 37.1 sur carapace. Sa teneur min-max est de $40 - 230$ g kg⁻¹ avec une moyenne \pm SD de 115.3 ± 64.35 g kg⁻¹ sur grès. Les limons ont une teneur min-max de $0 - 230$ g kg⁻¹ et une teneur moyenne \pm SD de 47.2 ± 52.9 sur carapace. Sa teneur min-max est de $30 - 270$ g kg⁻¹ avec une moyenne \pm SD de 94.7 ± 71.1 g kg⁻¹ sur grès. Les sables ont une teneur min-max de $690 - 920$ g kg⁻¹ et une teneur moyenne \pm SD de 847.2 ± 63.8 sur carapace. Sa teneur min-max est de $690 - 910$ g kg⁻¹ avec une moyenne \pm SD de 790 ± 80.98 g kg⁻¹ sur grès.

III-2-2-2 Liaison des teneurs physico-chimique des sols ferrugineux

Le cercle de corrélation montre les liaisons des caractéristiques physico-chimiques du sol ferrugineux sur grès (figure 30) et sur carapace sableuse (figure 31). L'interprétation s'effectue à partir de la position des variables considérées par rapport à l'axe ainsi que par rapport aux angles que fait entre les variables.

✓ Sol ferrugineux sur grès

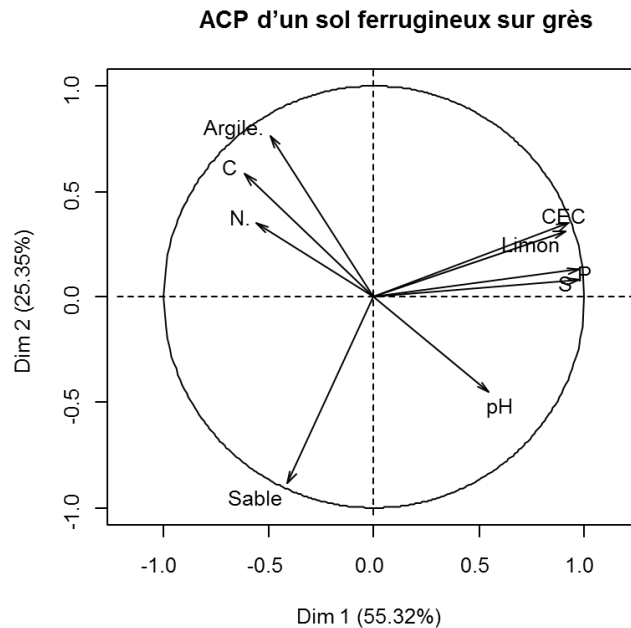


Figure 30: Cercle de corrélation des caractéristiques physico-chimiques sur grès

Par rapport à l'axe : 55.32 % des caractéristiques physico-chimiques se trouvent sur la dimension 1 et 22.35 % sont sur la dimension 2. Le P et S sont fortement corrélés positivement aux sols ferrugineux sur grès.

Par rapport aux variables considérées : la CEC et limon forment un angle inférieur à 90° , de même le S et P. Ils sont groupés dans la partie positive de la dimension 1. Ceci implique que la CEC et limon ; ainsi que la S et P sont liés positivement. L'argile, C et N sont groupés dans la partie positive de la dimension 2. Ils forment un angle inférieur à 90° entre eux. Donc, l'argile est corrélée positivement au C et au N. Ce qui signifie que la teneur en N dépende de la teneur en C dans le sol ferrugineux sur grès.

La liaison positive de la CEC et du limon signifie une dépendance de ses deux caractéristiques ; c'est-à-dire que sur un sol ferrugineux ayant une teneur limon élevée, la CEC dans ce sol est grande.

Le pH se situe dans la partie positive de la dimension 1 et dans la partie négative de la dimension 2. Il forme un angle 180° par rapport au C. Alors, le pH est lié négativement au C et N. Ceci signifie que l'acidité du sol a une liaison en C et N dans le sol. En effet, le pH est plus acide dans un sol ayant une faible teneur en C et en N.

Les sables se trouvent dans la partie négative des dimensions 1 et 2. Ils forment un angle 90° par rapport au C, N et pH. Alors, les sables sont indépendants au C, N et pH. Ceci implique que la teneur en sables dans le sol ferrugineux sur grès n'a aucune liaison à la teneur de C, N et pH.

✓ Sol ferrugineux sur carapace sableuse

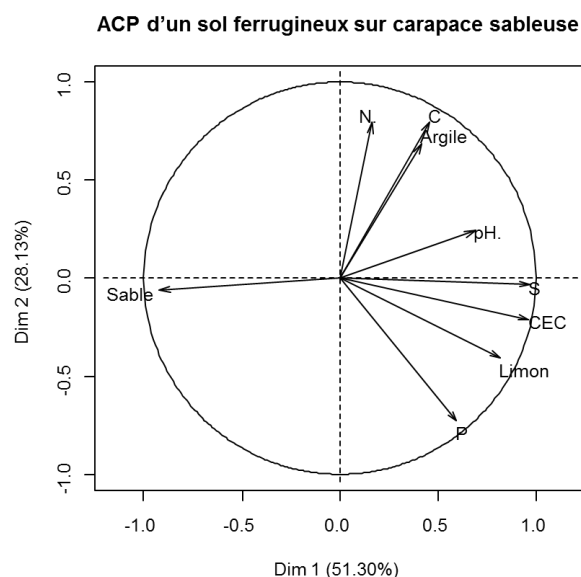


Figure 31: Cercle de corrélation des caractéristiques physico-chimiques sur carapace sableuse

51.30 % des caractéristiques physico-chimiques se trouvent sur la dimension 1 et 28.13 % sont dans la dimension 2 (figure 31). Par rapport à l'axe, le sable se trouve dans la partie négative des dimensions 1 et 2, il est proche de l'axe horizontale. Le sable est fortement corrélé négativement aux sols ferrugineux sur carapace sableuse. Ceci implique que l'abondance des teneurs en sable caractérise un sol ferrugineux sur carapace sableuse. La somme des bases (S) se trouve dans la partie positive de la dimension 1 et dans la partie négative de la dimension 2. La proportion des sols sur la dimension 1 est grande par rapport aux sols sur la dimension 2. La S est donc, liée positivement au sol sur carapace sableuse par rapport à l'axe horizontale. La S et sable sont alors les caractéristiques corrélées aux sols sur carapace sableuse par rapport à l'axe. Par rapport aux variables, le C et argile se trouvent dans la partie positive des dimensions 1 et 2. Ils forment un angle ponctuel. Ils sont fortement corrélés positivement dans le sol ferrugineux sur carapace sableuse. Leur liaison positive indique que l'argile a un effet sur le C dans le sol sur carapace. Le sable forme un angle 180° à la S. Le sable est lié négativement au S. Ce qui signifie que l'abondance de sable dans le sol ferrugineux sur carapace sableuse influe la diminution de la somme des bases échangeables. Ainsi, le C, argile, sable et S sont les caractéristiques corrélées entre eux dans le sol ferrugineux sur carapace sableuse.

✓ Effet significatif de caractéristiques physico-chimiques de sols sur carapaces sableuses selon la corrélation de l'ACP.

Selon l'ACP des sols sur carapace sableuse, les sables, la somme des bases échangeables, les argiles et le C sont les caractéristiques corrélées dans le sol (figure 31). D'ailleurs, les sols

ferrugineux sur carapace sableuse se divisent en deux types : les sols sur pente faible et sur pente forte. Alors, la corrélation des sols sur carapace sableuse (à pente forte et à pente faible) aux quatre caractéristiques physico-chimiques (C, argiles, sables et S) constituent les paramètres étudiés (tableau 14).

Tableau 14: Effet significatif de caractéristiques physico-chimiques selon la corrélation de l'ACP

| Paramètre étudié | Facteur étudiée | p-value | effet significatif |
|---|------------------------------------|---------|-------------------------|
| Sol sur carapace x caractéristique physico-chimique selon la corrélation de l'ACP | sol sur carapace sableuse x Argile | 0.902 | ' ' |
| | sol sur carapace sableuse x S | 0.008 | ' ** ' sur pente faible |
| | sol sur carapace sableuse x Sable | 0.0552 | '.' sur pente faible |
| | sol sur carapace sableuse x C | 0.0552 | '.' sur pente faible |

N.B : Signif. codes: '***' : hautement significatif ; '**' : très significatif ; '*' : moyennement significatif ; '.' : significatif ; ' ' : non significatif

L'effet significatif de ces corrélations réside dans le sol sur carapace à pente faible. Ainsi, la corrélation fortement négative de sable au sol est significative dans la pente faible, avec un p-value égal à 0.05. La corrélation positive de S au sol est très significative dans la pente faible avec un p-value égal à 0.008. La corrélation positive de C à l'argile dans le sol est significative dans la pente faible avec un p-value égal à 0.05. La corrélation positive d'argile est non significative dans la carapace sableuse (à pente forte et à pente faible).

La figure 32 présente l'effet significatif de la corrélation de somme des bases échangeables au sol ferrugineux sur carapace sableuse.

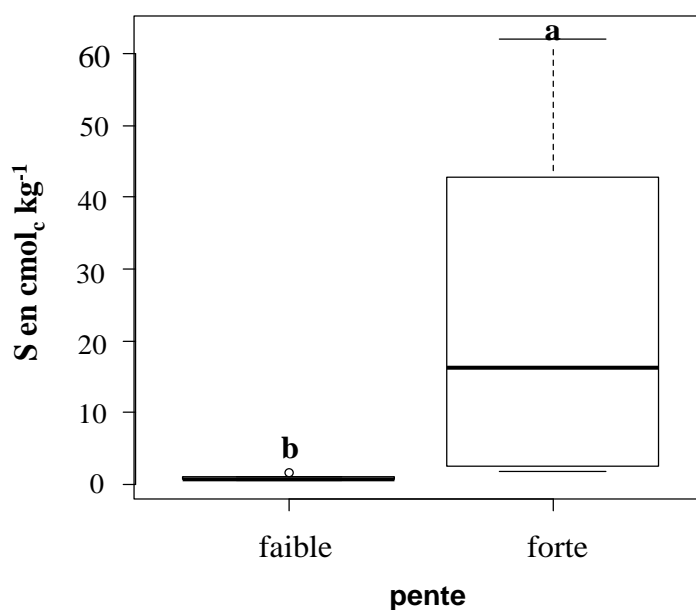


Figure 32: Présentation des effets de S au sol sur carapace sableuse

Le « a » désigne qu'il n'y a pas d'effet significatif sur la pente forte. La teneur varie de 1.85 cmol_c kg⁻¹ à 62.13 cmol_c kg⁻¹ avec une moyenne \pm SD de 23.43 ± 24.15 cmol_c kg⁻¹. Le « b » indique la présence d'effet de S au sol sur pente faible. En effet, la teneur min-max en S dans le sol à pente faible est de 0.49 cmol_c kg⁻¹ à 1.64 cmol_c kg⁻¹ avec une moyenne \pm SD de 0.85 ± 0.33 cmol_c kg⁻¹. De ce fait, la corrélation de S aux sols est très significative dans le sol ferrugineux sur carapace sableuse à pente faible avec un p-value égal à 0.008 (tableau 14).

La figure 33 présente l'effet significatif de la corrélation des sables au sol ferrugineux sur carapace sableuse.

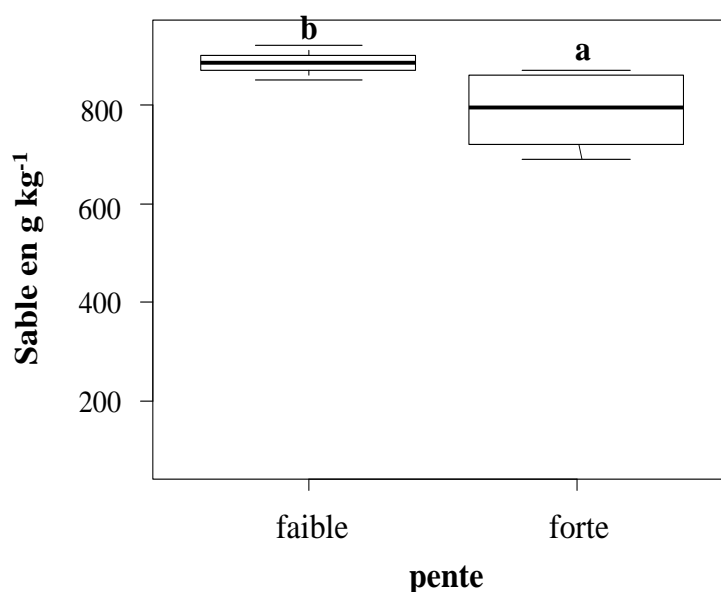


Figure 33: Présentation des effets de sable au sol sur carapace sableuse

Le « a » désigne l'absence d'effet significatif sur la pente forte. La teneur min-max en sable dans le sol sur carapace à pente forte est de 69 g kg^{-1} - 87 g kg^{-1} avec une valeur moyenne \pm SD de $80 \pm 6.68 \text{ g kg}^{-1}$. Le « b » sur le box plot à gauche désigne la présence d'effet significative de sable au sol sur carapace à pente faible. Ainsi, la teneur min-max en sable dans le sol sur carapace à pente faible est de 850 g kg^{-1} - 920 g kg^{-1} avec une valeur moyenne \pm SD de $88.5 \pm 2.5 \text{ g kg}^{-1}$. La corrélation fortement négative du sable au sol est significative dans le sol ferrugineux à pente faible avec un p-value égal à 0.05 (tableau 14). Ceci implique que l'abondance de sable qui influe la diminution des taux de somme des bases échangeables est significatif dans le sol sur carapace à pente faible.

III-3 Présentation spatiale des sols ferrugineux et aptitude culturale

La répartition des sols ferrugineux varie avec la formation géologique et la pente du relief. Selon la variation de la chaîne du sol observée sur terrain, la pente des reliefs gréseux se divise en 5 classes (annexe X). Dans ce cas, le sol ferrugineux occupe la pente moyenne. Sur la carapace sableuse où la pente se distingue en 3 classes (annexe XI), les pentes forte et faible sont occupées par des sols ferrugineux. La carte suivante présente la répartition des sols ferrugineux obtenue par la combinaison de carte de pente et formation géologique.

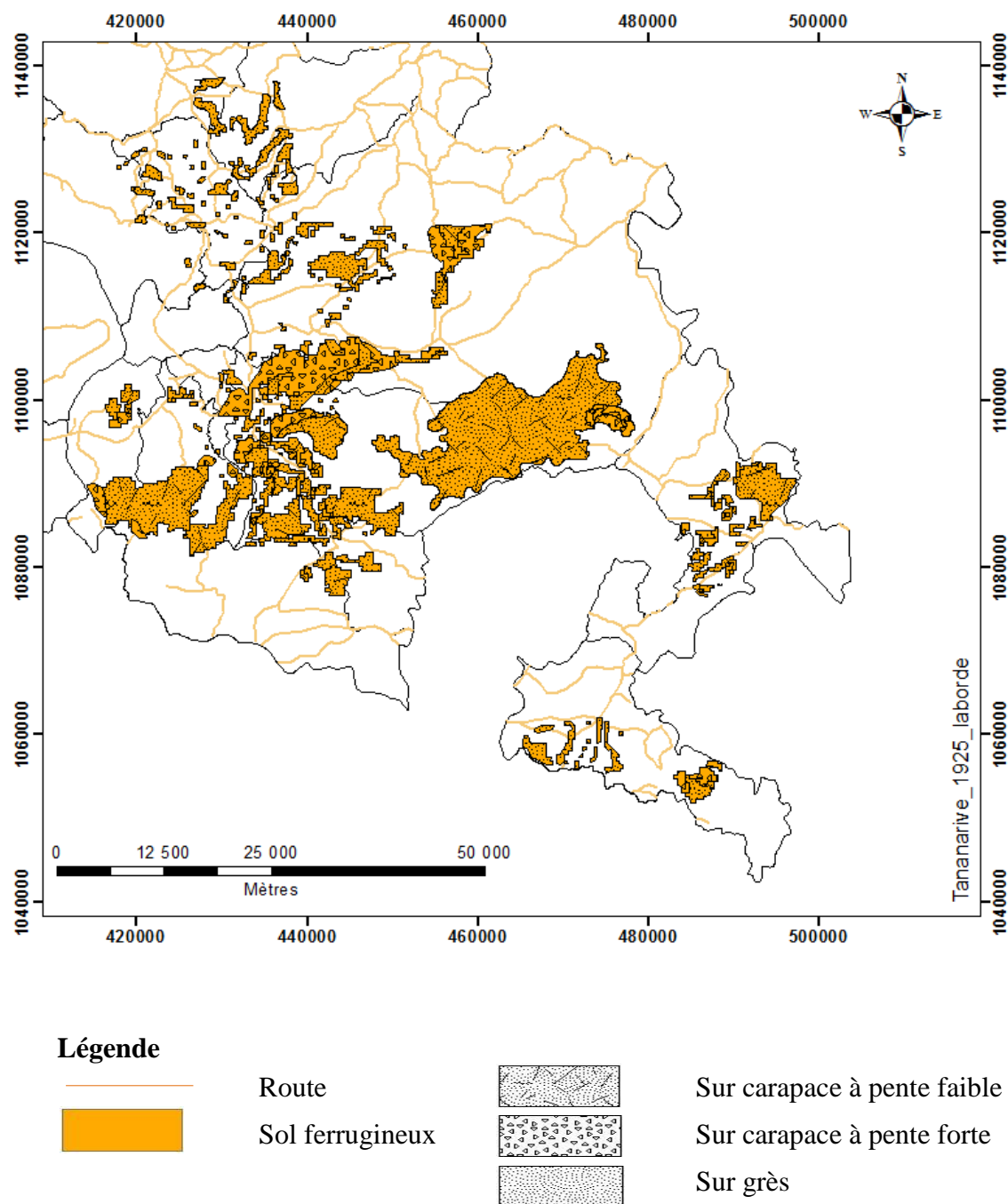


Figure 34 : Carte des sols ferrugineux de la zone d'étude
(Auteur, 2018 ; ArcGis 10.1)

Le sol ferrugineux sur carapace sableuse occupe la grande partie centrale de notre zone d'étude. Les sols sur grès se répartissent en plusieurs petits groupes dans la partie gauche en haut, et droite en bas de la carte, c'est à dire dans la partie nord-ouest et sud-est de la zone d'étude, effectivement dans la partie du district de Majunga II et d'Ambatoboeny. Les aptitudes des plantes de reboisements qui vont être insérées dans cette carte sont présentées dans le tableau 15.

Tableau 15: Aptitude culturale de sol pour des plantes de reboisement

| Nom scientifique | Famille | Sol ferrugineux sur grès | sol ferrugineux sur carapace à pente forte | sol ferrugineux sur carapace à pente faible |
|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--|---|
| <i>Anacardium occidentale</i> | <i>Anacardiaceae</i> | S1 | S2 | S2 |
| <i>Cassia siamea</i> | <i>Caesalpiniaceae</i> | S2 | S2 | S2 |
| <i>Tamarindus</i> | | S2 | S2 | S1 |
| <i>Terminalia catappa</i> | <i>Combretaceae</i> | S3 | S2 | S3 |
| <i>Sesbania</i> | <i>Fabaceae</i> | S1 | S1 | S1 |
| <i>kaya madagascariensis</i> | <i>Meliaceae</i> | S3 | S3 | S3 |
| <i>kaya senegaliensis</i> | | S1 | S1 | S1 |
| <i>Azadiracta indica</i> | | S2 | S2 | S3 |
| <i>Acacia mangium</i> | <i>Mimosaceae</i> | S2 | S2 | S2 |
| <i>Acacia albida</i> | | S1 | S1 | S1 |
| <i>Albizia lebbek</i> | | S2 | S2 | S2 |
| <i>Calliandra calothyrsus</i> | | S1 | S2 | S2 |
| <i>Acacia auriculiformis</i> | | S1 | S1 | S1 |
| <i>Eucalyptus camaldulensis</i> | <i>Myrtaceae</i> | N2 | S3 | S3 |
| <i>Melaleuca leucodendron</i> | | S2 | S2 | S2 |
| <i>Eucalyptus citriodora</i> | | N2 | S3 | S3 |
| <i>Grevillea banksii</i> | <i>Proteaceae</i> | S3 | S3 | S2 |
| <i>Gmelina arborea</i> | <i>Verbenaceae</i> | S3 | S3 | S2 |
| <i>Tectona grandis</i> | | S3 | S2 | S2 |

(NB : S1 : aptes ; S2 : modérément apte ; S3 : marginalement apte ; N2 : inapte.)

Les plantes de reboisement ont leur degré d'aptitude respective selon les trois classes des sols ferrugineux. En effet, quatre classes d'aptitudes sont observées : aptes (S1), modérément apte (S2), marginalement apte (S3) et inapte (N2).

- Plantes de reboisement aptes (S1) sur le sol ferrugineux :

Six plantes sont aptes dans la zone d'étude. Quatre parmi eux sont aptes pour toutes les trois classifications de sol ferrugineux. Ce sont : *Acacia albida*, *Acacia auriculiformis*, *kaya senegaliensis* et *Sesbania*.

Anacardium occidentale et *Calliandra calothyrsus* sont aptes uniquement dans le sol ferrugineux sur formation gréseuse tandis que *Tamarindus* sur le sol ferrugineux sur carapace sableuse à pente faible.

- Plantes de reboisement modérément apte (S2) sur le sol ferrugineux :

Douze plantes sont modérément aptes. Quatre plantes appartiennent à toutes les classifications de sol. Ce sont : *Acacia mangium*, *Albizia lebbek*, *Cassia siamea*, *Melaleuca leucodendron*. Cinq plantes sont modérément aptes dans deux types de sol dont *Anacardium occidentale*, *Calliandra calothyrsus* et *Tectona grandis* appartiennent aux sols sur carapace à pente faible et forte. D'ailleurs, *Azadiracta indica*, et *Tamarindus indicus* rapportent aux sols sur grès et sur carapace à pente forte. Deux plantes sont modérément aptes uniquement sur carapace sableuse ; comme le *Terminalia catappa* sur la pente forte et *Grevillia banksii* sur pente faible.

- Plantes de reboisement marginalement apte (S3) sur le sol ferrugineux :

Huit plantes ont un degré d'aptitude marginale dans la zone d'étude dont *kaya madagascariensis* seulement appartient à tous le type de sol. Cinq sont marginalement aptes sur deux types de sol. *Eucalyptus citriodora* et *Eucalyptus camaldulensis* sont liés aux carapaces sableuses à forte et faible pente. *Grevillea banksia* et *Gmelina arborea* correspondent aux sols sur grès et sur carapace à pente forte. Deux plantes : *Azadiracta indica*, et *Tectona grandis* sont marginalement apte sur un type de sol. En effet, la première correspond aux sols sur carapace à pente faible et la seconde sur grès.

- Plantes de reboisement inapte (N2) sur les sols ferrugineux :

Eucalyptus camaldulensis et *Eucalyptus citriodora* constituent les plantes de reboisement inapte seulement sur grès.

A la base de cette aptitude culturelle des sols (tableau 15), se fait la carte d'aptitude de chaque plantes de reboisement. Dans notre cas nous présentons deux cartes d'aptitude selon les types de plante. Ces deux cartes ont été choisies car elles représentent les différents degrés d'aptitude trouvée dans nos résultats. L'une des cartes est la carte d'aptitude d'*Anacardium occidentale* (figure 35). En termes de sylviculture, cette plante peut être utilisée comme des plantes de reboisement et plante agroforesterie. De plus cette plante peut être utilisée comme des bois de chauffe et leur fruit peuvent être exploités de raison économique. L'autre, *Eucalyptus* a été présenté aussi à titre d'exemple. Ces plantes sont utilisées pour les bois de chauffe, mais ils sont marginalement aptes sur des sols sur carapaces sableuse, et inaptes sur le sol ferrugineux sur grès (figure 36). Les cartes qui figurent les plantes de reboisement selon leur degré d'aptitudes : apte, modérément apte, marginalement apte et inapte sont aussi présentés dans les figures ci-après (figure 37 – 40).

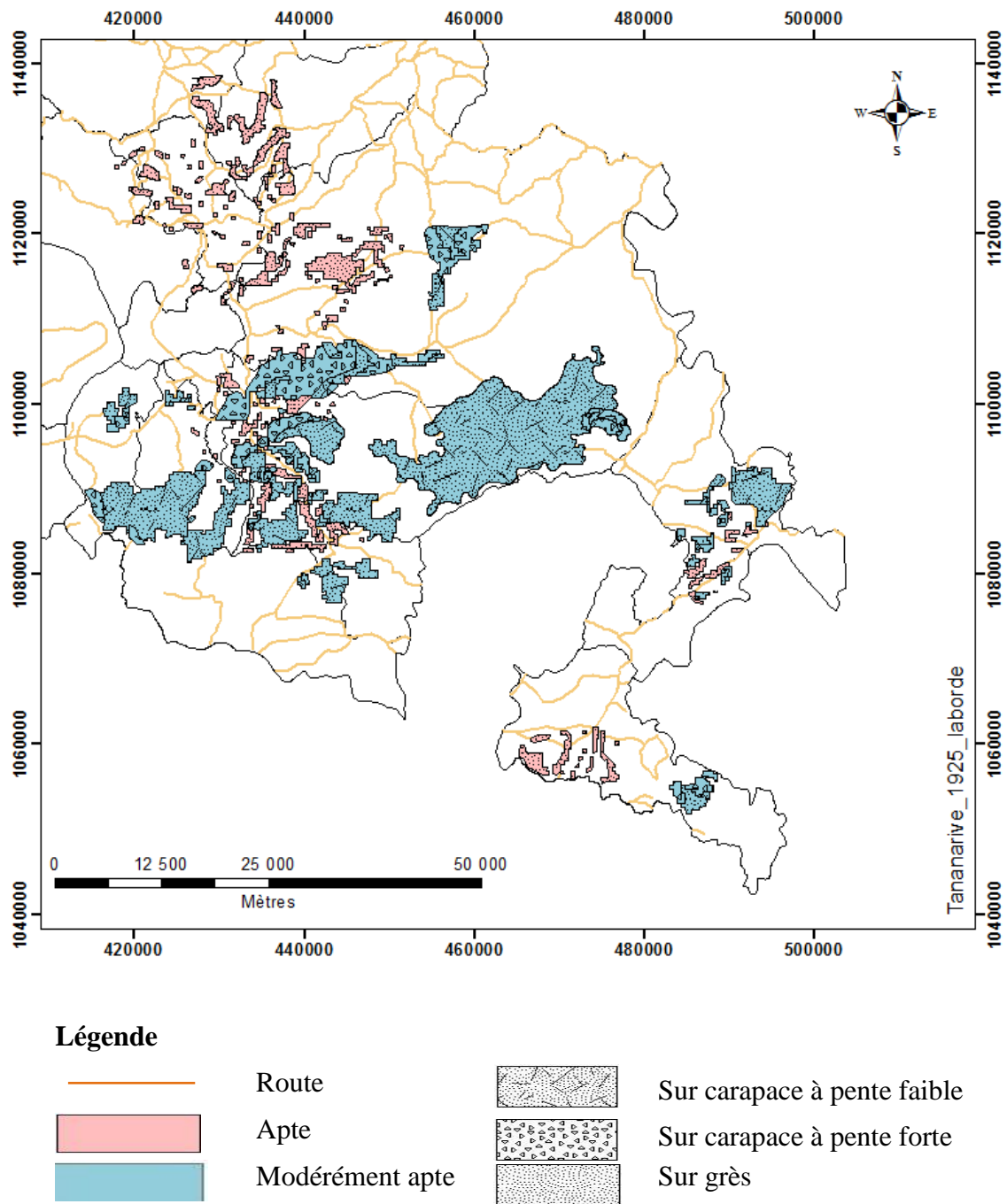


Figure 35: Carte d'aptitude d'*Annacardium occidentale*
(Auteur, 2018 ; ArcGis 10.1)

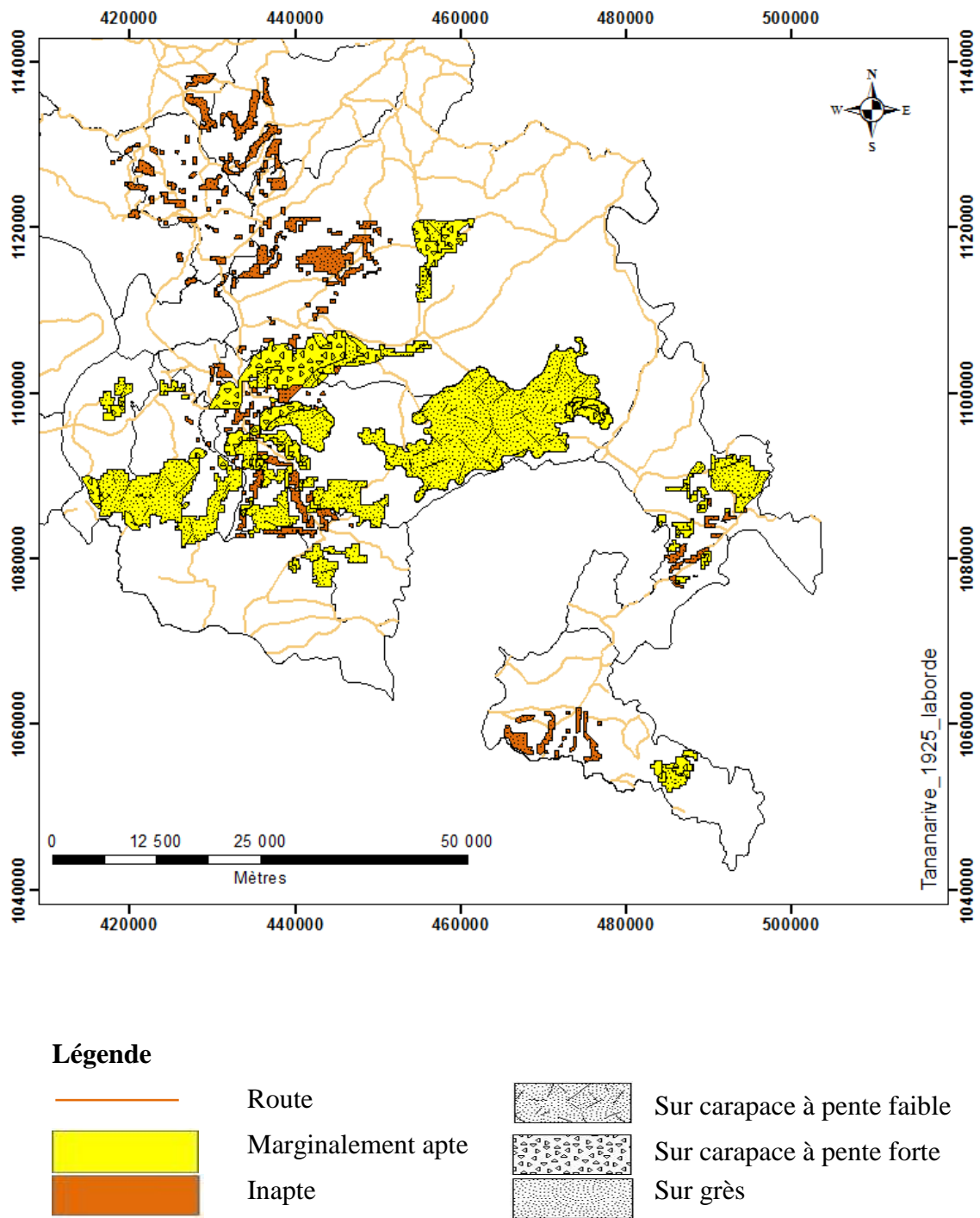


Figure 36: Carte d'aptitude d'*Eucalyptus*
(Auteur, 2018 ; ArcGis 10.1)

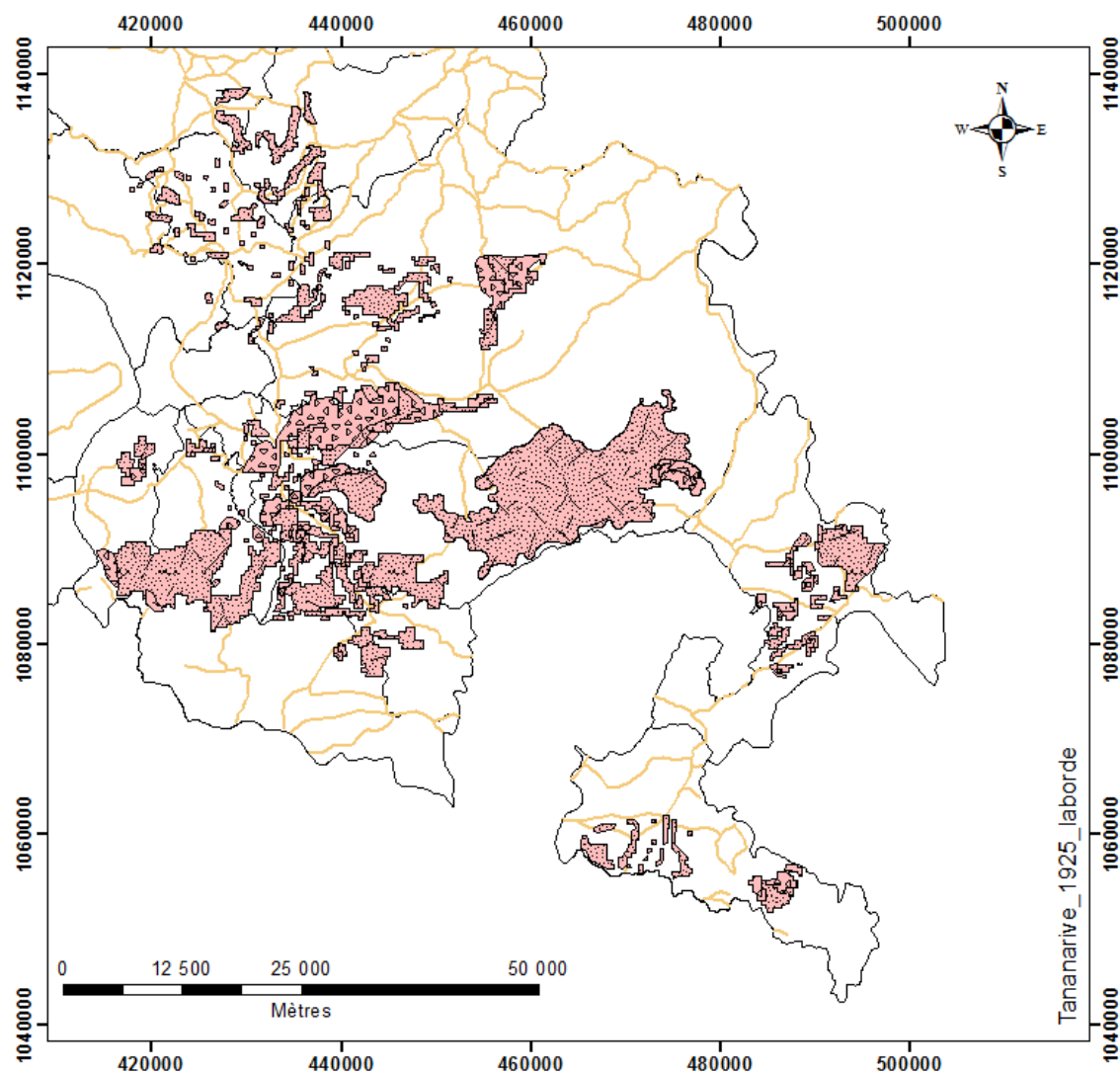







Figure 37: Carte de sol ferrugineux apte aux plantes de reboisements
(Auteur, 2018 ; ArcGis 10.1)

Légende

| | | | |
|---|--------------------------|--|---|
|  | Route | | |
|  | Apte | | |
|  | Sol ferrugineux sur grès |  | sol ferrugineux sur carapace à pente forte |
| <i>Acacia albida</i> | | <i>Acacia albida</i> | |
| <i>Acacia auriculiformis</i> | | <i>Acacia auriculiformis</i> | |
| <i>Annacardium occidentale</i> | | <i>kaya senegaliensis</i> | |
| <i>Calliandra calothyrsus</i> | | <i>Sesbania</i> | |
| <i>kaya senegaliensis</i> | | | |
| <i>Sesbania</i> | | | |
| | |  | sol ferrugineux sur carapace à pente faible |
| | | <i>Acacia albida</i> | |
| | | <i>Acacia auriculiformis</i> | |
| | | <i>kaya senegaliensis</i> | |
| | | <i>Sesbania</i> | |
| | | <i>Tamarindus</i> | |

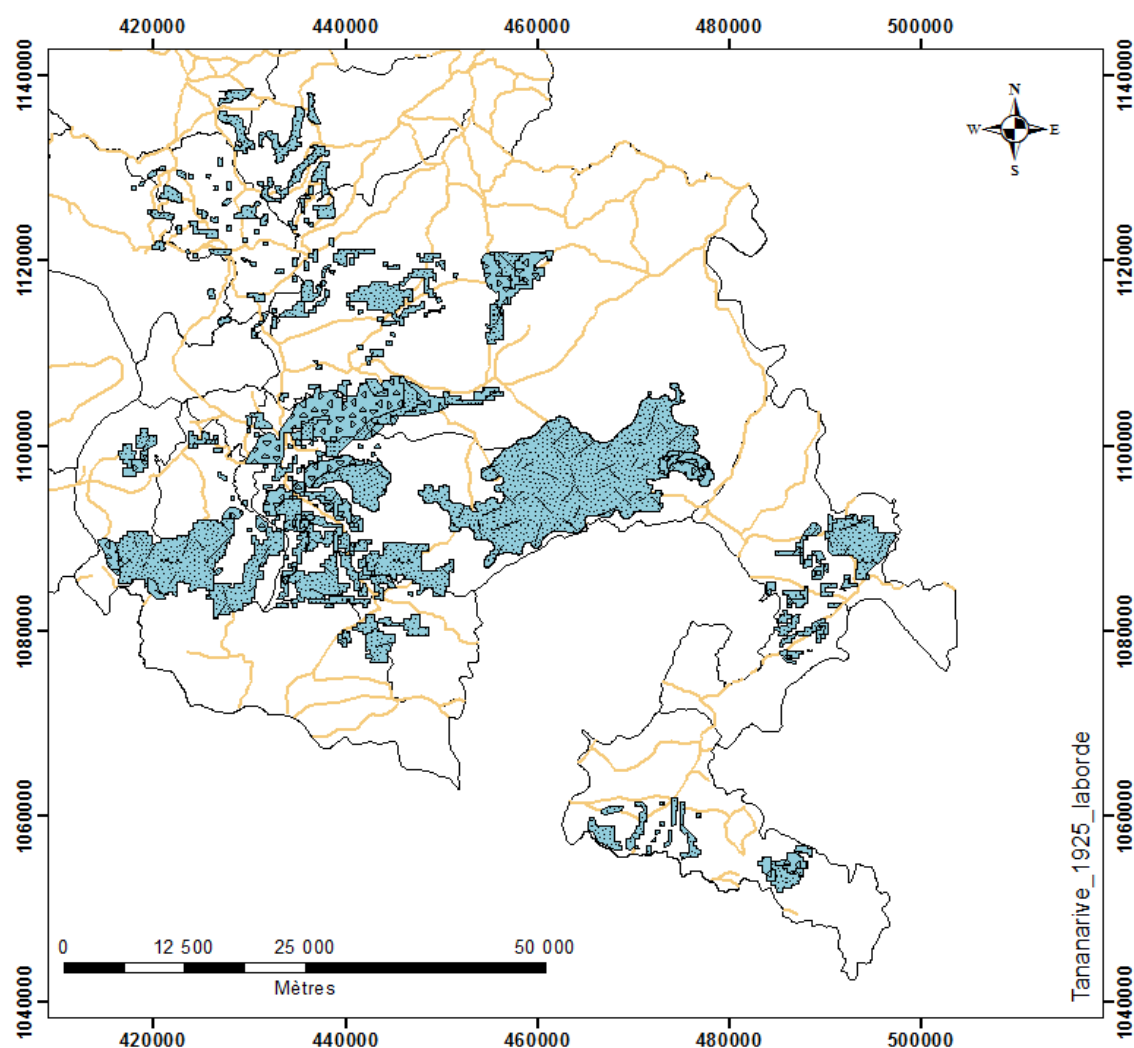


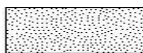




Figure 38: Carte sol ferrugineux modérément apte aux plantes de reboisements
(Auteur, 2018 ; ArcGis 10.1)

Légende

|  | Route |  | Modérément apte | | |
|---|-------------------------------|---|--------------------------------|---|---------------------------------|
|  | Sol sur grès |  | sol sur carapace à pente forte |  | sol sur carapace à pente faible |
| | <i>Acacia mangium</i> | <i>Acacia mangium</i> | | <i>Acacia mangium</i> | |
| | <i>Albizzia lebbeck</i> | <i>Albizzia lebbeck</i> | | <i>Albizzia lebbeck</i> | |
| | <i>Azadiracta indica,</i> | <i>Anacardium occidentale</i> | | <i>Anacardium occidentale</i> | |
| | <i>Cassia siamea</i> | <i>Azadiracta indica,</i> | | <i>Calliandra calothyrsus</i> | |
| | <i>Melaleuce leucodondron</i> | <i>Calliandra calothyrsus</i> | | <i>Cassia siamea</i> | |
| | <i>Tamarindus</i> | <i>Cassia siamea</i> | | <i>Gmelina arborea</i> | |
| | | <i>Melaleuce leucodondron</i> | | <i>Grevillea banksii</i> | |
| | | <i>Tamarindus</i> | | <i>Melaleuce leucodondron</i> | |
| | | <i>Tectona grandis</i> | | <i>Tectona grandis</i> | |
| | | <i>Terminalia catappa</i> | | | |

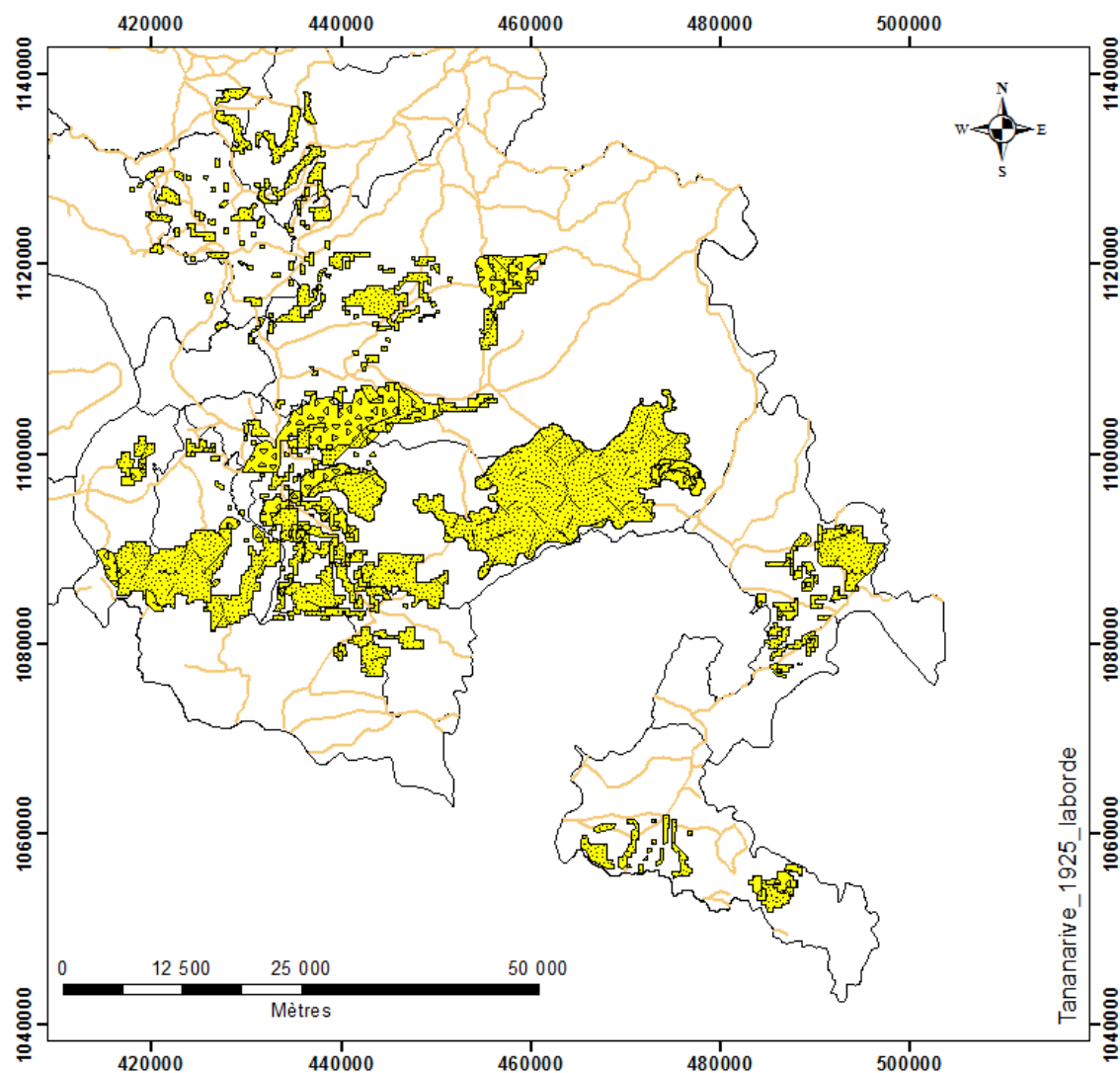


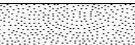




Figure 39: Carte de sol ferrugineux marginalement apte aux plantes de reboisements
(Auteur, 2018 ; ArcGis 10.1)

Légende

| | | | |
|---|--------------------------|---|---|
|  | Route | | |
|  | marginalement apte | | |
|  | Sol ferrugineux sur grès |  | sol ferrugineux sur carapace à pente forte |
| <i>Gmelina arborea</i> | | <i>Eucalyptus camalduensis</i> | |
| <i>Grevillea banksii</i> | | <i>Eucalyptus citriodora</i> | |
| <i>kaya madagascarien</i> | | <i>Gmelina arborea</i> | |
| <i>Tectona grandis</i> | | <i>Grevillea banksii</i> | |
| <i>Terminalia catappa</i> | | <i>kaya madagascarien</i> | |
| | |  | sol ferrugineux sur carapace à pente faible |
| | | <i>Azadiracta indica,</i> | |
| | | <i>Eucalyptus camaldulensis</i> | |
| | | <i>Eucalyptus citriodora</i> | |
| | | <i>kaya madagascarien</i> | |
| | | <i>Terminalia catappa</i> | |

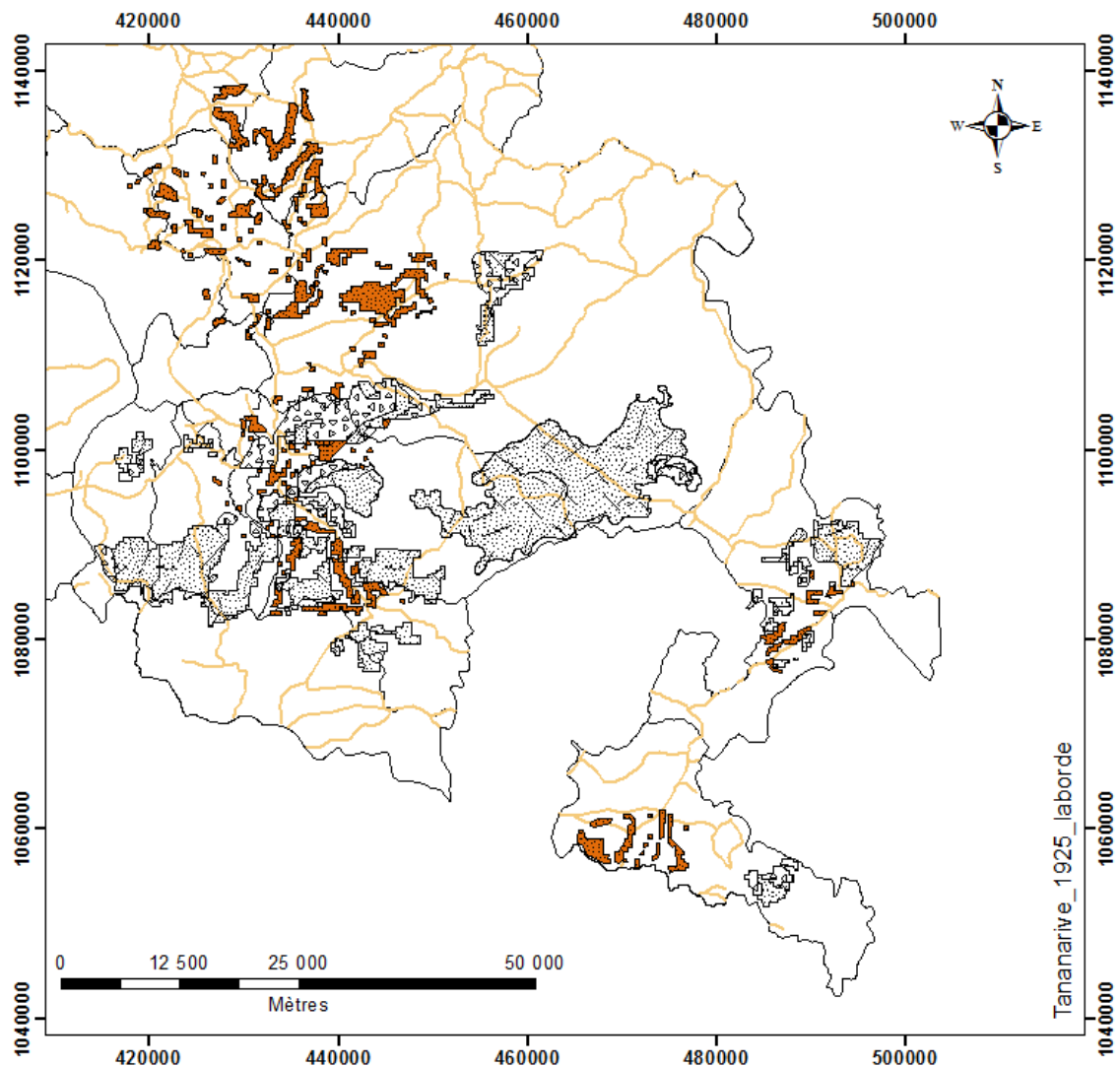


Figure 40: Carte de sol ferrugineux inapte aux plantes de reboisements
(Auteur, 2018; ArcGis 10.1)

Légende

- Route
 - inapte
 - Sol ferrugineux sur grès
 - sol ferrugineux sur carapace à pente forte
 - sol ferrugineux sur carapace à pente faible
- Eucalyptus camaldulensis*
Eucalyptus citriodora

QUATRIEME PARTIE: DISCUSSIONS

IV-1 Hypothèse 1 : l'ensemble de la formation géologique et relief influent-t-ils à la formation de sol ferrugineux dans la région Boeny?

Selon le résultat représentatif de la proportion des échantillonnages, le sol ferrugineux dans la région provient des formations sédimentaires gréseuses et des carapaces sableuses. Besairie (1972) a dit que dans la partie nord-ouest de Madagascar, la carapace sableuse constitue une formation récente dérivée d'une altération des roches détritiques gréseuses. En déduisant, il semble que tous les échantillons ont été hérités des formations gréseuses. Par ailleurs, les échantillons prélevés correspondent au sol ferrugineux et aux autres types de sols, que ce soit sur la carapace sableuse ou sur grès. En effet, sur carapace, 14 % conviennent aux autres types de sol et 86 % des sols sont ferrugineux ; tandis que sur grès, 52 % correspondent aux autres sols et 48 % aux sols ferrugineux. Deux constatations peuvent être déduites de cette proportion :

D'une part, les sols ferrugineux peuvent donc s'enchaîner avec d'autres types de sol. Cette chaîne de sol paraît être de la morphologie de terrain. Ceci a été affirmé par Randriamboavonjy (1993) lors de sa campagne d'étude dans la région de Morondava que, des chaînes des plusieurs types de sol pourraient apparaître sur un relief gréseuse accentué. Cependant, il a été mentionné que de l'amont vers l'aval, la succession des sols suivante a été rencontrée sur une formation gréseuse : lithosol – sols podzolique - sol ferrugineux – sol peu évolué - sol à tendance vertique. Le relief participe donc sur la formation des types de sols, il ne peut pas se séparer de la formation géologique. Calvet (2003) a dit que pour une étude de sol sur une surface réduite, il faut considérer les facteurs locaux qu'est l'ensemble roche mère – relief. D'autre part, cette proportion nous permet de dire que, même s'il existe d'autres types de sol qui dérivent de ses formations géologiques, le sol ferrugineux y est toujours présent. De plus, il paraît qu'on ne peut pas rencontrer ce type de sols dans des autres formations géologiques que sur des grès.

Le deuxième résultat de proportion des échantillons nous montre la distribution de différente classification des sols ferrugineux ainsi que leur répartition dans les trois District: Marovoay, Ambato Boeny et Majunga II. Rappelons que les sols ferrugineux rencontrés sur terrain ont été classifiés selon la roche mère et la pente de relief. Cependant, trois classes ont été identifiées : le sol ferrugineux sur grès, sur carapace à pente faible et sur carapace à pente forte. En effet, Marovoay présente 67 % d'échantillons prélevés à la fois dans des formations gréseuse et carapace sableuse. 33% des échantillons prélevés à Ambato Boeny sont dans des carapaces sableuses uniquement. Majunga II ne présente que des échantillons sur formation gréseuse. Ce sont des échantillons appartiennent à d'autre type de sol. L'inexistence de proportion de sol ferrugineux sur l'échantillonnage dans le district de Majunga II implique qu'il semble exister

une autre caractéristique de roches qui va faire naître ces autres types de sols. La formation géologique influe donc les types de sol.

Les deux constatations résultent que la roche mère constitue un facteur primordial de la formation de sol ferrugineux dans la région Boeny. Pourtant la pente de relief participe à la variation de sol selon la toposéquence. Il ne faut pas négliger les rôles des reliefs dans la formation de sol. Par conséquent, il faut prendre en considération l'association de formation géologique et la pente du relief pour l'identification de sol ferrugineux dans une zone plus réduite.

L'Hypothèse 1 « l'ensemble de formation géologique et relief influent-ils la formation de sol ferrugineux dans la région Boeny » est validée.

IV-2 Hypothèse 2 : les caractéristiques morpho pédologique et physico-chimique des sols ferrugineux trouvés dans la région correspondent-elles à celle des caractéristiques propice à un sol ferrugineux?

Dans la région Boeny nous avons constaté que la position de sols dans le paysage prédomine sur le glacié d'accumulation et sur les épandages provenance de grès. Chatelin, (1969) aussi a vu qu'en Afrique centrale, les sols ferrugineux occupent les glaciés à faible dénivellation souvent constitué d'accumulations détritiques continentales. Il en est de même pour le sol ferrugineux trouvé par Randriamboavonjy (1996) dans la région de Morondava. Dans ce cas, le sol ferrugineux rouge occupe la position surélevée d'une montagne et le sol ferrugineux jaune recouvre la zone légèrement plus déprimée, ce que nous avons rencontrés aussi sur terrain dans la carapace sableuse à pente forte de la zone d'étude. Cette succession de couleur du sol de l'amont vers l'aval d'un versant est trouvée dans le sol sur carapace sableuse à pente forte de la zone d'étude. La position des sols ferrugineux dans le paysage de la région est similaire à celle trouvée par Randriamboavonjy (1996) et Chatelin (1969).

D'après nos résultats, 4 profils sur 12 ont une texture sablo-limoneuse (SL) qui est égal au nombre de profils à texture limono très sableuse (LTS), 2 profils ont une texture sableuse, les deux autres profils correspondent à limono argilo-sableuse (LAS) et limono-sableuse (LS) à sableuse. Les autres profils varient de SL à LS ou à LTS. De ce fait, le sol est à dominance SL et LTS.

Le sol ferrugineux a souvent une texture sableuse (Roederer, 1971 ; Besairie, 1972 ; Besairie, 1973 ; Ségalen, 1977). Cette texture est observée sur le sommet des versants, mais pour notre cas, l'étude a été figée principalement sur le sol des versants. De ce fait, la dominance de la texture est liée à l'endroit de prélèvement c'est-à-dire le niveau de la toposéquence de relief et aussi à la végétation qui s'y trouve. En effet, sous l'action de l'érosion, les particules

fines se déplacent vers le bas versant et les sables restent au sommet pour donner une texture sableuse au sol à ce niveau (cas de sol au sommet d'un versant à Marosakoa, profil 7SMMRS). Ceci affecte le sol qui a subi une érosion en nappe (Roose, 1978). Cela ne signifie pas que tous les sols aux sommets sont à texture sableuse (cas de sol au plateau sur grès argillique à Ankazomborona, profil 12SMANK qui est à texture LTS). Cette zone est affectée par l'érosion mais la morphologie plane du sol ainsi que la cimentation par l'argile dans la roche mère minimisent la vitesse d'arrachement des particules fines par l'érosion en nappe. Par conséquent, la proportion des limons est encore conservée dans la texture.

La texture SL peut observer aussi sur le sommet d'un versant, cas de sol sur carapace à Marosakoa (2SMMRS) couvert par des *Hyparhénia Ruffa* (Verobe). Dans ce cas, le sol comporte suffisamment des éléments grossiers et des éléments colloïdaux pour former des agrégats, ils sont plus susceptibles d'avoir une bonne structure (Rabezandriny, 1993). L'érosion en nappe est donc absent car l'énergie de goutte de pluie est dissipé (Roose, 1999). La texture LAS rencontrée sur une formation superficielle à Manerinerina (29SMMNR), coïncide à la texture d'un sol ferrugineux énoncé par Hervieu (1961). Dans ce cas, une tendance au compactage peut apparaître.

Pour la structure des sols, en général l'horizon de surface est souvent particulière. Ils sont bien enracinés et poreux surtout sur les échantillons sur des carapaces sableuses (Hervieu, 1961 ; Besairie, 1973). Randriamboavonjy (1996) a trouvé aussi lors de l'étude des profils des types des sols de Madagascar. Ces structures particulières deviennent polyédrique surtout dans les horizons à texture LTS et LAS ; cas des échantillons trouvés sur grès et sur carapace à pente forte. Cette structure résulte souvent de la mise en contact de particules terreuses et de ciments minéraux (argiles) (Rabezandriny, 1993). Ainsi, l'existence de structure polyédrique caractérise un horizon ferrugineux, cette structure peut accompagner des texture argilo-sableuses ou sablo-argileuses (Baise, 2009). La structure du sol rencontrée dans la région correspond donc à la structure de sol ferrugineux déjà trouvé par des autres auteurs.

A propos de la couleur des sols suivant *le code Mensull*, la couleur du sol rougeâtre (2,5YR, 5YR ou 7,5YR, de *value* 4 à 7 et de *chroma* 6 à 8) domine la teinte de sol ferrugineux (Baise, 2009). Les sols de la zone étudiée possèdent ces couleurs. La couleur 2,5 YR 3/2 ou 3/4 ou 3/6 (rougeâtre) ; 2,5 YR 4/4 ou 4/6 ou 4/8 (rouge) ; 5 YR 3/3 ou 3/4 (brun rougeâtre) sont apparus dans tous les classe des sols. La couleur 7,5YR 3/2, 4/4, 4/6 (brunâtre) apparaît dans le sol sur grès et 7,5YR 3/8 (rouge foncé) sur carapace sableuse à pente faible. A part ces couleurs suscitées, la couleur 10R 3/6 (rouge foncé) apparaît dans le sol sur carapace sableuse à pente faible. Elle est remplacée par une couleur 10YR 5/3 (marron) dans le sol sur carapace sableuse

à pente forte. Les teintes 10YR et 10R sont absentes dans le sol sur grès. Toutefois, les horizons en profondeur ont la teinte 5Y 4/4 (olive) ou 5YR 4/6 (jaune rouge), et sont accompagnées par la teinte 2,5 YR (rouge) ou 7,5 YR (brun). En effet, la variation de couleur de sol trouvée convient effectivement donc aux sols ferrugineux.

Ce qui implique que les caractéristiques morpho-pédologique des profils de sols ferrugineux trouvés dans la région de Boeny sont propice à celle d'un sol ferrugineux formés sur des roches sédimentaire trouvé par des autres auteurs.

Du point de vue physico-chimique, plusieurs auteurs comme Hervieu (1961), Roederer (1971), Segalen(1977), Baise, (2008) ont trouvés que le sol ferrugineux a une réaction peu acide à neutre avec une valeur de $5,5 < \text{pH} < 6,5$. D'après nos résultats, le pH varie de 4,3 à 5,58 avec une moyenne \pm SD de $4,77 \pm 0,35$, sur carapace sableuse. Et dans le sol sur grès, le pH varie de 4,1 à 5,2 avec une moyenne \pm SD de $4,62 \pm 0,34$, cette valeur minimale appartient dans le deuxième horizon de 7SMMRS. Par rapport aux résultats de ces auteurs suscités, le pH moyen de sol ferrugineux compris entre 4,2 à 5 est acide, indépendamment de la formation géologique. Cette acidification du sol semble due aux types des plantes qui recouvrent le sol. Dans notre cas, la majorité des points d'échantillonnage sont sous des tapis graminéen à base d'*Hétéropogons* (Danga) formant après la dégradation des forêts sèches et les feux de brousse (Randriamboavonjy, 1996). Le sol sous ces plantes peut être acide. Le sol ferrugineux est un sol moyennement à faiblement acide, mais qui peut s'acidifier rapidement après défrichement (Dabin, 1985).

Le sol ferrugineux est pauvre en matière organique ($\text{MO} < 1\%$) avec un taux de C qui ne dépasse pas de 0,3 % soit 3 g kg^{-1} et la teneur de N ne doit pas dépasser de 0,1% soit 1 g kg^{-1} (Hervieu, 1966 ; Roederer, 1971 ; Segalen, 1977 ; Randriamboavonjy, 1996 ; Baise, 2008). Selon nos résultats, la teneur en C du sol ferrugineux varie de 0.1 g kg^{-1} à 1 g kg^{-1} et avec une moyenne \pm SD de $2.7 \pm 2.7 \text{ g kg}^{-1}$ dans le sol sur carapace sableuse, et 0.5 à 6.4 g kg^{-1} avec une moyenne \pm SD de $2,8 \pm 1.99 \text{ g kg}^{-1}$ sur grès. Quant à la teneur de N, le sol présente une moyenne \pm SD de $0.3 \pm 0.2 \text{ g kg}^{-1}$ que ce soit sur grès ou carapace. Cette valeur est inférieure à 1. Ainsi, la teneur en C et N dans la zone d'étude ressemble à la quantité déjà mentionné par des autres auteurs.

La teneur en phosphore total est environ de 2.5 ppm (Baise, 2008),. Lorsqu'on considère le pH du sol, la disponibilité de phosphore se produit dans l'intervalle de pH comprise entre 5.5 et 7 (Soltner, 2005). De ce fait, le phosphore migre peu dans le profil c'est-à-dire le déplacement du P est limité. D'ailleurs, la richesse variable en phosphore de l'horizon humifère est fonction de la richesse du substratum (Dabin, 1970).

En effet, la moyenne de P trouvé lors du résultat est de 3.5 ppm sur carapace et 6.7 ppm sur grès. Cette augmentation des teneurs dans le sol sur grès a été due à l'élévation de la teneur en P (cas d'échantillon en profondeur du profil 13SMANK, qui peut atteindre jusqu'à 36.6 ppm). Cette élévation de la teneur semble lier à la formation géologique grès argillique et calcaire. Dans ce cas, les anions phosphoriques sont liés à Ca^{2+} sur la surface de grains de CaCO_3 (Soltner, 2005). Ces liaisons permettent au phosphore d'être bien retenu, ce qui fait la source de la saturation dans le sol ainsi que la croissance de teneur en P.

Le P dans le sol ferrugineux de la région est donc faible sauf sur la formation gréseuse composé de calcaire. Ils ne sont donc pas facilement absorbés par la plante, du fait que le pH est acide ainsi que la texture est à dominance SL et LTS qui empêche le mouvement de P dans le sol.

Le sol ferrugineux est faible en réserve minérale avec une $S < 5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. La CEC de l'ordre de $10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ constitue une désaturation variable, ceci implique qu'un taux de saturation est inférieur à 50 % mais ne descend pas en dessous de 40 % (Hervieu, 1966 ; Segalen, 1977 ; Baise, 2008). Le S moyenne obtenue lors de l'analyse du sol est de $10,89 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ et $8,59 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, sur carapace et grès respectivement. Cette valeur semble plus élevé par rapport à celle que le S propice à un sol ferrugineux trouvé par Hervieu, 1966 ; Segalen, 1977 ; Baise, 2008. Par contre, lorsqu'on s'intéresse sur le V avec une valeur de 47.60. Ce dernier synchronise avec la saturation demeurant dans un sol ferrugineux.

Les caractéristiques suivantes : les C, N, P, et V de sol ferrugineux de la zone d'étude ressemblent réellement aux résultats déjà trouvé par Hervieu (1966) ; Roederer (1971) ; Segalen (1977) ; Randriamboavonjy (1996) ; Baise (2008).

Suite au cercle de corrélation sur carapace sableuse, les C faible, et abondance de sable, constituent les majeures caractéristiques des échantillons des sols ferrugineux. Lorsque le sol est très sableux, le C est faible. Contrairement, si le taux de sable diminue, le C augmente. Harmand (1998), a affirmé que les sols ferrugineux dérivés d'une formation sédimentaire sont pauvres en matière organique, très sableux en surface et argileux en profondeur. Il existe donc, une relation sur le taux de matière organique et la texture de sol sur carapace sableuse.

La richesse chimique peut être assez variable en fonction des propriétés des matériaux originels (Dabin 1967). Cette affirmation témoigne la corrélation positive de S dans le sol ferrugineux sur grès. Le sol pauvre en P assimilable est plus pauvre en azote, cas d'un sol ferrugineux lessivé (Dabin 1967). Cette liaison a été prouvée par la corrélation de P et N dans le sol ferrugineux sur grès dans cette étude.

L'hypothèse 2 « les caractéristiques morpho pédologique et physico-chimique des sols ferrugineux trouvés dans la région correspondent- elles à des caractéristiques propice à un sol ferrugineux ? » est validée.

IV-3 Hypothèse 3 : la délimitation spatiale des sols ferrugineux demeure-t-elle une guide de la réalisation de la lutte biologique du sol dans une grande espace géographique ?

D'après les résultats, la carte de sol ferrugineux représente la délimitation de chaque classe des sols ferrugineux selon leur degré de la pente et la formation géologique, ainsi que le degré des plantes de reboisement choisis. Par conséquent, la carte peut nous informer sur le choix des types des plantes apte sur un endroit bien déterminé. Mais, pour que ces plantes puissent bien développées, il faut que le sol doive être couvert par des végétaux le plus longtemps possible (Guil *et al.*, 2013). Pour cela il est indispensable d'associer ces plantes de reboisement par un couvert végétal multi-espèces pour nourrir la vie du sol. En effet, certaine plantes de reboisement appartient dans la famille des légumineuse. Leurs racines sont toujours couvertes de petites nodosités irrégulières qui sont des accumulations d'organismes microscopiques appelés des bactéroïdes. Ces bactéroïdes ont la propriété d'absorber directement l'azote de l'air enfermé dans le sol et de l'utiliser pour faire la synthèse de leurs composés azotés. Ainsi, les légumineuses ont la propriété d'enrichir le sol en azotates, sels qui, constituent des matériaux nutritifs très recherchés par les plantes. Aussi quelle que soit la pente, les techniques culturales, la fragilité du sol et l'agressivité climatique, un couvert végétal (peu importe son architecture et sa composition botanique pourvu qu'il atteigne 80 %) assure une excellente conservation du sol (Roose, 2012).

Ceci implique l'importance de la couverture végétale dans la protection du sol. Il peut assurer les meilleurs résultats pour améliorer l'infiltration d'eau de ruissellement, la production de biomasse et la conservation du sol. Il faut donc prendre en considération les caractéristiques des sols à protéger, afin de pouvoir implanter des plantes adéquates et aptes aux sols. La carte représente la répartition du sol de même caractéristique. Elle rend facile donc, la localisation des zones aptes à une plante donnée. Ceci a été prouvé par le cas représentatif de la répartition de l'aptitude d'*Annacardium* et de *Eucalyptus*. En regardant la carte, l'endroit ainsi que les différents degrés de son aptitude sont identifiés. Ce qui fait que, la cartographie des sols aide à avancer davantage à la lutte biologique des sols dans une espace géographique plus vaste. La cartographie a donc un grand rôle dans la protection de sol.

L'Hypothèse 3 « la délimitation spatiale des sols ferrugineux demeure-t-elle une guide de la réalisation de la lutte biologique du sol dans une grande espace géographique? » est donc validée.

CONCLUSION,
LIMITES ET PERSPECTIVES

Dans le cadre de la protection de bassins versants et dans le but d'améliorer la lutte antiérosive, la caractérisation des types des sols de la région ainsi que la cartographie doivent faire l'objet d'étude complémentaire pour répondre à ce défi.

Grâce à cette étude, il a été constaté que les sols ferrugineux occupent la grande partie des versants de la région Boeny. Ils se trouvent sur des formations gréseuses et sur la carapace sableuse. D'une part, l'identification des caractéristiques des sols ferrugineux nous a permis de savoir que le sol ferrugineux a une texture à dominance SL, pH peu acide et C faible qui sont dues principalement à peu des litières, que ce soit sur grès ou sur carapace. La somme des bases échangeables, et le sable sont fortement liés au sol sur carapace sableuse. Cette liaison est significative dans le sol ferrugineux sur carapace sableuse à pente faible. Le C et l'argile sont corrélés positivement, cette corrélation en C est significative dans le sol à pente faible. La connaissance de ces caractéristiques morpho pédologiques et physico-chimiques conduit à une aide à la détermination des luttes antiérosives biologiques. Cependant, le degré d'aptitude des plantes de reboisement modérément apte dominant dans la zone d'étude, puis les plantes apte, marginalement apte et inapte. D'autre part, la combinaison de la carte des pentes et la formation géologique de la zone étudiée nous a permis de réaliser une carte de sol en utilisant le SIG. Les aptitudes ont été insérées dans cette carte. Ceci permet de rendre plus facile la localisation de chaque aptitude de sols aux plantes des reboisements pour les luttes biologiques. La carte aide donc le travail de protection des versants dans une grande espace géographique.

Ainsi, les premières hypothèses, disant que la formation géologique et le relief influent la formation des sols ferrugineux dans la région Boeny, sont confirmées. Les caractéristiques des sols ferrugineux trouvés dans cette région sont en effet identiques à celles des sols ferrugineux trouvés par des autres auteurs. Enfin, la dernière hypothèse a montré qu'il est important de cartographier les sols si l'on veut effectuer une lutte antiérosive dans une grande espace géographique, du fait qu'il permet de délimiter et d'estimer les budgets nécessaires en fonction des envergures des zones à protéger.

Toutefois, par rapport aux résultats obtenus, des limites et des perspectives pour la mise en valeur s'imposaient sur la réalisation de ce mémoire. Étant donné que cette étude tend sur l'identification de caractéristiques de sols ferrugineux et leur délimitation spatiale dans les versants de la zone d'étude pour l'amélioration aux activités de lutte antiérosive biologique. L'identification des luttes et la gestion de façon durables doivent être observées par rapport à la connaissance de l'évolution de l'érosion dans chaque types des sols afin qu'on puisse évaluer la vulnérabilité de sol à l'érosion et suivre convenablement les variations des luttes à exécuter surtout les lutte mécaniques qui est à part de la lutte biologique. Il semble, par conséquent,

nécessaires de compléter les études par des cartographies de vulnérabilité du sol, ainsi que des suivis par traitements d'image satellitaire et par télédétection pour déterminer l'évolution dans l'espace et dans le temps des types des sols très affectés par l'érosion.

Les perspectives pour la mise en valeur des sols ferrugineux :

La protection de sol conduit à des avantages non seulement pour le sol mais pour les paysans ainsi que leur environnement. D'ailleurs, l'incendie et les feux des brousses menacent de plus en plus la qualité des sols de la région. Lorsque la savane fut protégée intégralement des feux et du pâturage, un enrichissement rapide de la végétation (densité et variété), une augmentation de la production végétale (donc de la litière qui ne disparaît pas entièrement d'une année à l'autre), une diminution sensible de pertes et une lente amélioration des stocks de nutriments dans les horizons superficiels ont constaté Roose (1978). Inversement, les carences en azote et en phosphate ont observé après défrichement d'une savane sur sol ferrugineux.

Suites aux analyses des sols, nous avons vu que le sol ferrugineux de la région sont peu acide par rapport aux sols trouvés par des autres auteurs. Cette acidification par l'insuffisance de matière organique provoque une dégradation rapide du sol (Koulibaly, 2010). De plus, la dominance de texture SL et LS est vulnérable à l'érosion. De ce fait, la mise en valeur de ce type de sol ferrugineux nécessite avant tout une amélioration de l'infiltration et du stockage des précipitations par la conservation sur place des matières organiques disponibles et par des travaux culturels favorisant l'enracinement et détruisant la pellicule de battance (Roose, 1978). Par conséquent, d'une part, il est important d'intensifier la sensibilisation des paysans à éradiquer le tavy depuis l'éducation des élèves et aussi par l'application de Dina. Ainsi, des formations préalables à la façon d'exploitation rationnelle du sol par les techniciens (changement de culture sur brulis en culture sous couverture végétal) sont nécessaires pour les paysans afin que chacun puisse participer à protéger le capital « sol ». D'autre part l'application des couvertures végétales au sol est très encouragée, ceci peut conduire à l'amélioration de la structure de sol, protection contre l'effet splash, l'intensification des activités biologiques du sol en rendant une neutralité de sol.

La diminution au maximum de la destruction de la forêt a une grande importance aussi sur la protection de sol. Il est utile de vulgariser l'utilisation de sources d'énergie renouvelable. Il permet de réduire l'exploitation aux feux de bois ou au charbon. Ceci implique une méthode participative de tous : depuis le responsable de la région ainsi qu'à chaque individu. Par ailleurs, l'intensification de campagne de reboisement sur les versants s'avère nécessaire. Il permet de protéger le sol à long terme.

Dans la région Boeny, l'utilisation de bas fond ou des rizières constitue la principale zone de cultures. Outre, la pratique de culture sur des versants pourrait être envisageable. Par conséquent, il semble important d'inciter les agriculteurs à augmenter leur surface cultivable vers les versants. Ceci pourrait aussi diminuer la dégradation sur le versant ainsi que l'ensablement sur le bas fond. Dans ce cas, il nécessite une formation des agriculteurs et des villageois par des techniciens compétents sur la pratique de systèmes de culture qui vise à réduire les impacts de l'érosion.

Ainsi, la présente mémoire constitue une étape pour l'amélioration des activités de lutte antiérosive biologique. Toutefois, sachant que le coût des analyses pour l'identification des sols est élevé pour les paysans, il est important de les inciter à éradiquer les feux de brousse et d'implanter des couverts végétaux. Bref, la sensibilisation et la responsabilisation de tous, face aux dégâts de l'érosion hydrique, ainsi que l'éducation intensive sur le mode d'utilisation du sol sur les versants constituent un pilier de la protection de sol.

Références bibliographiques

Andrea, D.V., Brahima, K., Djaby, B., Labo, M., Vieri T., Tiziana, D. F., Michela, P., Patrizio, V., Lamourdia, T., 2001. Les aptitudes agricoles et pastorales des sols dans les pays du CILSS. 165p.

Baize, D., 1986. Science du sol : Couvertures pédologiques, cartographie et taxonomie. 227-243p.

Baize, D., 2000. Guide des analyses en pédologie. 2^{ème} édition. INRA, 109p.

Baize, D., Girard, M. C., 2008. Référentiel pédologique. Quae, 435p.

Baccini, A., Besse, P., 2010. Statistique descriptive multidimensionnelle. Publications de l'Institut de Mathématiques de Toulouse. 33p.

Bartelli, L. I., 1979. Technical classification system for soil survey interpretation. New York. 247-289p.

Besairie, H., 1946. La géologie de Madagascar. Annales des services des Mines, n°12. Paris, 435p.

Besairie, H., 1969. Carte géologique à 1/500 000, de Madagascar, in 8 sheets: 1: Diego Suarez; 2: Antalaha; 3: Majunga; 4: Tamatave; 5: Tananarive; 6: Morondava; 7: Fianarantsoa; 8: Ampanihy.

Besairie, H., Collignon, M., 1972. Géologie de Madagascar : Les terrains sédimentaires., Annales Géologiques de Madagascar. Volume 35, 463p.

Besairie, H., 1973. Précis de géologie Malgache. Tananarive: Imprimerie Nationale.

Besairie, H., 1978. Carte géologique 1/100 000. feuille Ambalanjanakomby Maroabo.NO41. Tananarive: Service géologique de Madagascar.

Besairie, H., 1978. Carte géologique 1/100 000. feuille Ankarafantsika Morafeno NO40. Tananarive: Service géologique de Madagascar.

Besairie, H., 1978. Carte géologique 1/100 000. feuille BemaharivoMarovoay LM40. Tananarive: Service géologique de Madagascar.

Besairie, H., 1978. Carte géologique 1/100 000 . feuille Majunga-Ambalakida LM39.n°3. Tananarive: Service géologique de Madagascar.

Bornand, M., Arrouays, D., Baize, D., Jamagne, M., 1989. Cadre méthodologique d'une cartographie régionale des sols à l'échelle du 1/250 000. Science du sol, 27(1), 17-20p.

Bourgin, G., 1960. Rapport du sol et de la végétation. Paris : Masson et Cie. 174p.

Boyer, J. 1973. Comportement du potassium dans les sols tropicaux cultivés. In Compte rendu du 10ème Colloque de l'Institut International de la Potasse, organisé en décembre à Abidjan. 83-101p.

Calvet, R., 2003. Le sol: propriétés et fonctions. Volume 2. France Agricole Editions. 511p

Chaperon, P., Ferry, L., 1993. Fleuve et rivière de Madagascar. Paris: ORSTOM. 874p

Chatelin, Y., 1969. Contribution à l'étude de la séquence sols ferrallitiques rouges et ferrugineux tropicaux beiges examen de profils centrafricains. Cahier ORSTOM, Série. pédofil, 7, 447-493p.

CPCS., 1967. Classification des sols. Afes. 100p.

Dabin, B., 1967. Sur une méthode d'analyse du phosphore dans les sols tropicaux. ORSTOM. 19p.

Dabin, B., 1970. Méthode d'étude de la fixation du phosphore sur les sols tropicaux. Coton Fibres Trop, 213-234p.

Delenne, M.F. et Pelletier, F., 1981. Carte du potentiel des unités Physiques, au 1:1 000 000. ORSTOM. Bondy, France.

Département des eaux et forêt., 1993. Akon'ny ala. Choix des essences pour la sylviculture à Madagascar.(12 -13). 166p.

Duchaufour, P., 1988. Pédologie : Abrégé de Pédologie. 224p.

Duchaufour, P., 1997. Abrégé de pédologie : Sol, végétation, environnement. 5^e édition. 291p.

Emile D., Yvon D., 1998. Caractéristique fondamentale et rôle dans l'aménagement des écosystèmes méditerranéens et tropicaux. Dans IRD, Les arbres fixateurs d'azote (édition. espèces 34).

Fabien, A., 2015. Rapport du réseau thématique pluridisciplinaire " sol ". 68p.

FAO, 1976. Cadre pour l'évaluation des sols. Bulletin Pédologique de la FAO n°32. 64p.

FAO, 2015. Etat de ressources en sols dans le monde – résumé technique. Organisations de Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et groupe technique intergouvernemental sur les sols,. Rome, Italie. 92p.

Fox D., Le Bissonais Y., Cerdan O., Gascuel-Oudoux C., Martin P., Planchon Olivier, Rajot Jean-Louis, Revel J.C. (2011). L'érosion des sols. Dans : Girard M.C. (dir.), Walter C. (dir.), Rémy J.C. (dir.), Berthelin J. (dir.), Morel J.M. (dir.) Sols et environnement. Paris : Dunod, 708-728. (Sciences Sup). ISBN 978-2-10-054900-9

Fournier, F., 1960. Climat et érosion. Presse université de France. 61p.

Gascuel, O., Merot, P. Delahaye, D., Le Gouée, P., Grimaldi, C., Gruau, G., 2010. Impact du Changement Climatique sur la qualité des eaux dans les hydrosystèmes sous influence agricole: questions de recherche. In XXIII ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie. 365p.

Goncalves, P., 2002. Pétrologie et géochronologie des granulites de ultra-hautes températures de l'unité basique d'andriamena (centre-nord madagascar). Apport de la géochronologie in-situ U-Th-Pb à l'interprétation des trajets PT (Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II). 320p.

Gobat, J. M., Aragno, M., Matthey, W., 2010. Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols. Volume 14. PPUR Presses polytechniques. 817p.

Griffon, M., Malet, B., 1999. Bois et foret des tropiques. 260 : 41p.

Guil, J., Turlin, J. P., Louis le Roux, Bruzeau C., Yves le Troquer., 2013. Couvert végétal une culture à part entière. 382 : 31p.

Hammouda, N., 2010. Evolution de l'occupation des sols et de l'érosion dans le bassin versant Tleta (Rif occidental, Maroc). 141p.

Harmand, J. M., 1998. Bois et forets des tropiques : rôle des espèces ligneuses à croissance rapide dans le fonctionnement biogéochimique de la jachère. Effets sur la restauration de la fertilité des sols ferrugineux tropicaux. Bassin de la Bénoué au Nord-Cameroun., 256 : 75-79p.

Hatier., 1987. Sciences et technique biologique et géologique. Paris. 287p.

Hervieu, J., 1967. Géographie des sols malgaches. Essai synthétique. ORSTOM, 39-82p.

Hervieu, J., 1966. Contribution à l'étude de l'alluvionnement en milieu tropical: les facteurs de la sédimentation continentale, les produits de l'érosion, les sols alluviaux, sur le versant occidental de Madagascar. 6p.

Hervieu, J., 1961. Profil types de sols Malgache. inventaire Provisoire. Tananarive: Service géologique. 187p.

Hottin, G., 1976. Présentation et essai d'interprétation du Précambrien de Madagascar. Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 4(2nd series), 117-153.

Koulibaly, B., Traoré, O., Dakuo, D., Zombré, P. N., Bondé, D., 2010. Effets de la gestion des résidus de récolte sur les rendements et les bilans culturaux d'une rotation cotonnier-maïs-sorgho au Burkina Faso. Tropicultura, 28 : 184-189p.

Le Guen, M., 2002. La boîte à moustache pour sensibiliser à la statistique in Bulletin de méthodologie sociologique, SAGE publication. Paris, 43-64p.

Legras, O., Ubertosi, M., Brulebois, E., Amiotte-Suchet, P., Rossi, A., Castel, T., Sollsteiner, P., 2014. Évolution du bilan hydrique à l'échelle de bassins versants en contexte de changement climatique—mise place d'une méthodologie. In XXVIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie. 454-459p.

Mandimbiharison, A. J., Rasolomanana, E., 2015. Méthodes d'étude de la composante «sol» lors de la reconnaissance et l'exploration minière-Cas de l'exploration du calcaire dans la Commune de Mariarano, District Mahajanga II, Région Boeny. 34p.

Maurice, R., Lagabriel, Y., Martin, E., Paphelis, M., 2011. Elément de la Géologie : 15^e édition de Pomerol.

Ministère de coopération., 1978. Mémento de l'agronome, Collection et technique rural en Afrique. Paris. 1537p.

Ministère de coopération., 1978. Mémento du forestier, technique rural en Afrique. (Vol. II).

Mireille, A. R., 1993. Regard sur le sol. Paris: Foucher. 199p.

Némery, J., Mano, V., Navratil, O., Gratiot, N., Duvert, C., Legout, C., Estèves, M., 2010. Retour d'expérience sur l'utilisation de la turbidité en rivière de montagne. Techniques Sciences Méthodes, 61-68p.

Nivotiana, R. M. A., 2010. Effets du système semis direct sous couverture végétale sur la production de riz pluvial : cas de la région de Lac Alaotra. 90p.

ONE., 2007. Rapport sur l'état de l'environnement à Madagascar. Tananarive. 208p

Plan Régionale de Développement., 2005. Région Boeny. 91p.

PLAE., 2010. Rapport de mission d'évaluation à mi-parcours du PLAIEII. 84p.

PNAE., 2016. Boeny. Consulté l'aout 2017, sur www.pnae.mg/tbe/region-boeny.html.

Rabezandriny, R., 1993. Caractérisation des sols Malgaches. 16p.

Rajaomazava, F., 1992. Etude de la Subsidence de Bassin sédimentaire de Morondava Madagascar dans le cadre de l'évolution géodynamique de la margre Est-Africaine. Document et travaux centre géologique et géophysique. France: Cedex 5. 195p.

Rajoelison, L. G., Rakotonanahary, T. C., Randriamboavonjy, J. C., Rabenilalana, F. M., 2008. Etude des relations entre la pluie, le sol, le relief, la couverture végétale et l'érosion dans la région de Mandraka. 108p.

Ralison, A. V., 2002. Cartographie géologique et pédologique par SIG et télédétection, outils de décision par la CS. Thèse de master II en géologie. Tananarive: Université de polytechnique d'Antananarive (ESPA). 65p.

Ramaroson, H.V., 2012. Incidence des modes de gestion des sols et des restitutions organiques sur la disponibilité du phosphore dans un sol sur « tanety » des hautes terres de Madagascar (cas d'Andranomanelatra). Mémoire en vue de l'obtention d'un diplôme d'études approfondies en Pédologie Appliquée, Département des Sciences de la Terre, Université d'Antananarivo. 63p.

Randriamboavonjy, J. C., 1996. Étude des pédopaysages dans quatre zone-tests de Madagascar: côte est, hautes terres centrales, moyen-ouest et côte ouest. Département des Eaux et Forêts. 177p.

Rasambainarivo, J. H., Ranaivoarivelo, N., 2003. Profil fourrager Madagascar. FAO. 24p.

Razafimahatratra, H. M., 2011. Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen infrarouge :classification, caractérisation et sensibilité au climat. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo. 200p.

Roederer, P., 1971. Les sols de Madagascar. Sciences de la terre, Pédologie, 5 : 56p.

Roose, E. J., 1978. Pédogenèse actuelle d'un sol ferrugineux complexe issu de granite sous une savane arborescente du Centre Haute-Volta. Gonsé: campagnes 1968 à 1974. Cahiers. ORSTOM, Série. Pédologique, 16 : 193-223p.

Roose ; E., 1994. . Bulletin pédologique de la FAO : Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) . Montpellier, France. 31p.

Roose E., C. R., 1999. Ravinement en Algérie : Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. Bull, Éd.

Roose, E., 2015. Potentiel du paillage pour réduire l'érosion et restaurer la productivité des sols tropicaux: une revue en Afrique francophone. 15p.

Roose, E., Duchaufour, H., De Noni, G., 2012. Lutte antiérosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles. Marseille, France: Institut de recherche pour le développement. 758p.

Riquier, J., 1966. Définition et classification des sols ferrallitiques de Madagascar. Cahier ORSTOM, série Pédologique, IV, 75-88p.

Sadalmelik, 2007. Topographic map of Madagascar. Created with GMT from SRT data De http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Madagascar_Topography.png, consulté en Mars/2018.

Ségalen, P., Lamouroux, M., Perraud, A., Quantin, P., Roederer, P., 1974. Pour une nouvelle classification des sols. 22p.

Ségalen, P., 1994. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique. Tome 1, 2, 3. Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération. ORSTOM. Paris, 198 p.

Segalen, P., 1977. Classifications des sols. Paris: ORSTOM. 257p.

Ségalen, P., 1971. La détermination du fer libre dans les sols à sesquioxydes. ORSTOM.

Ségalen, P., 1968. Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. Cahiers ORSTOM Serie Pedologie, VI, 1, 105-126p.

Segalen, P., Ségalen, P., 1964. Le fer dans les sols. Vol. 154, ORSTOM. 8p.

Soltner, D., 2005. Les bases de la production végétale. Tome 1 : Le sol et son amélioration. 24ème édition, Collections Sciences et Techniques agricoles. France, 472 p.

Soltner, D., 1999. Les bases de la production végétale. Tome 2 : Le climat : climatologie-pédologie-conservation du sol. 8ème édition, Collections Sciences et Techniques agricoles. France, 319 p.

Tucker, R.D., Roig, J.Y., Delor, C., 2012. Nouvelles cartes géologique et métallogéniques de Madagascar à l'échelle du millionième. Ministère des Mines, PGRM, Antananarivo, République de Madagascar. 263p.

Pallo, F. J. P., Thiombiano, L., 1989. Les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions du Burkina Faso: caractéristiques et contraintes pour l'utilisation agricole.

Valérie, B. E., 2011. Cours d'hydrologie général: Le Bassin versant. Montpellier. 66p.

Universalis, E., 2015. Madagascar: Géographie, économie, histoire et politique. Volume 68. Encyclopedia Universalis.

Windley, B. F., Razafiniparany, A., Razakamanana, T., 1994. Tectonic framework of the Precambrian of Madagascar and its Gondwana connections: a review and reappraisal. Geologische Rundschau, 642-659p.

Webographie :

CREAM, 2009. Monographie Boeny. Consulté le juin 2016, sur <http://www.monographiemada.com/>.

FAO, 1974. Classifications des sols . Consulté le Juillet 2016, sur <http://www.fao.org/>.

Seguy, L., Husson, O., Charpentier, H., Bouzinac, S., Michellon, R., Chabanne, A., 2009. Chapitre 1:Principes et fonctionnement des écosystèmes cultivés en semis direct sur couverture végétale permanente. Volume I. CIRAD - TAFA- GSDM - AFD - MAEP. Consulté le Juillet 2016, sur <http://Agroecologie.cirad.fr>. 32 p.

USGS, 2018. Madagascar. Consulté le Mars 2018, sur <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

<http://www.geologues-prospecteurs.fr> consulté le Juillet 2016.

<https://www.tela-botanica.org/> consulté le Juin 2017

<http://www.wikipedia>. 2017, Consulté le juin 2016.

<https://www.xycol.net/> consulté le Juin 2017

<http://www.tropicos.org/> consulté le Juin 2017

ANNEXES

Annexe I : Principales roches mères des 30 sites de prélèvements**Tableau 16:** Roches mère des chaque échantillon

| Échantillon | X | Y | Types de roches | Lithologie | Groupe des roches | Minéralisation | ère | Période | Altération |
|-------------|--------|---------|-----------------|---|-------------------------------------|--|------------|---------|--------------------------|
| 1SMMRS | 434067 | 1102012 | Sédimentaire | carapace sableuse | Roche d'altération | Quartz, feldspath, mica, hydroxyde de fer et d'Alumine | secondaire | crétacé | Hydrolyse |
| 2SMMRS | 434419 | 1102324 | Sédimentaire | | | | | | |
| 3SMMRS | 434959 | 1102199 | Sédimentaire | | | | | | |
| 4SMMRS | 434860 | 1101751 | Sédimentaire | | | | | | |
| 5SMMRS | 433515 | 1094148 | Sédimentaire | argiles à nodule ferrugineux, Glauconie | Roche détritique | Quartz, feldspath, argile, zircon, disthène | secondaire | crétacé | Hydrolyse |
| 6SMMRS | 432522 | 1094524 | Sédimentaire | | | | | | |
| 7SMMRS | 434589 | 1096833 | Sédimentaire | | | | | | |
| 8SMANK | 438543 | 1106892 | Sédimentaire | grès argilique et calcaire | Roche détritique et roche carbonaté | Calcite, argile, quartz, feldspath, mica | secondaire | crétacé | Hydrolyse et dissolution |
| 9SMANK | 439005 | 1105981 | Sédimentaire | | | | | | |
| 10SMANK | 439106 | 1106748 | Sédimentaire | | | | | | |
| 11SMANK | 438452 | 1107612 | Sédimentaire | | | | | | |
| 12SMANK | 437523 | 1117855 | Sédimentaire | | | | | | |
| 13SMANK | 437430 | 1117838 | Sédimentaire | | | | | | |
| 14SMANK | 434678 | 1117275 | Sédimentaire | | | | | | |
| 15SMMAE | 426990 | 1117750 | Sédimentaire | | | | | | |
| 16SMMAE | 426906 | 1117026 | Sédimentaire | | | | | | |
| 17SMMA | 427050 | 1117350 | Sédimentaire | | | | | | |

(Besairie, 1946 ; Besairie, 1978 ; Tucker *et al.*, 2012)

Tableau 16 (suite) : Roches mère des chaque échantillon

| Échantillon | X | Y | Types de roches | Lithologie | Groupe des roches | Minéralisation | ère | Période | Altération |
|-------------|--------|---------|-------------------------|--|--------------------------------------|--|-------------|------------|--------------------------|
| 19SMMAN | 421737 | 1134698 | Sédimentaire | grès argilique à stratification entrecroisée | Roche détritique | Quartz, feldspath, mica, Zircon, grenat | secondaire | crétacé | Hydrolyse |
| 20SMMAN | 421580 | 1134846 | Sédimentaire | | | | | | |
| 22SMMGP | 425055 | 1129857 | Sédimentaire | | | | | | |
| 23SMAMB V | 422294 | 1132902 | Sédimentaire | | | | | | |
| 24SMAMB V | 422432 | 1132805 | Sédimentaire | grès, grès carbonaté | Roche détritique et roche carbonatée | Calcite, argile, quartz, feldspath, mica | secondaire | Jurassique | Hydrolyse et dissolution |
| 26SMADM | 471361 | 1058981 | Sédimentaire | | | | | | |
| 27SMADM | 471166 | 1058987 | Sédimentaire | | | | | | |
| 28SMMNR | 492471 | 1085452 | Sédimentaire | alluvion, sable | Roche d'altération | Quartz, feldspath, mica | quaternaire | | Hydrolyse |
| 29SMMNR | 492136 | 1085384 | formation superficielle | | | | | | |
| 30SMADF | 447590 | 1081318 | sédimentaire | grès glauconieux, grès à stratification entrecroisée | Roche détritique | Quartz, feldspath, mica, argile | secondaire | crétacé | Hydrolyse |
| 31SMADF | 447484 | 1081514 | | | | | | | |
| 32SMADF | 447564 | 1081646 | | | | | | | |

(Besairie, 1946 ; Besairie, 1978 ; Tucker *et al.*, 2012)

Annexes II : Plantes rencontrées sur terrain

Tableau 17: Nom scientifique et vernaculaire de végétations rencontrées sur terrain

| Nom scientifique | Nom vernaculaire |
|------------------------------|------------------|
| <i>Albizzia jobercina</i> | Bonara |
| <i>Aristida multiconlis</i> | Paipaika |
| <i>Dalbergia</i> | Manary |
| <i>Ficus sakalavarum</i> | Adabo |
| <i>Hétéropogon contortus</i> | Danga |
| <i>Hyparrhenia rufa</i> | Vero |
| <i>Hyphanae shatan</i> | satram-be |
| <i>Medemia nobilis</i> | satrana |
| <i>Pourpartia</i> | Sakoa |
| <i>Tamarindus indus</i> | Madiro |
| <i>Zizyphus</i> | Mokonazy |

(Randriamboavonjy, 1996)

Annexe III : Liste des plantes utilisées pour le reboisement**Tableau 18:** Plantes de reboisement apte dans la région Boeny.

| <i>Nom scientifique</i> | <i>Famille</i> | t (°C) | Pluviosité | Altitude | pH | Texture |
|---------------------------------|------------------------|--------|------------|----------|-------------------------|-------------|
| <i>Anacardium occidentale</i> | <i>Anacardiaceae</i> | 25-27 | 500 – 1500 | <40 | acide, neutre ; alcalin | S ou SA |
| <i>Cassia siamea</i> | <i>Caesalpiniaceae</i> | 21- | 650-1600 | <700 | <7.3 | S ou L |
| <i>Tamarindus</i> | | 23-26 | 700-1600 | 0-600 | acide, neutre, alcalin | S ou SA |
| <i>Terminaliacatappa</i> | <i>Combretaceae</i> | 23- | 1000-3000 | <700 | <7.3 | S ou L |
| <i>Sesbania</i> | <i>Fabaceae</i> | 20- | 350-1000 | 0-600 | <6.5 | S ou L |
| <i>Kaya</i> | <i>Meliaceae</i> | 23- | 1000-1600 | 800 | <7.3 | S |
| <i>Kaya senegaliensis</i> | | 19- | 700-1500 | <600 | <7.3 | L ou LA |
| <i>Azadiracta indica,</i> | | 26 | 450-1150 | | 5-6,8 | S |
| <i>Acacia mangium</i> | <i>Mimosaceae</i> | 20- | 1500-3000 | <700 | <7.3 | L |
| <i>Acacia albida</i> | | 18- | 250-1000 | <600 | <7.3 | Lou A |
| <i>Albizzia lebbeck</i> | | 20-28 | 500-1500 | 0-1400 | acide, neutre, alcalin | AS |
| <i>Calliandra calothyrsus</i> | | 18-30 | 1000-3000 | 0-700 | <7.3 | S |
| <i>Acacia auriculiformis</i> | | 24-29 | 1000-1800 | <600 | 3,0 -6 | S ou LA |
| <i>Eucalyptus camaldulensis</i> | <i>Myrtaceae</i> | 20-26 | 400-1000 | 600-800 | 6.6-7.3 | S ou L ou A |
| <i>Melaleuce leucodondron</i> | | 22-28 | 800-1600 | | acide, neutre, alcalin | A ou L à S |
| <i>Eucalyptus citriodora</i> | | 17-28 | 650-1200 | 80-300 | 5,5-8 | Graveleuse |
| <i>Grevillea banksii</i> | <i>Proteacea</i> | 23- | 2000-3000 | | 6.6-9 | S |
| <i>Gmelina arborea</i> | <i>Verbenaceae</i> | 21- | 700-3500 | 0-1200 | <7.3 | S ou A |
| <i>Tectona grandis</i> | | 22- | 1250-3000 | 0-900 | <7.3 | L à A |

NB : A : argileuse, S : sableuse, L : limoneuse, SA : sablo-argileuse, LA : limono-argileuse, AS : argilo-ableuse (Ministère de la coopération, 1978 ; Département des eaux et forêt, 1993 ; Emile D, 1998)

Annexe IV : Modes opératoires des analyses effectuées au laboratoire

❖ Préparation des échantillons de sols

Séchage

Verser et étaler le sol sur un plateau en mettant une feuille de papier portant la référence, Ecraser à la main les mottes de terre afin de favoriser le séchage (Deux ou trois fois par jour). L'échantillon est sec lorsqu'il s'effrite entre les doigts sans coller.



Figure 41:Séchage de sol sur un plateau

Tamissage

Faire passer à travers un tamis de 2mm d'ouverture. Ceci est utilisé pour l'analyse granulométrique, pH eau, P_2O_5 assimilable, et les cations échangeables.



Figure 42: Types des tamis

Broyage et tamissage

Cette étape consiste à écraser les petites mottes de terre lorsque l'échantillon contient de la terre agglomérée. Dans ce cas, il faut utiliser un mortier et un pilon en porcelaine, le sol ne doit pas taper ni appuyer trop fort à fin de pouvoir conserver la forme des particules.



Figure 43: Broyage à l'aide d'un pilon et mortier

Faire passer à travers un tamis de 0.5mm d'ouverture. Conserver 10g de ce dernier pour analyser le carbone organique et l'azote Kjeldahl.

❖ - **Détermination du pH du sol**

Matériels utilisés

pH mètre ;

Bécher de 50ml.

Réactifs

Solution tampon pH 4 et pH 7

Mode opératoire

- Peser 10g de sol séché à l'air dans un Bécher de 50ml ;
- Ajouter 25ml d'eau distillée ;
- Laisser en contact pendant 30mn en agitant de temps en temps à l'aide d'une baguette de verre ;
- Après étalonnage du pH-mètre, introduire avec précaution l'électrode dans la suspension et lire le pH ;
- Ne pas agiter la suspension durant la mesure.

❖ **Détermination de Phosphore assimilable**

Matériels utilisés : fiole jaugée ;

bouteille nalgène de 125 ml ;

papier filtre Watman N° 42 ;

tube à essai ;

spectromètre UV/VIS à la longueur d'onde de 660 nm.

Préparation des réactifs**Tableau 19 :** Préparation des réactifs utilisés pour la détermination de P

| Réactifs | Mode de préparation |
|---|--|
| NH ₄ F 1N | Dissoudre 37g de fluorure d'ammonium avec de l'eau distillée et compléter le volume à 1l en utilisant une fiole jaugée de 1L |
| HCl 2N. | Diluer 80.8 ml de HCl concentré par de l'eau distillée pour avoir un volume total de 500 ml. |
| Solution extractante | Ajouter 15 mL de fluorure d'ammonium 1N et 25 ml de HCl 2N dans 460 ml d'eau distillée. Cette solution nous donne 0.03N de NH ₄ F et de 0.1N de HCl. On peut la stocker dans une bouteille en verre pendant 1 an. |
| SnCl ₂ , 2H ₂ O concentré | Dissoudre 10g de chlorure stanneux dans 25 ml de HCl concentré. Le stocker dans une bouteille à compte-goutte sombre pendant 6 semaines. |
| Molybdate d'ammonium | dissoudre 15g de paramolybdate d'ammonium dans 350 ml d'eau distillée. Y ajouter lentement 290 ml de HCl 12N en agitant. Refroidir et compléter le volume à 1l avec de l'eau distillée. Stocker cette solution dans une bouteille en verre sombre pendant 2 mois. |
| Solution diluée de SnCl ₂ | Diluer 3 gouttes de SnCl ₂ concentré dans 50 ml d'eau distillée. Cette solution est à renouveler toutes les 2 heures. |
| Solution mère étalon de P 100 ppm | Dissoudre 0.2129 g de KH ₂ PO ₄ séché à l'étuve à 110°C dans de l'eau distillée. Compléter le volume à 500 ml en utilisant une fiole de 500 ml. |
| Solution fille étalon de 10 ppm | Mettre 10 ml de la solution mère étalon de 100 ppm dans une fiole de 100 ml. Ajouter de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. |
| Solutions standards : 1 ppm, 2 ppm, 3 ppm et 5 ppm. | A partir de la solution fille de P 10 ppm, mettre respectivement 2.5 ml, 5 ml, 7.5 ml et 12.5 ml dans 4 différentes fioles jaugées de 25 ml portant chacune leur référence, et ajouter de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. |

(laboratoire FOFIFA)

Mode opératoire

- peser 2 g de sol à 2 mm de diamètre dans une bouteille nalgène de 125 ml ;
- ajouter 14 ml de la solution extractante ;
- bien fermer la bouteille et agiter rigoureusement pendant 1 mn ;
- filtrer avec un papier filtre Watman N° 42 ;

Le filtrat ainsi obtenu contient le P assimilable contenu dans l'échantillon de sol.

- Préparation des étalons
 - mettre respectivement dans un tube à essai les solutions : 1 ml de la solution standard de 1ppm de P, 2 ml de la solution extractante, 4 ml d'eau distillée, 2 ml de la solution de molybdate d'ammonium et 1 ml de la solution diluée de chlorure stanneux;
 - bien homogénéiser le contenu du tube à essai à l'aide d'un mélangeur Vortex. Répéter les mêmes opérations avec les autres solutions standards de P.

- Préparation des échantillons
 - mettre successivement dans un tube à essai les solutions : 2 ml de filtrat, 5 ml d'eau distillée, 2 ml de la solution de molybdate d'ammonium et 1 ml de la solution diluée de chlorure stanneux ;
 - bien homogénéiser le contenu du tube à essai ;
 - faire un essai à blanc.

Il faut attendre 20 mn pour stabiliser la coloration ainsi obtenue. Ensuite, la mesure de P s'effectue au spectromètre UV/VIS à la longueur d'onde de 660 nm.

Expression des résultats

Avec un facteur multiplicatif de 3.5, l'appareil donne la teneur en P assimilable de l'échantillon de sol.

❖ **Granulométrie**

- Matériels utilisés :
 - Mixeur
 - Cylindre jaugé de 1l
 - Densimètre de Bouyoucos gradué en /l.
 - Thermomètre
 - Chronomètre.

Réactifs

- Hexamétaphosphate de sodium 5% : 5 l par échantillon.
- Alcool amylique.

Mode opératoire

- peser 50g de sol séché à l'abri dans un Bécher de 600 ml ;
- ajouter 50 ml d'hexamétaphosphate de sodium et 100 ml d'eau distillée ;
- bien mélanger et laisser au repos pendant une nuit ;
- agiter pendant 5 mn à l'aide d'un mixeur ;
- transvaser dans un cylindre de 1l et à l'aide de l'eau de rinçage, compléter le volume jusqu'au trait et laisser se reposer quelques minutes afin d'obtenir l'équilibre thermique avec le milieu ambiant ;
- boucher le cylindre et retourner vivement à plusieurs reprises pendant 1 mn. Laisser se reposer et déboucher ;
- après 40 s et 2 heures de repos, introduire le densimètre dans le liquide surnageant et faite la lecture.

Remarque : L'introduction du densimètre dans le liquide se fait 10s avant la lecture. S'il y a formation de mousse à la surface, ajouter quelques gouttes d'alcool amylique pour les faire disparaître.

Faire un essai à blanc dans les mêmes conditions.

❖ Bases échangeables et capacité d'échange cationique

Matériels utilisés

- erlenmeyer de 125 ml
- entonnoir garni d'un papier filtre.
- fiole jaugée de 100 ml.
- spectromètre d'absorption atomique.

Détermination de la capacité d'échange cationique

Après l'extraction des bases échangeables, le sol est saturé de NH_4^+ . On enlève les sels d'ammonium libre, puis on procède à l'extraction de NH_4^+ ainsi adsorbé par une solution molaire de NaCl. L'ammoniaque sera ensuite déplacée en milieu alcalin, puis entraîné par la vapeur d'eau. Le dosage volumétrique est effectué sur le distillat.

Réactifs

- acétates d'ammonium $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1 M : Peser 77.08 g d'acétate d'ammonium et le dissoudre dans de l'eau distillée à 1l ;

- éthanol 60% ;
- solution de NaCl 1 M : dissoudre 68.5 g de NaCl dans 1 l d'eau distillée. Le conserver dans une bouteille en verre de 1 l ;
- solution d'hydroxyde de sodium 10 N ;
- solution d'acide sulfurique 0.01 N ;
- indicateur mixte : dissoudre 0.0495 g de vert de bromocrésol et 0.033 g de rouge de méthyle dans 50 ml d'éthanol ;
- solution d'acide borique à 2% : Dans une fiole jaugée de 2 l, dissoudre 40 g de H_3BO_3 dans 1800 ml d'eau distillée. Ajouter ensuite 40 ml de la solution de l'indicateur mixte. Mélanger et ajuster le volume avec de l'eau distillée jusqu'au trait de la jauge.

Mode opératoire

- placer 10g de sol de diamètre 2mm dans un erlenmeyer de 125 ml ;
- ajouter 40 ml d'acétate d'ammonium 1M ;
- tournoyer et laisser reposer pendant 1 heure ou plus ;
- transférer le contenu de l'erlenmeyer dans un entonnoir garni d'un papier filtre ;
- récupérer le filtrat dans une fiole jaugée de 100 ml ;
- bien rincer plusieurs fois le contenu de l'erlenmeyer par 10 ml d'acétate d'ammonium 1M et le transférer dans l'entonnoir jusqu'à l'obtention d'un volume de 100 ml ;
- compléter le volume jusqu'au trait de jauge par l'acétate d'ammonium.

La détermination des concentrations en Ca, Mg, K et Na s'effectue par le spectromètre d'absorption atomique. Le contenu de l'entonnoir sert à la détermination de la capacité d'échange cationique.

- ajouter 50 ml de la solution d'éthanol 60% dans l'entonnoir ;
- récupérer le filtrat dans un erlenmeyer de 125 ml ;
- après le lessivage par la solution d'éthanol, ajouter ensuite la solution de NaCl dans l'entonnoir ;
- récupérer le filtrat dans une fiole jaugée de 100 ml ;
- continuer cette opération jusqu'à l'obtention d'un volume de 100 ml.
- introduire successivement dans l'appareil à distillation : 10 ml du filtrat et 5 ml de la solution de soude ;
- recueillir le distillat dans un erlenmeyer de 125 ml contenant 5 ml de la solution d'acide borique.
- effectuer le dosage avec la solution d'acide sulfurique.

Un témoin est préparé dans les mêmes conditions.

Expression des résultats :

Soient : V_a le volume de la solution d'acide sulfurique versé pour l'échantillon

N sa normalité

V_o le volume de la solution d'acide sulfurique versé pour le témoin

La quantité d'acide pour neutraliser la solution sera : $V = V_a - V_o$

L'équivalence de NH_4^+ ainsi dosé est égale à l'équivalence de la capacité d'échange cationique de la prise d'essai, soit : $N \times V$

Dans 100 ml de la solution à analyser, on a $N \times V \times 100/10 = 10 \times N \times V$

Pour 100 g de sol donc, l'équivalence de la capacité d'échange cationique est :

$$10 \times N \times V \times 100/10 = 100 \times N \times V$$

Comme $N = 0.01$ N, alors : $CEC = V \text{ méq}/100 \text{ g}$

❖ **Carbone organique**

Matériels utilisés

erlenmeyer de 250 ml.

Réactifs

- Bichromate de potassium 1N : Dissoudre 49.04g de $K_2Cr_2O_7$ dans une fiole jaugée de 1l avec de l'eau distillée et compléter le volume jusqu'au trait du jauge.

- Acide sulfurique concentré : 20 ml par échantillon.

- Sulfate ferreux 0.5 N : Dissoudre 140g de sulfate ferreux ($FeSO_4, 7H_2O$) dans une fiole jaugée de 1l avec de l'eau distillée. Ajouter 15 ml de H_2SO_4 concentré et compléter le volume à 1l avec de l'eau distillée.

- Complexe ferreux-ortho-phénantroline 0.025 M : dissoudre 1.485 g d'ortho-phénantroline monohydraté $C_{12}H_8N_2, H_2O$ et 0.695g de $FeSO_4, 7H_2O$ dans de l'eau distillée et compléter le volume à 100 ml.

Mode opératoire

-peser à peu près 0.5 g de sol de diamètre 0.5 mm et noter le poids exact. Le transférer dans un erlenmeyer de 250 ml ;

-ajouter 10 ml de bichromate de potassium 1N et faire tourner l'erlenmeyer pour faire disperser le sol dans la solution ;

- ajouter rapidement 20 ml de H_2SO_4 concentré. Tournoyer l'ermeneyer puis agiter vigoureusement pendant 1 mn ;
 - laisser reposer pendant 30 mn. Ajouter 200 ml d'eau distillée. Ajouter 4 gouttes d'ortho-phénantroline et titrer la solution avec FeSO_4 0.5N ;
 - la fin de la réaction s'observe par le virage d'une coloration verte intense au rouge violacé.
- Faire un essai à blanc dans les mêmes conditions.

❖ Azote kjeldahl

On chauffe la substance avec de l'acide sulfurique concentré qui, à l'ébullition, détruit les matières organiques azotées. Le carbone et l'hydrogène se dégagent à l'état de CO_2 et H_2O , l'azote transformé en ammoniacque est fixé par l'acide sulfurique à l'état de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

K_2SO_4 permet d'élever la température d'ébullition de H_2SO_4 jusqu'à 430°C . CuSO_4 sert de catalyseur. NH_3 est ensuite déplacé par une solution d'hydroxyde de sodium, entraîné à la vapeur et fixé à l'état de borate, lequel est dosé par une solution titrée d'acide sulfurique.

Réactifs

- acide sulfurique concentré (H_2SO_4) ;
- catalyseur de minéralisation Kjeldal : mélange de 3.5 g de K_2SO_4 et de 0.4 g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ par échantillon ;
- solution d'hydroxyde de sodium 10 N ;
- solution d'acide sulfurique 0.01 N ;
- indicateur mixte : dissoudre 0.0495 g de vert de bromocrésol et 0.033 g de rouge de méthyle dans 50 ml d'éthanol ;
- solution d'acide borique à 2% : Dans une fiole jaugée de 2 L, dissoudre 40 g de H_3BO_3 dans 1800 ml d'eau distillée. Ajouter ensuite 40 ml de la solution de l'indicateur mixte. Mélanger et ajuster le volume avec de l'eau distillée jusqu'au trait de la jauge.

Mode opératoire

Minéralisation de l'azote organique.

- Introduire dans un tube de digestion : 1g de sol à 0.5 mm de diamètre, 1 catalyseur de minéralisation et 10 ml d'acide sulfurique concentré ;
- chauffer fortement (environ 430°C) pendant 30 minutes ;
- après refroidissement, transvaser le contenu du tube de digestion dans une fiole de 50 ml ;
- ajuster au trait de la jauge avec de l'eau distillée.

Distillation de l'azote

-Introduire successivement dans l'appareil à distillation : 10 ml de la prise d'essai et 10 ml de la solution de soude ;

-recueillir le distillat dans un erlenmeyer de 125 ml contenant 20 ml de la solution d'acide borique ;

Effectuer le dosage avec la solution d'acide sulfurique.

Un témoin est préparé dans les mêmes conditions.

Expression des résultats :

Soient :

Va le volume de la solution d'acide sulfurique versé pour l'échantillon

N sa normalité

Vo le volume de la solution d'acide sulfurique versé pour le témoin

La quantité d'acide pour neutraliser la solution sera : $V = V_a - V_o$

L'équivalence de l'azote Kjeldahl dans la prise d'essai est égale à : $N \times V$

Soit dans la solution à analyser : $N \times V \times 50 / 10$

Comme la masse d'un milliéquivalent d'azote étant 14 mg, la quantité d'azote dans 1 g de sol sera : $(N \times V \times 50 / 10) \times 14 \times 10^{-3} \text{ g}$

Dans 100 g de sol, la quantité de N Kjeldahl sera :

$N = : (N \times V \times 50 / 10) \times 14 \times 10^{-3} \times 100 \text{ g}$

Comme $N = 0.01 \text{ N}$, alors : **$N\% = V \times 0.07$**

Annexe V : Nombres des échantillons prélevés dans chaque commune**Tableau 20:** Tableau des profils et des horizons

| Commune | Localisation | profil | code | horizon | nombre d'échantillon |
|---------------------|-----------------------|--------|---------|------------|----------------------|
| MAROSAKOA | X:434067 Y:1102012 | 1 | 1SMMRS | 0-26 | 1 |
| | | | | 26-48 | 1 |
| | | | | 48 et plus | 1 |
| | X:434419 Y:1102324 | 2 | 2SMMRS | 0-42 | 1 |
| | | | | 42-70 | 1 |
| | X:434959 Y:1102199 | 3 | 3SMMRS | 0-24 | 1 |
| | | | | 24-48 | 1 |
| | X:434860 Y:1101751 | 4 | 4SMMRS | 0-10 | 1 |
| | | | | 10-40 | 1 |
| | X:433515 Y:1094148 | 5 | 5SMMRS | 0-10 | 1 |
| | | | | 10-25 | 1 |
| | | | | 25-60 | 1 |
| | X:432522 Y:1094524 | 6 | 6SMMRS | 0-17 | 1 |
| | | | | 17-60 | 1 |
| | X:434589 Y:1096833 | 7 | 7SMMRS | 0-13 | 1 |
| | | | | 13-27 | 1 |
| | | | | 27 et plus | 1 |
| ANKAZOMBORONA | X:438543 Y:1106892 | 8 | 8SMANK | 0-15 | 1 |
| | | | | 15-46 | 1 |
| | X:439005 Y:1105981 | 9 | 9SMANK | 0-17 | 1 |
| | | | | 17-50 | 1 |
| | X:439106 Y:1106748 | 10 | 10SMANK | 0-18 | 1 |
| | | | | 18-55 | 1 |
| | X:438452 Y:1107612 | 11 | 11SMANK | 0-10 | 1 |
| | | | | 10et plus | 1 |
| | X:437523 Y:1117855 | 12 | 12SMANK | 0-15 | 1 |
| | | | | 15-27 | 1 |
| | | | | 27et plus | 1 |
| | X:437430 Y:1117838 | 13 | 13SMANK | 0-34 | 1 |
| | | | | 34-54 | 1 |
| | | | | 54-70 | 1 |
| | | | | 70et plus | 1 |
| | X:434678 Y:1117275 | 14 | 14SMANK | 0-17 | 1 |
| | | | | 17-47 | 1 |
| | | | | 47-65 | 1 |
| MAROVOAY BANLIEU | X:426990 Y:1117750 | 15 | 15SMMAE | 0-15 | 1 |
| | | | | 15-35 | 1 |
| | | | | 35-70 | 1 |
| | | | | 70 et plus | 1 |
| | X:426906 Y:1117026 | 16 | 16SMMAE | 0-9 | 1 |
| | | | | 9-18 | 1 |
| | | | | 18-25 | 1 |
| | | | | 25et plus | 1 |

Tableau 20b: Tableau des profils et des horizons

| Commune | Localisation | profil | code | horizon | nombre d'échantillon |
|---------------------------|--------------|--------|---------|------------|----------------------|
| MAROVOAY BANLIEU | X:427050 | 17 | 17SMMAE | 0-19 | 1 |
| | Y:1117350 | | | 19-61 | 1 |
| | | | | 61 et plus | 1 |
| ANTANAMBAO ANDRANOLAVA | X:421737 | 19 | 19SMMAN | 0-19 | 1 |
| | Y:1134698 | | | 19et plus | 1 |
| | X:421580 | 20 | 20SMMAN | 0-31 | 1 |
| | Y:1134846 | | | 31-50 | 1 |
| | | | | 50et plus | 1 |
| | X:425055 | 22 | 22SMMGP | 0-24 | 1 |
| | Y:1129857 | | | 24-44 | 1 |
| | | | | 44-60 | 1 |
| AMBALAKIDA | | | | 60et plus | 1 |
| | X:422294 | 23 | 23SMAMB | 0-15 | 1 |
| | Y:1132902 | | | 15-67 | 1 |
| | | | | 67et plus | 1 |
| | X:422432 | 24 | 24SMAMB | 0-22 | 1 |
| | Y:1132805 | | | 22-42 | 1 |
| ANDRANOMAMY | | | | 42et plus | 1 |
| | X:471361 | 26 | 26SMADM | 0-14 | 1 |
| | Y:1058981 | | | 14-48 | 1 |
| | | | | 48et plus | 1 |
| | X:471166 | 27 | 27SMADM | 0-19 | 1 |
| | Y:1058987 | | | 19-52 | 1 |
| MANERINERINA | | | | 52et plus | 1 |
| | X:492471 | 28 | 28SMMNR | 0-53 | 1 |
| | Y:1085452 | | | 53-90 | 1 |
| | | | | 90et plus | 1 |
| | X:492136 | 29 | 29SMMNR | 0-10 | 1 |
| | Y:1085384 | | | 10 -20 | 1 |
| ANDRANOFASIKA | | | | 20 et plus | 1 |
| | X:447590 | 30 | 30SMADF | 0-20 | 1 |
| | Y:1081318 | | | 20-54 | 1 |
| | | | | 54et plus | 1 |
| | X:447484 | 31 | 31SMADF | 0-40 | 1 |
| | Y:1081514 | | | | |
| | | 32 | 32SMADF | 0-17 | 1 |
| | X:447564 | | | 17-34 | 1 |
| | Y:1081646 | | | 34-60 | 1 |
| | | | | 60et plus | 1 |
| TOTAL | | | | | 81 |

NB: 17, 19, 20, 21, 22, 23, 23, 24, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32: numéro des profils ; SM : nom des personne qui participe à l'échantillonnage (Sahondra et Mirana) ; MAE: Maevanaka; MAN:Manarenja; MGP: Mangapaika; AMBV: Ambovondramanesa; ADM: Andranomamy; MNR: Manerinerina; ADF: Andranofasika.

Annexe VI : Signification d'interprétation morphopédologique

Couleur

- Jaune :** Qualifie un horizon de teinte 10 YR ou plus jaune
- Rouge :** Qualifie un horizon de teinte 5 YR ou plus rouge à l'état humide (au moins les faces des agrégats).
- Rougeâtre :** Qualifie un horizon de teinte 7,5 YR à l'état humide (au moins les faces des agrégats).
- Rubéfié :** Qualifie un horizon ou un solum qui est devenu rouge ou rougeâtre par évolution pédogénétique.

(Duchauffour, 1988 ; Baise, 2008)

Structure

- *Structure particulaire : résulte de l'absence totale de cohésion entre les particules constituant le matériau. Il s'agit de sols à texture grossière, sable ou sable limoneux.
- *Structure grumeleuse : agrégats de forme arrondie irrégulière, très poreux, de 1 à 10 mm
- *Structure polyédrique : éléments cohérents, isodimensionnels, à arêtes vives de quelques mm à plusieurs cm.

Annexe VI (suite) : Signification d'interprétation morphopédologique

Texture

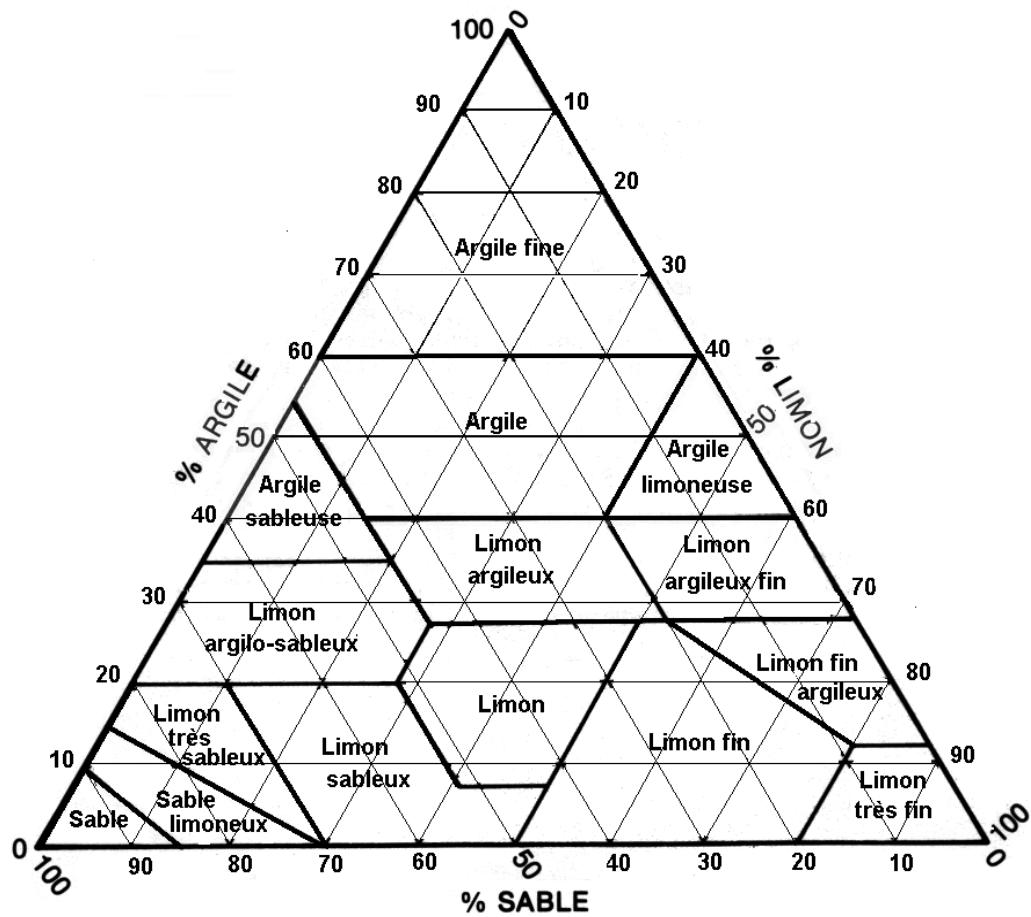


Figure 44: Triangle des textures

(Duchaufour, 1988)

Annexe VII : Résultats morpho pédologiques détaillés**Tableau 21:** Caractéristiques morpho pédologiques des sols sur grès

| Profil | Profondeur (cm) | Couleur | Texture | Racine | Structure | Compacité | Porosité | Autres |
|---------------|------------------------|-----------------------------|----------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|---|
| 7SMMRS | 0-13 | 2,5YR 3/6 dark red | S | Abondante | Particulaire | Pulvérulent | microporeux | |
| | 13-27 | 2,5YR 3/4 dark redish brown | S | Peu | Particulaire | Dense | microporeux | |
| | 27 et plus | 2,5YR 4/6 red | S | Peu | Particulaire | Dense | microporeux | sol humide |
| 11SMANK | 0-10 | 2,5YR 4/6 red | LTS | Abondante | Polyédrique | Pulvérulent | Poreux (1,5cm) | |
| | 10et plus | 5YR 4/6 yellowish red | LTS | Abondante | Polyédrique | Compact | poreux | sol un peu humide |
| 12SMANK | 0-15 | 7,5YR 3/2 strong brown | LTS | Abondante | grumeleuse | dense | Poreux(5mm) | |
| | 15-27 | 5YR 3/3 dark reddish brown | LTS | Peu | Polyédrique | dense | poreux | sol humide |
| | 27et plus | 5YR 3/4 dark reddish brown | LTS | Peu | Polyédrique | dense | poreux | |
| 13SMANK | 0-34 | 7,5YR 4/4 dark brown | SL | Abondante | Particulaire | pulvérulent | microporeux | |
| | 34-54 | 7,5YR 4/6 strong brown | S | Peu | Particulaire | pulvérulent | | |
| | 54-70 | 5Y 4/4 olive | LS | Peu | Grumeleuse | Dense | | stratification de couleur jaune et bleu |
| | 70et plus | 5Y 5/6 olive | LS | Néant | Polyédrique | dense | | sol humide |

Tableau 22: Caractéristique morphopédologiques des sols sur carapace sableuse à pente forte

| Profil | Profondeur (cm) | Couleur | Texture | Racine | Structure | Compacité | Porosité | Autres caractéristiques |
|---------|-----------------|---------------------------------|---------|---------------|--------------|-------------|-------------|---|
| 1SMMRS | 0-26 | 2,5YR 3/2 dark red | SL | Abondante | grumeleuse | Dense | Microporeux | presence de cailloux 0,5 à 1cm de diametre concrection de couleur noire et rouge (dimension 1,2 cm) |
| | 26-48 | 5YR 3/6 dark red | SL | Peu | grumeleuse | Dense | Poreuse | |
| | 48 et plus | 2,5YR 4/4 redishbrown | S | Peu | grumeleuse | Dense | | |
| 2SMMRS | 0-42 | 10YR 5/3 brown | SL | Rarement | particulaire | | | |
| | 42-70 | 10YR 6/2light brownish grey | LS | grande racine | particulaire | Dense | | signe de gleyfication |
| 3SMMRS | 0-24 | 5YR 3/8 very dark grey | LTS | Abondante | grumeleuse | pulvérulent | Microporeux | sol humide |
| | 24-48 | 10YR 3/2 very dark graysh brown | LTS | Peu | Polyédrique | pulvérulent | | commencement de gleyfication |
| 31SMADF | 0-40 | 3,5Y 3/6 dark red | LTS | Néant | Polyédrique | pulvérulent | Microporeux | sol humide |

NB : 1, 2, 3 31 : numéro des profils ; SM : nom des personnes qui ont participées à l'échantillonnage (Sahondra et Mirana) ; MRS : Marosakoa, ADF : Andranofasika ; Les couleurs sont obtenues à partir de code Munsell : Y : jaune ; R : rouge ; YR : jaune-rouge ; 2,5 ; 3,5 ; 5 ; 10: teinte de plus jaune au moins rouge ; 3/2 , 3/6 (luminosité/saturation):rouge foncé ; 4/4: brun rougeâtre; 5/3 : marron ; 6/2 : gris brunâtre claire ; 3/8 : gris.

Tableau 23: Caractéristique morphopédologiques des sols sur carapace sableuse à pente faible et modérée

| Profil | Profondeur (cm) | Couleur | Texture | Racine | Structure | Compacité | Porosité | Activités biologiques |
|---------|-----------------|------------------------|---------|----------------|-------------------------|-------------|-------------|-----------------------|
| 5SMMRS | 0-10 | 10R 3/6 dark red | SL | abondante | Particulaire | Dense | microporeux | termite |
| | 10-25 | 10R 3/4 dark red | SL | abondante | Particulaire | Dense | microporeux | |
| | 25-60 | 10R 3/4 dark red | SL | racine de bois | Particulaire | Dense | microporeux | |
| 29SMMNR | 0-10 | 5YR5/8 yellowish red | LAS | abondante | polyédrique subanguleux | Pulvérulent | Poreux | |
| | 10-20 | 2,5YR5/8 red | LAS | peu | polyédrique | Pulvérulent | Poreux | |
| | 20 et plus | | LAS | | | | | |
| 30SMADF | 0-20 | 7,5R3/8 dark red | S | abondante | Particulaire | Pulvérulent | microporeux | termite |
| | 20-54 | 10R 3/6 dark red | S | abondante | Particulaire | Pulvérulent | microporeux | |
| | 54et plus | 2,5Y 4/4 reddish brown | SL | peu | Particulaire | Pulvérulent | microporeux | |
| 32SMADF | 0-17 | 2,5YR 4/6 red | LS | peu | Particulaire | Pulvérulent | Poreux | termite |
| | 17-34 | 2,5YR 3/6 dark red | S | peu | subanguleux | peu compact | microporeux | |
| | 34-60 | 10R 3/6 dark red | S | peu | Particulaire | Pulvérulent | microporeux | |
| | 60et plus | 2,5YR 4/8 red | LS | néant | Particulaire | Pulvérulent | Néant | |

NB : 5, 29, 30, 32 : numéro des profils ; SM : nom des personnes qui ont participées à l'échantillonnage (Sahondra et Mirana) ; MRS : Marosakoa, MNR : Manerinerina ; ADF : Andranofasika ; Les couleurs sont obtenues à partir de code Munsell : Y : jaune ; R : rouge ; YR : jaune-rouge ; 2,5 ; 3,5 ; 5 ; 10 : teinte de plus jaune au moins rouge ; 3/4 , 3/6, 3/8 (luminosité/ saturation):rouge foncé ; 4/4 : brun rougeâtre ; 5/8: rouge jaunâtre ; 4/6, 4/8 : rouge.

Annexe VIII : Résultats d'analyse physico-chimiques au laboratoire**Tableau 24 :** Résultats physico-chimique détaillés

| Sigle champs | Profondeur (cm) | Alti (m) | pH _{eau} | C (%) | N (%) | C/N | M0 | P(BrayII) | Bases échangeables (méq/100g) | | | | S | CEC (méq/100g) | V | Granulométrie (%) | | |
|--------------|--------------------|-------------|-------------------|----------|----------|------|-------|-----------|----------------------------------|-------|------|------|------------|-------------------|--------|-------------------|-----|-----|
| | | | | | | | (%) | (ppm) | Ca | Mg | K | Na | (méq/100g) | | | Arg | Lim | Sab |
| 1MMRS | (0-26) | 28 | 4,69 | 0,466 | 0,035 | 13,3 | 0,803 | 3,0 | 0,50 | 1,08 | 0,16 | 0,52 | 2,26 | 9,7 | 23,30 | 9 | 5 | 86 |
| 1MMRS | (26-40) | 28 | 4,55 | 0,233 | 0,021 | 11,1 | 0,402 | 2,2 | 1,05 | 1,17 | 0,11 | 0,57 | 2,90 | 9,6 | 30,21 | 7 | 9 | 84 |
| 1MMRS | (40 et plus) | 28 | 4,58 | 0,276 | 0,021 | 13,1 | 0,476 | 2,4 | 0,85 | 1,83 | 0,08 | 0,16 | 2,92 | 7,5 | 38,93 | 7 | 7 | 86 |
| 2SMMRS | (0-42) | 40 | 5,21 | 0,238 | 0,014 | 17,0 | 0,410 | 7,8 | 9,50 | 12,50 | 4,36 | 3,26 | 29,62 | 25,6 | 115,70 | 10 | 3 | 87 |
| 2SMMRS | (42-70) | 40 | 5,02 | 0,068 | 0,006 | 11,3 | 0,117 | 18,6 | 17,00 | 42,50 | 0,72 | 1,91 | 62,13 | 84,1 | 73,88 | 8 | 23 | 69 |
| 3SMMRS | (0-24) | 37 | 5,30 | 1,250 | 0,098 | 12,8 | 2,155 | 1,7 | 17,50 | 17,50 | 1,92 | 1,87 | 38,79 | 35,8 | 108,35 | 18 | 7 | 75 |
| 3SMMRS | (24-48) | 37 | 5,58 | 0,530 | 0,042 | 12,6 | 0,914 | 0,3 | 20,50 | 17,50 | 4,87 | 4,13 | 47,00 | 45,6 | 103,07 | 18 | 7 | 75 |
| 4SMMRS | (0-10) | 29 | 7,10 | 0,614 | 0,042 | 14,6 | 1,059 | 3,2 | 41,00 | 30,80 | 0,15 | 0,33 | 72,28 | 76,8 | 94,11 | 41 | 6 | 53 |
| 4SMMRS | (10-40) | 29 | 6,88 | 0,909 | 0,070 | 13,0 | 1,567 | 4,9 | 38,50 | 31,70 | 0,19 | 0,37 | 70,76 | 79,2 | 89,34 | 39 | 8 | 53 |
| 5SMMRS | (0-10) | 96 | 4,76 | 0,298 | 0,032 | 9,3 | 0,514 | 3,4 | 0,31 | 0,15 | 0,09 | 0,20 | 0,75 | 1,8 | 41,67 | 8 | 5 | 87 |
| 5SMMRS | (10-25) | 96 | 4,91 | 0,092 | 0,008 | 11,5 | 0,159 | 2,6 | 0,29 | 0,18 | 0,05 | 0,14 | 0,65 | 1,8 | 36,33 | 10 | 3 | 87 |
| 5SMMRS | (25-60) | 96 | 4,64 | 0,088 | 0,007 | 12,6 | 0,152 | 3,8 | 0,36 | 0,20 | 0,03 | 0,16 | 0,75 | 1,9 | 39,32 | 12 | 3 | 85 |
| 6SMMRS | (0-17) | 34 | 5,39 | 0,320 | 0,032 | 10,0 | 0,552 | 2,7 | 0,33 | 0,17 | 0,08 | 0,19 | 0,76 | 1,3 | 58,15 | 8 | 3 | 89 |
| 6SMMRS | (17-60) | 34 | 4,77 | 0,091 | 0,008 | 11,4 | 0,157 | 4,1 | 0,21 | 0,09 | 0,04 | 0,14 | 0,48 | 1,0 | 47,70 | 8 | 1 | 91 |

NB : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 : numéro des profils ; SM : nom des personnes qui ont participées à l'échantillonnage (Sahondra et Mirana) ; MRS : Marosakoa.

Tableau 24b : Résultats physico-chimique détaillés

| Sigle champs | Profondeur (cm) | Alti (m) | pH _{eau} | C (%) | N (%) | C/N | M0 | P(BrayII) (ppm) | Bases échangeables (méq/100g) | | | | S | CEC (méq/100g) | V | Granulométrie (%) | | |
|--------------|--------------------|-------------|-------------------|----------|----------|------|-------|--------------------|----------------------------------|-------|------|------|------------|-------------------|---------|-------------------|-----|-----|
| | | | | | | | (%) | | Ca | Mg | K | Na | (méq/100g) | | | Arg | Lim | Sab |
| 7SMMRS) | (0-13 | 71 | 4,96 | 0,074 | 0,028 | 2,6 | 0,128 | 1,8 | 0,07 | 0,04 | 0,09 | 0,12 | 0,32 | 2,0 | 15,95 | 6 | 7 | 87 |
| 7SMMRS | (13-27) | 71 | 4,10 | 0,194 | 0,028 | 6,9 | 0,334 | 2,7 | 0,19 | 0,03 | 0,08 | 0,15 | 0,45 | 4,6 | 9,83 | 6 | 7 | 87 |
| 7SMMRS | (27 et plus) | 71 | 4,60 | 0,171 | 0,021 | 8,1 | 0,295 | 2,1 | 0,17 | 0,02 | 0,07 | 0,13 | 0,39 | 4,5 | 8,71 | 6 | 7 | 87 |
| 8SMANK | (0-15) | 28 | 4,55 | 0,376 | 0,036 | 10,4 | 0,648 | 7,2 | 1,45 | 4,83 | 0,08 | 0,24 | 6,60 | 11,0 | 60,000 | 15 | 7 | 78 |
| 8SMANK | (15-46) | 28 | 4,40 | 0,406 | 0,036 | 11,3 | 0,700 | 2,3 | 1,40 | 3,08 | 0,05 | 0,28 | 4,81 | 12,5 | 38,480 | 15 | 7 | 78 |
| 9SMANK | (0-17) | 40 | 5,26 | 0,436 | 0,024 | 18,2 | 0,752 | 1,0 | 1,70 | 14,20 | 0,20 | 0,32 | 16,42 | 19,3 | 85,078 | 13 | 3 | 84 |
| 9SMANK | (17-50) | 40 | 5,09 | 0,010 | 0,002 | 5,0 | 0,017 | 2,5 | 6,15 | 33,30 | 0,21 | 0,65 | 40,31 | 38,4 | 104,974 | 7 | 7 | 86 |
| 10SMANK | (0-18) | 34 | 4,53 | 0,868 | 0,087 | 10,0 | 1,496 | 1,6 | 1,55 | 6,42 | 0,17 | 0,23 | 8,37 | 12,7 | 65,906 | 19 | 3 | 78 |
| 10SMANK | (18-55) | 34 | 4,67 | 0,494 | 0,047 | 10,5 | 0,852 | 1,5 | 1,45 | 8,58 | 0,08 | 0,22 | 10,33 | 15,4 | 67,078 | 15 | 3 | 82 |
| 11SMANK | (0-10) | 39 | 4,45 | 0,607 | 0,094 | 6,5 | 1,046 | 2,1 | 0,37 | 1,58 | 0,64 | 0,78 | 3,37 | 8,3 | 40,602 | 15 | 9 | 76 |
| 11SMANK | (10et plus) | 39 | 4,26 | 0,542 | 0,042 | 12,9 | 0,934 | 1,1 | 0,15 | 0,69 | 0,46 | 0,70 | 2,00 | 8,1 | 24,691 | 15 | 7 | 78 |
| 12SMANK | (0-15) | 60 | 5,08 | 0,636 | 0,056 | 11,4 | 1,096 | 3,4 | 1,75 | 1,67 | 0,19 | 0,23 | 3,84 | 6,7 | 57,313 | 13 | 3 | 84 |
| 12SMANK | (15-27) | 60 | 4,80 | 0,235 | 0,021 | 11,2 | 0,405 | 2,6 | 1,65 | 2,42 | 0,19 | 0,27 | 4,53 | 5,6 | 80,893 | 11 | 9 | 80 |
| 12SMANK | (27et plus) | 60 | 4,66 | 0,373 | 0,014 | 26,6 | 0,643 | 2,8 | 3,30 | 3,67 | 0,41 | 0,35 | 7,73 | 11,4 | 67,807 | 11 | 11 | 78 |
| 13SMANK | (0-34) | 53 | 4,73 | 0,094 | 0,007 | 13,4 | 0,162 | 5,5 | 2,45 | 4,33 | 0,11 | 0,27 | 7,16 | 7,9 | 90,633 | 8 | 3 | 89 |
| 13SMANK | (34-54) | 53 | 4,87 | 0,092 | 0,007 | 13,1 | 0,159 | 5,7 | 2,25 | 4,75 | 0,13 | 0,28 | 7,41 | 8,9 | 83,258 | 6 | 3 | 91 |
| 13SMANK | (54-70) | 53 | 4,78 | 0,065 | 0,006 | 10,8 | 0,112 | 28,2 | 12,00 | 25,80 | 0,85 | 1,17 | 39,82 | 43,2 | 92,176 | 6 | 25 | 69 |

NB : 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 : numéro des profils ; SM : nom des personnes qui ont participées à l'échantillonnage (Sahondra et Mirana) ; MRS : Marosakoa. ;
 ANK : Ankazomborona.

Tableau 24c: Résultats physico-chimique détaillés.

| Sigle champs | Profondeur (cm) | Alti (m) | pH _{eau} | C (%) | N (%) | C/N | M0 | P(BrayII) (ppm) | Bases échangeables (méq/100g) | | | | S | CEC (méq/100g) | V | Granulométrie (%) | | |
|--------------|--------------------|-------------|-------------------|----------|----------|------|-------|--------------------|----------------------------------|-------|------|------|----------------|-------------------|---------|-------------------|-----|-----|
| | | | | | | | (%) | | Ca | Mg | K | Na | (méq/ 100g) | | | Arg | Lim | Sab |
| 13SMANK | (70et plus) | 53 | 5,24 | 0,046 | 0,003 | 15,3 | 0,079 | 36,6 | 11,50 | 29,20 | 0,90 | 1,61 | 43,21 | 42,3 | 102,151 | 4 | 27 | 69 |
| 14SMANK | (0-17) | 28 | 5,33 | 0,672 | 0,066 | 10,2 | 1,159 | 2,8 | 2,55 | 2,75 | 0,24 | 0,32 | 5,86 | 9,3 | 63,011 | 9 | 3 | 88 |
| 14SMANK | (17-47) | 28 | 4,93 | 0,281 | 0,028 | 10,0 | 0,484 | 2,4 | 3,85 | 3,25 | 0,17 | 0,31 | 7,58 | 10,4 | 72,885 | 11 | 3 | 86 |
| 14SMANK | (47-60) | 28 | 5,00 | 0,220 | 0,021 | 10,5 | 0,379 | 1,7 | 6,45 | 4,17 | 0,26 | 0,36 | 11,24 | 12,8 | 87,813 | 13 | 3 | 84 |
| 15SMMAE | (0-15) | 10 | 4,77 | 1,030 | 0,063 | 16,3 | 1,776 | 1,8 | 3,95 | 12,50 | 0,44 | 0,44 | 17,33 | 27,0 | 64,185 | 16 | 9 | 75 |
| 15SMMAE | (15-35) | 10 | 4,81 | 0,558 | 0,054 | 10,3 | 0,962 | 1,8 | 3,30 | 15,80 | 0,28 | 0,33 | 19,71 | 27,5 | 71,673 | 17 | 10 | 73 |
| 15SMMAE | (35-70) | 10 | 5,05 | 0,075 | 0,007 | 10,7 | 0,129 | 1,8 | 2,75 | 15,00 | 0,26 | 0,32 | 18,33 | 25,1 | 73,028 | 13 | 8 | 79 |
| 15SMMAE | (70et plus) | 10 | 5,11 | 0,111 | 0,007 | 15,9 | 0,191 | 1,8 | 4,90 | 20,80 | 0,54 | 0,70 | 26,94 | 39,9 | 67,519 | 17 | 14 | 69 |
| 16SMMAE | (0-9) | 25 | 4,77 | 0,117 | 0,014 | 8,4 | 0,202 | 2,9 | 5,40 | 10,80 | 0,28 | 0,27 | 16,75 | 19,3 | 86,788 | 8 | 7 | 85 |
| 16SMMAE | (9-18) | 25 | 4,54 | 0,035 | 0,007 | 5,0 | 2,2 | 0,04 | 0,01 | 0,12 | 0,25 | 0,27 | 0,65 | 19,5 | 3,318 | 8 | 5 | 87 |
| 16SMMAE | (18-25) | 25 | 4,68 | 0,037 | 0,007 | 5,3 | 0,064 | 1,5 | 0,04 | 0,02 | 0,12 | 0,27 | 0,45 | 17,8 | 2,517 | 6 | 7 | 87 |
| 16SMMAE | (25et plus) | 25 | 4,85 | 0,033 | 0,007 | 4,7 | 0,057 | 0,9 | 0,03 | 0,03 | 0,15 | 0,30 | 0,51 | 14,2 | 3,599 | 10 | 9 | 81 |
| 17SMMAE | (0-19) | 22 | 5,99 | 0,223 | 0,035 | 6,4 | 0,384 | 53,3 | 20,00 | 20,00 | 0,33 | 0,44 | 40,77 | 32,6 | 125,055 | 26 | 6 | 68 |
| 17SMMAE | (19-61) | 22 | 6,48 | 0,011 | 0,010 | 1,1 | 0,019 | 18,5 | 4,15 | 4,75 | 0,09 | 0,19 | 9,18 | 8,8 | 104,273 | 6 | 2 | 92 |
| 17SMMAE | (61et plus) | 22 | 6,29 | 0,014 | 0,010 | 1,4 | 0,024 | 14,1 | 4,25 | 4,58 | 0,10 | 0,17 | 9,10 | 7,5 | 121,360 | 6 | 2 | 92 |
| 19SMMAN | (0-19) | 90 | 4,45 | 0,049 | 0,004 | 12,0 | 0,084 | 8,1 | 1,65 | 1,33 | 0,49 | 1,04 | 4,51 | 19,3 | 23,368 | 10 | 9 | 81 |

NB : 13, 14, 15, 16, 17, 19: numéro des profils ; SM : nom des personnes qui ont participées à l'échantillonnage (Sahondra et Mirana) ; ANK : Ankazomborona ; MAE : Maevanaka ; MAN : Manarenja

Tableau 24d: Résultats physico-chimique détaillés.

| Sigle champs | Profondeur (cm) | Alti (m) | pH _{eau} | C (%) | N (%) | C/N | M0 | P(BrayII) (ppm) | Bases échangeables (méq/100g) | | | | S | CEC (méq/100g) | V | Granulométrie (%) | | |
|--------------|--------------------|-------------|-------------------|----------|----------|------|-------|--------------------|----------------------------------|-------|------|------|------------|-------------------|---------|-------------------|-----|-----|
| | | | | | | | (%) | | Ca | Mg | K | Na | (méq/100g) | | | Arg | Lim | Sab |
| 19SMMAM | (19-+) | 90 | 4,75 | 0,076 | 0,007 | 10,9 | 0,131 | 2,5 | 1,70 | 0,66 | 0,26 | 0,57 | 3,18 | 12,8 | 24,852 | 8 | 7 | 85 |
| 20SMMAN | (0-31) | 83 | 4,87 | 0,472 | 0,047 | 10,0 | 0,814 | 1,1 | 6,50 | 4,33 | 0,72 | 1,35 | 12,90 | 18,9 | 68,254 | 5 | 7 | 88 |
| 20SMMAN | (31-50) | 83 | 5,15 | 0,124 | 0,012 | 10,3 | 0,214 | 1,5 | 11,00 | 6,58 | 0,69 | 1,22 | 19,49 | 28,8 | 67,674 | 11 | 11 | 78 |
| 20SMMAN | (50etplus) | 83 | 4,73 | 0,110 | 0,007 | 15,7 | 0,190 | 0,8 | 12,00 | 6,83 | 0,69 | 1,52 | 21,04 | 34,0 | 61,882 | 15 | 29 | 56 |
| 22SMMGP | (0-24) | 65 | 4,04 | 0,487 | 0,042 | 11,6 | 0,840 | 3,5 | 3,35 | 5,50 | 0,21 | 0,25 | 9,30 | 26,4 | 35,235 | 14 | 5 | 81 |
| 22SMMGP | (24-44) | 65 | 4,17 | 0,212 | 0,021 | 10,1 | 0,365 | 3,6 | 1,35 | 2,58 | 0,07 | 0,19 | 4,19 | 15,9 | 26,333 | 10 | 5 | 85 |
| 22SMMGP | (44-60) | 65 | 5,12 | 0,236 | 0,022 | 10,7 | 0,407 | 6,1 | 3,90 | 4,08 | 0,12 | 0,35 | 8,45 | 20,9 | 40,416 | 12 | 7 | 81 |
| 22SMMGP | (60et plus) | 65 | 4,92 | 0,115 | 0,011 | 10,5 | 0,198 | 3,5 | 5,50 | 25,83 | 0,44 | 1,13 | 32,90 | 39,2 | 83,916 | 34 | 9 | 57 |
| 23SMAMBV | (0-15) | 98 | 4,90 | 0,327 | 0,031 | 10,5 | 0,564 | 3,0 | 1,40 | 1,83 | 0,44 | 0,83 | 4,50 | 8,2 | 54,878 | 9 | 8 | 83 |
| 23SMAMBV | (15-67) | 98 | 5,17 | 0,145 | 0,014 | 10,4 | 0,250 | 0,9 | 4,15 | 4,25 | 0,51 | 1,30 | 10,21 | 36,8 | 27,745 | 23 | 6 | 71 |
| 23SMAMBV | (67etplus) | 98 | 4,72 | 0,071 | 0,007 | 10,1 | 0,122 | 4,5 | 0,90 | 0,54 | 0,10 | 0,61 | 2,15 | 12,2 | 17,623 | 5 | 6 | 89 |
| 24SMAMBV | (0-22) | 89 | 4,76 | 0,594 | 0,049 | 12,1 | 1,024 | 4,6 | 5,50 | 3,58 | 0,49 | 1,13 | 10,70 | 17,2 | 62,209 | 23 | 5 | 72 |
| 24SMAMBV | (22-42) | 89 | 4,96 | 0,187 | 0,014 | 13,4 | 0,322 | 1,0 | 16,50 | 5,67 | 0,33 | 0,63 | 23,13 | 5,4 | 428,333 | 9 | 1 | 90 |
| 24SMAMBV | (42 et +) | 89 | 5,52 | 0,065 | 0,006 | 10,8 | 0,112 | 1,4 | 10,00 | 3,50 | 0,20 | 0,41 | 14,11 | 17,8 | 79,270 | 9 | 3 | 88 |
| 26SMADM | (0-14) | 60 | 7,55 | 0,436 | 0,028 | 15,6 | 0,752 | 17,0 | 5,50 | 5,08 | 0,85 | 1,04 | 12,47 | 18,0 | 69,256 | 14 | 24 | 62 |
| 26SMADM | (14-48) | 60 | 8,34 | 0,111 | 0,007 | 15,9 | 0,191 | 4,7 | 12,50 | 3,92 | 0,33 | 0,48 | 17,23 | 20,7 | 83,242 | 12 | 22 | 66 |
| 26SMADM | (48etplus) | 60 | 8,38 | 0,074 | 0,007 | 10,6 | 0,128 | 26,1 | 7,50 | 3,33 | 0,28 | 0,52 | 11,63 | 15,8 | 73,627 | 8 | 26 | 66 |

NB : 19, 20, 22, 23, 24, 26 : numéro des profils ; SM : nom des personnes qui ont participées à l'échantillonnage (Sahondra et Mirana) ; MAN : Manarenja ; MGP : Mangapaika ; AMBV : Ambovondramanesa

Tableau 24e: Résultats physico-chimique détaillés.

| Sigle champs | Profondeur (cm) | Alti (m) | pH _{eau} | C (%) | N (%) | C/N | M0 | P(BrayII) (ppm) | Bases échangeables (méq/100g) | | | | S | CEC (méq/100g) | V | Granulométrie (%) | | |
|--------------|--------------------|-------------|-------------------|----------|----------|------|-------|--------------------|----------------------------------|-------|------|------|------------|-------------------|--------|-------------------|-----|-----|
| | | | | | | | (%) | | Ca | Mg | K | Na | (méq/100g) | | | Arg | Lim | Sab |
| 27SMADM | (0-19) | 58 | 6,58 | 0,243 | 0,022 | 11,0 | 0,419 | 12,3 | 4,75 | 0,53 | 0,26 | 0,43 | 5,97 | 6,9 | 86,522 | 25 | 7 | 68 |
| 27SMADM | (19-52) | 58 | 6,29 | 0,188 | 0,014 | 13,4 | 0,324 | 4,9 | 5,80 | 3,33 | 0,36 | 0,78 | 10,27 | 11,1 | 92,523 | 17 | 11 | 72 |
| 27SMADM | (52et plus) | 58 | 5,44 | 0,112 | 0,011 | 10,2 | 0,193 | 22,6 | 6,50 | 13,30 | 0,67 | 1,13 | 21,60 | 26,3 | 82,129 | 19 | 13 | 68 |
| 28SMMNR | (0-53) | 81 | 3,65 | 0,087 | 0,007 | 12,4 | 0,150 | 2,7 | 3,40 | 4,33 | 0,36 | 0,78 | 8,87 | 26,5 | 33,472 | 19 | 3 | 78 |
| 28SMMNR | (53-90) | 81 | 4,30 | 0,105 | 0,008 | 13,1 | 0,181 | 2,4 | 4,85 | 6,58 | 0,62 | 1,22 | 13,27 | 29,3 | 45,290 | 23 | 1 | 76 |
| 28SMMNR | (90et plus) | 81 | 4,22 | 0,049 | 0,007 | 7,0 | 0,084 | 3,4 | 3,00 | 3,92 | 0,44 | 0,78 | 8,14 | 18,6 | 43,763 | 13 | 1 | 86 |
| 29SMMNR | (0-10) | 74 | 4,30 | 0,345 | 0,021 | 16,4 | 0,595 | 0,5 | 0,41 | 0,48 | 0,46 | 0,78 | 2,13 | 13,6 | 15,662 | 21 | 8 | 71 |
| 29SMMNR | (10-20) | 74 | 4,28 | 0,345 | 0,021 | 16,4 | 0,595 | 2,5 | 1,02 | 0,50 | 0,48 | 0,90 | 2,90 | 13,6 | 21,324 | 22 | 8 | 70 |
| 29SMMNR | (20et plus) | 74 | 4,23 | 0,346 | 0,021 | 16,5 | 0,597 | 3,2 | 1,50 | 0,56 | 0,49 | 1,04 | 3,59 | 13,6 | 26,397 | 23 | 8 | 69 |
| 30SMADF | (0-20) | 157 | 5,11 | 0,218 | 0,014 | 15,6 | 0,376 | 2,1 | 0,25 | 0,58 | 0,08 | 0,10 | 1,01 | 3,3 | 30,545 | 8 | 2 | 90 |
| 30SMADF | (20-54) | 157 | 4,54 | 0,118 | 0,012 | 9,8 | 0,203 | 4,5 | 0,05 | 0,39 | 0,10 | 0,15 | 0,69 | 4,8 | 14,313 | 10 | 0 | 90 |
| 30SMADF | (54et plus) | 157 | 4,42 | 0,106 | 0,011 | 9,6 | 0,183 | 2,3 | 0,11 | 0,32 | 0,11 | 0,18 | 0,71 | 4,7 | 15,106 | 12 | 0 | 88 |
| 31SMADF | (0-40) | 145 | 4,55 | 0,204 | 0,020 | 10,2 | 0,352 | 1,9 | 0,04 | 0,79 | 0,41 | 0,61 | 1,85 | 5,5 | 33,636 | 17 | 5 | 78 |
| 32SMADF | (0-17) | 128 | 4,34 | 0,179 | 0,049 | 3,7 | 0,309 | 2,5 | 1,10 | 0,27 | 0,09 | 0,18 | 1,64 | 3,3 | 49,576 | 6 | 2 | 92 |
| 32SMADF | (17-34) | 128 | 4,37 | 0,294 | 0,077 | 3,8 | 0,507 | 1,1 | 0,18 | 0,23 | 0,12 | 0,19 | 0,71 | 3,9 | 18,128 | 12 | 3 | 85 |
| 32SMADF | (34-60) | 128 | 4,55 | 0,178 | 0,042 | 4,2 | 0,307 | 1,8 | 0,65 | 0,12 | 0,18 | 0,20 | 1,15 | 3,1 | 36,935 | 10 | 1 | 89 |
| 32SMADF | (60 et plus) | 128 | 4,84 | 0,082 | 0,035 | 2,3 | 0,141 | 1,9 | 0,09 | 0,18 | 0,08 | 0,14 | 0,49 | 2,0 | 24,500 | 8 | 0 | 92 |

NB : 27, 28, 29, 30, 31, 32 : numéro des profils ; SM : nom des personnes qui ont participées à l'échantillonnage (Sahondra et Mirana) ADM : Andranomamy ; MNR : Manerinerina ; ADF : Andranofasika.

Annexe IX : Normes d'interprétation d'analyses physico-chimique

Tableau 25 : Norme d'interprétation de pH

| pH | <4,5 | <5 | <5,5 | <6 | <6,5 | <7,3 | <7,9 |
|----|-------------------|-----------|-----------------|-------------------|------------------|--------|--------------------|
| | extrêmement acide | très fort | fortement acide | Moyennement acide | faiblement acide | neutre | légèrement alcalin |

(Baise, 2008)

Tableau 26: Norme d'interprétation de bases échangeables

| | très | pauvre | moyen | riche | très riche |
|----------------|------|--------|-------|-------|------------|
| Calcium(Ca) | <1 | <2,3 | <3,5 | <7 | > ou =7 |
| Magnésium (Mg) | <0,4 | <1 | <3 | <8 | > ou =8 |
| potassium (K) | <0,1 | <0,2 | <0,4 | <0,8 | > ou =0,8 |
| sodium (Na) | <0,1 | <0,3 | <0,7 | <2 | > ou =2 |

(Ministère de coopération, 1978 ; Baise, 2008)

Tableau 27: Norme d'interprétation de Phosphore Bray II (P_2O_5), l'Azote Kjeldahl et carbone (C)

| | très pauvre | pauvre | moyen | riche | très riche |
|----------|-------------|--------|-------|-------|------------|
| P_2O_5 | <2,5 | <5 | <10 | <25 | > ou =25 |
| N | <0,05 | <0,1 | <0,15 | <0,25 | >ou =0,25 |
| C | <0,5 | <1 | <3 | <5 | > ou =5 |

(Dabin, 1967 ; Ministère de coopération, 1978 ; Baise, 2008)

Tableau 28: Norme d'interprétation de rapport entre carbone et azote (C /N)

| C /N | <10 | <20 | > ou =20 |
|------|-------------|--------------|-----------|
| | trop faible | Satisfaisant | trop fort |

(Baise, 2008)

Tableau 29 : Norme d'interprétation de capacité d'échange cationique (CEC)

| CEC | <5 | <10 | <25 | <40 | > ou = 40 |
|----------------|-------------|--------|---------|-------|------------|
| interprétation | très faible | faible | moyenne | Forte | très forte |

(Baise, 2008)



Annexe X: Cartes des pentes à 5 classes

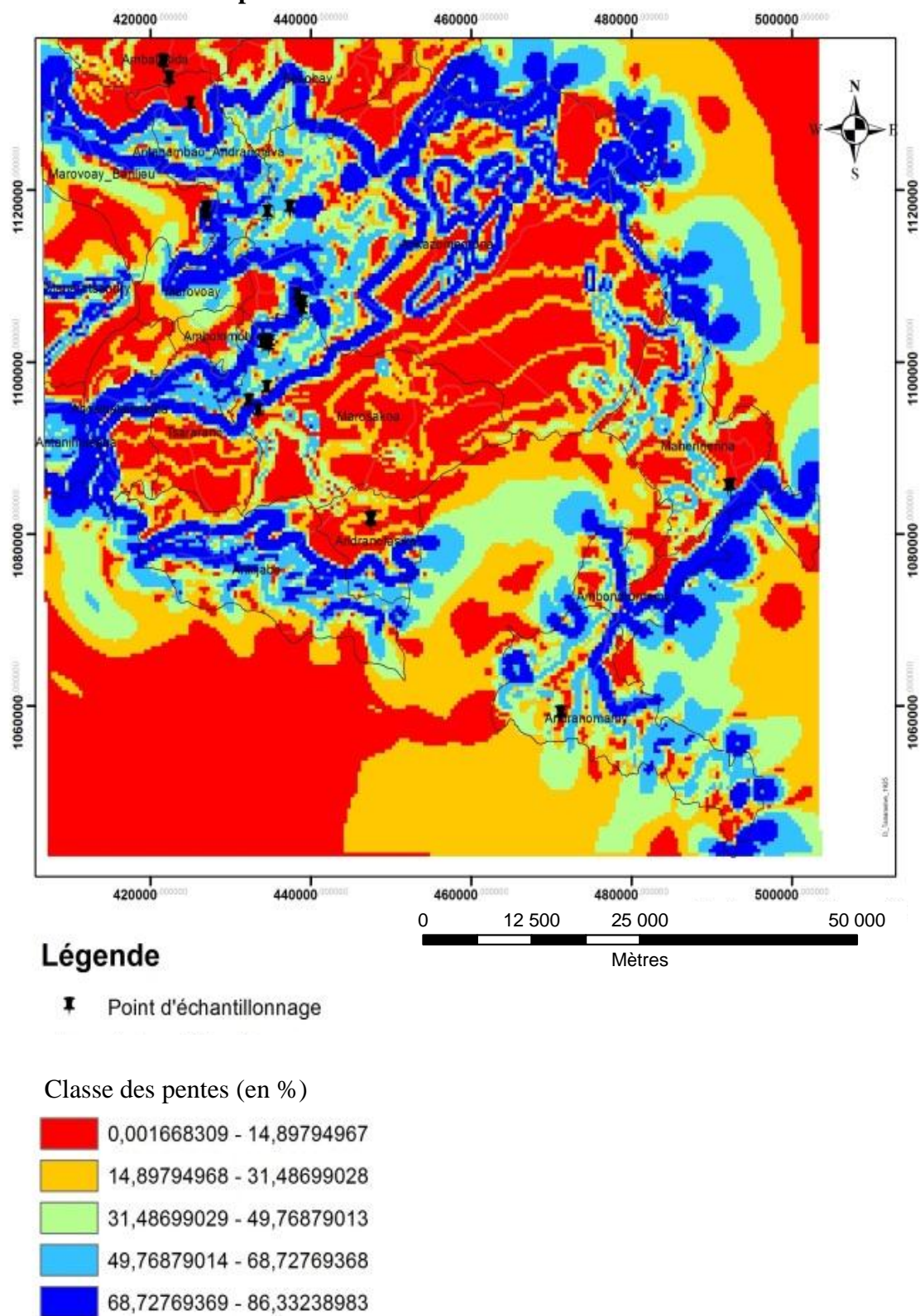
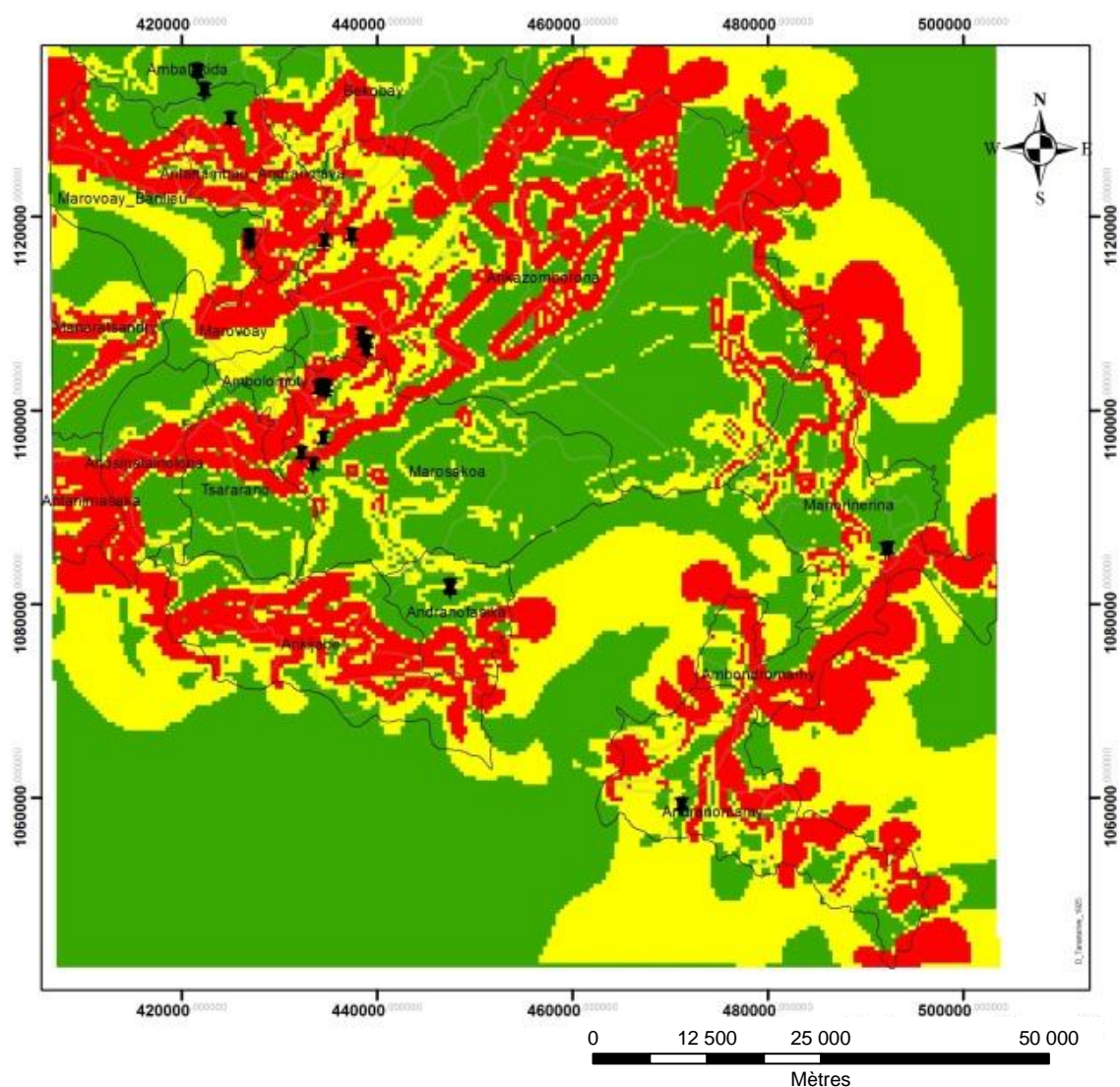


Figure 45: Carte des pentes en 5 classes utilisées pour la formation gréseuse
(Auteur, 2018, ArcGis 10.1 et MNT)

Annexe XI : Cartes des pentes à 3 classes



Légende

✦ Point d'échantillonnage

Classe des pentes (en %)

0,001668309 - 23,70029775

23,70029776 - 54,16996417

54,16996418 - 86,33238983

Figure 46: Carte des pentes en 3 classes utilisées pour la carapace sableuse (Auteur, 2018 ; ArcGis 10.1 et MNT)