

Table des matières

REMERCIEMENTS	I
LISTE DES FIGURES	III
LISTE DES PHOTOS.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	V
LISTE DES CARTES.....	VI
LISTE DES ABREVIATIONS.....	VII
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I: PRESENTATION DU PARTENAIRE ET DE LA ZONE D'ETUDE.....	4
I.1 Présentation du partenaire.....	4
I.2 Présentation de la zone d'étude	5
I.2.1 Localisation	5
I.2.2 Description des milieux d'étude.....	6
I.3 Synthèse bibliographique.....	13
I. 3.1 Les propriétés physico-chimique du sol.....	13
I. 3.2 Evaluation de la végétation	19
I. 3.3 L'eau dans le sol.....	20
CHAPITRE II : METHODOLOGIE DE TRAVAIL	23
Synthèse méthodologique	23
II.1 Démarche globale.....	24
II.1.1 Phase préparatoire	24
II.1.2 Phase de collecte de données	27
II.1.3 Phase de traitement et d'analyse de données	30
II.1.4 Phase de synthèse et de rédaction	31
II.2 Méthodes spécifiques	31
II.2.1 Les propriétés physico-chimiques des sols réhabilités évoluent-ils vers ceux des sites de référence naturelle ?	31
II.2.2 Les végétations plantées dans les sables déminéralisés auront-ils un taux de croissance égale à ceux des zones de référence naturelle ?	36
II.3 Cadre opératoire	39

CHAPITRE III: RESULTATS ET INTERPRETATIONS	40
III.1 Evolution des propriétés du sol	40
III.1.1 Sur le plan physico-chimique	40
III.1.2 Selon le profil pédologique	43
III.2 Evolution de la végétation.....	51
III.2.1 Composition floristique de la végétation	51
III.2.2 Structure verticale	55
III.2.3 Structure diamétrique	57
III.2.4 Relation sol-végétation.....	59
III.3 Relation sol-eau-végétation.....	61
III.3.1 Humidité des sols	61
III.3.2 Bilan Hydrique	62
CHAPITRE IV: DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS	64
IV.1 Discussion des résultats des sites réhabilités	64
IV.2 Discussion des questions	64
IV.2.1 Les propriétés physico-chimiques des sols réhabilités évoluent-ils vers ceux des sites de référence naturelle ?	64
IV.2.2 Les végétations plantées dans les sables déminéralisés auront-ils un taux de croissance égale à ceux des zones de référence naturelle ?	65
IV.3 Recommandations.....	65
IV.3.1 Amélioration des réhabilitations	65
IV.3.2 Etudes complémentaires.....	66
CONCLUSION.....	68
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	70
ANNEXES	

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu Tout Puissant, qui par sa grâce et sa volonté, a permis que ce mémoire puisse être réalisé.

Au terme de la réalisation de ce travail, nous tenons à exprimer nos remerciements et notre reconnaissance à ceux qui ont contribué à sa réalisation. Particulièrement aux membres du jury :

- *Mr RANDRIAMALALA René Paul ; Maître de conférences, qui nous a fait l'honneur de présider cette soutenance.*
- *Mme RAMBOLAMANANA Voahangy, Maître de conférences, encadreur pédagogique, qui n'a pas ménagé ses efforts pour m'orienter dans les démarches à suivre et qui m'a bien assisté lors de l'exécution de ce mémoire.*
- *Mme RAMIANDRISOA Njararivelo Louisa ; Maître de conférences, qui a accepté de faire partie des membres du jury comme examinateur.*
- *Mme ANDRIAMALAZA Sahondra ; Maître de conférences, qui a également accepté de siéger parmi les membres du jury en tant qu'examinateur.*

Nos remerciements vont également à:

- *La société QMM S.A pour ses appuis technique et matériels.*
- *Monsieur RABENATOANDRO Johny, Directeur du Département Environnement et Monsieur RAMANAMANJATO Jean Baptiste, surintendant de la section Biodiversité et Réhabilitation qui m'ont prises dans leur équipe.*
- *Monsieur ROBISON Jemisa, Chef de service de la Réhabilitation, mon maître de stage au sein de la société QMM S.A qui malgré ses lourdes tâches, m'a formé et accompagné tout au long de cette expérience avec beaucoup de patience et de pédagogie.*
- *Toute l'équipe de la Biodiversité et Réhabilitation pour leurs gentillesse et leurs aides, leurs compréhensions et surtout pour les conseils qu'ils ont pu me prodiguer au cours de mon travail.*

- *Tous les superviseurs ainsi que toute l'équipe du laboratoire de QMM S.A pour leurs collaborations et leurs aides dans les différentes analyses effectuées au sein de leur département.*
- *Tous les enseignants au sein du Département des Sciences de la Terre pendant les années de formation.*
- *La famille RAVELOMANANTSOA Jimmy Parfait pour leur accueil chaleureux et leur aide tout au long des huit mois passé à Tolagnaro.*
- *Mes parents, toute ma famille et mes amis qui m'ont toujours soutenu durant mes années d'étude et dans la réalisation de ce mémoire.*

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Courbe de rétention d'eau d'un sol

Figure 2: Code de Munsell Soil Color Chart

Figure 3: Triangle des textures (version USAID in Gobat et al)

Figure 4: Diagramme Ombrothermique de Walter et Leith

Figure 5: Placette circulaire à surface fixe

Figure 6: Schémas récapitulatif de la méthodologie

Figure 7: pH du sol dans les sites d'étude

Figure 8: Granulométrie des sites d'étude

Figure 9: Taux de matière organique pour chaque site

Figure 10: Schémas récapitulatif des profils pédologiques de chaque site

Figure 11: Structure verticale rehab 1an

Figure 12: Structure verticale rehab 2ans

Figure 13: Structure diamétrique rehab 1an

Figure 14: Structure diamétrique rehab 2ans

Figure 15: Etat de la hauteur fût par rapport à Htot (rehab 2ans)

Figure 16: Hauteur moyenne des arbres par placette

Figure 17: Courbe de variation de l'état d'humidité des sites

Figure 18: Bilan hydrique de la station de Mandena en 2014

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Forêt dégradée

Photo 2: Milieux ouverts à anjavidy

Photo 3: Zone de conservation

Photo 4: Site Réhabilité

Photo 5: Mise en place d'une fosse pédologique

Photo 6: Une fosse pédologique

Photo 7: Quelques échantillons de sols

Photo 8: Série de tamis pour les analyses granulométrique

Photo 9: ZC (zone de conservation)

Photo 10: FD (Forêt dégradée)

Photo 11: AJV (Milieux ouvert à anjavidy)

Photo 12: Réhabilitation 2ans I

Photo 13: Réhabilitation 2ans II

Photo 14: Réhabilitation 1an I

Photo 15: Réhabilitation 1an II

Photo 16 : Etat actuel de la réhabilitation 2013

Photo 17 : Etat actuel de la réhabilitation 2014

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Paramètres climatiques de Tolagnaro (2010-2014)

Tableau II: Principales informations fournies par la couleur des échantillons du sol

Tableau III: Le statut acido-basique des sols

Tableau IV: Organisation générale des travaux sur terrain

Tableau V: Cadre logique de l'étude

Tableau VI: Listes des familles des espèces dominantes de chaque site

Tableau VII: Données hydrologiques de la station de Mandena en 2014

Tableau VIII: Liste de peuplement placette A

Tableau IX: Liste de peuplement placette B

Tableau X: Liste de peuplement placette C

Tableau XI: Liste de peuplement placette D

Tableau XII: Liste de peuplement placette E

Tableau XIII: Liste de peuplement placette F

Tableau XIV: Liste de peuplement placette G

Tableau XV: Liste de peuplement placette H

Tableau XVI: Liste de peuplement placette I

Tableau XVII: Liste de peuplement placette J

Tableau XVIII: Liste des espèces dans la zone de conservation

Tableau XIX: Liste des végétations rencontré dans la forêt dégradée

Tableau XX: Modèle de Thornthaite

Tableau XXI: Données brutes des propriétés physiques

Tableaux XXII: Données brutes des propriétés chimiques

Tableau XXIII: Pourcentage en grain

LISTE DES CARTES

Carte 1: Carte de localisation de la zone de Mandena

Carte 2: Carte géologique de la région

Carte 3: Carte pédologique de la zone de Mandena

Carte 4: Carte de la mise en place des fosses pédologiques

LISTE DES ABREVIATIONS

QMM: QIT Madagascar Minerals

OMNIS: Office des Mines National des Industries Stratégiques

PGEP: Plan de Gestion Environnemental du Projet

ONE: Office National de l'Environnement

EIES: Etude d'Impact Environnemental et Social

US: United States

GPS: Global Positioning System

Hfut: Hauteur fût

Htot: Hauteur total

DHP: Diamètre à Hauteur Poitrine

DC: Diamètre au collé

P, H, F: Position du Houppier, Forme du Houppier, Fût

MO: Matière organique

LOI: Loss on Ignition

pH: Potentiel Hydrogène

CEC: Capacité d'Echange Cationique

ZC: Zone de Conservation

FD: Forêt dégradée

AJV: anjavidy

RHB13: Réhabilitation plantée en 2013

RHB14: Réhabilitation plantée en 2014

INTRODUCTION

Le sol constitue une ressource naturelle spécifique, indispensable mais fragile, qui est à la fois le support de la végétation naturelle, un milieu de vie adéquat pour certains organismes et microorganismes vivants, le sol fait partie du paysage et contient également des ressources minérales en quantité et en qualité importante. La préservation de son utilisation, de ses fonctions environnementales et écologiques, ainsi que la prise en compte de leur rôle dans l'aménagement et l'utilisation du territoire constituent un enjeu collectif pour un développement durable.

La pédologie est une conception relativement nouvelle de la science du sol, ce dernier prend naissance et évolue sous l'influence de milieu dit actif. C'est un milieu dynamique constitué de particules meubles plus ou moins agrégées résultant de l'action de la biosphère et de l'atmosphère.

En raison de sa position d'interface vis-à-vis des autres ressources naturelles, le sol joue un rôle clé sur l'environnement, c'est pourquoi dans le cadre de l'exploitation d'ilménite et de ses engagements envers le gouvernement Malagasy, représenté par l'ONE (Office National de l'Environnement), Rio Tinto QMM S.A (QIT Madagascar Minerals Société Anonyme) a défini dans son PGEP (Plan de Gestion Environnemental du Projet), la réhabilitation et la restauration des terrains touchés par l'extraction de sable à ilménite dans trois principaux gisements dans la région de Tolagnaro : Mandena, Sainte Luce et Petriky pour une durée de 40ans.

Avant le démarrage de l'exploitation, une étude d'impact environnemental et social (EIES) concernant les milieux récepteurs a été menée en 1992 : les milieux physiques, biologiques et humains. Ainsi pour l'étude des sols dans le secteur de Mandena, trois classes ont été relevés selon les critères de classification faites par le Dr Raymond Rabeson du Laboratoire de Pédologie à Antananarivo: les très jeunes sols, les sols de sesquioxydes de fer et de manganèse et les sols hydromorphes, mais globalement la majeure partie du site jouie d'un sol sableux avec un faible niveau de fertilités (RAKOTONIRINA T.H, 2011)

Les sols vont être excavés au cours de l'extraction de l'ilménite, puis remblayés et revégétalisés durant la réhabilitation du site. L'ilménite sera extraite du sable puis celui-ci va servir pour le remblayage et la restauration du sol dans les sites excavés.

Les études menées sur la réhabilitation par QMM S.A ont été toujours focalisées sur la végétation. Peu d'étude sur le sol n'a été effectuée, de plus elles semblent être insuffisantes pour pouvoir évaluer son évolution. Bon nombre de question peuvent être posés, en l'occurrence :

- Quelles sont les études déjà effectués concernant l'état pédologique du site avant l'exploitation?
- Quelles ont été les activités mises en œuvre au cours de la réhabilitation des sites d'extraction?
- Comment se présente l'état actuel de référence sur le plan pédologique de ces sites réhabilités par QMM S.A ?

Bref quel est le bilan de la réhabilitation au niveau de l'amélioration de la qualité du sol? Ce bilan tiendra compte de l'évolution du sol des sites réhabilités ainsi que des opportunités d'amélioration y afférentes.

La présente étude intitulé : **Essais d'évaluation de la réhabilitation du sol dans le gisement d'ilménite de Mandena à Tolagnaro** a pour objectif global d'évaluer les sols réhabilités dans le gisement de Mandena, secteur actuellement exploité par la société QMM S.A.

Les objectifs spécifiques seront:

- Analyser les propriétés physico-chimiques des sables déminéralisés¹
- Déterminer l'évolution de la végétation.
- Déterminer la relation sol-eau-végétation

¹ Sable dépourvu d'ilménite

En définitive, ces objectifs auront à apporter des éclaircissements concernant les points suivants:

Les propriétés physico-chimiques des sols réhabilités évoluent-ils vers ceux des sites de référence naturelle?

D'après les précédentes études, il a été décrit que chaque élément qui constitue le sol est un facteur important qui lui confère sa structure et sa texture, il est donc évident que l'extraction de certains minéraux dans le sol va peut être modifié, même changer ses caractéristiques physiques et chimique.

Les végétations plantées dans le sable déminéralisé auront-ils un taux de croissance égale à ceux des zones de référence naturelle?

Les essais de plantation déjà effectués ont montrés que les taux de survies et les taux de croissance des espèces plantées dans le sable minéralisé ne sont pas aussi différents que celles qui ont été plantés dans le sable déminéralisé (Manon VINCELETTE, Johnny RABENATOANDRO, Laurent RANDRIHASIPARA, Faly RANDRIATAFIKA et Jörg U. GANZHORN, 2007).

Ce travail de mémoire comprendra quatre (4) grandes parties :

- La présentation de la zone d'étude
- La méthodologie de travail
- Les résultats et leurs interprétations
- Les discussions et recommandations

CHAPITRE I: PRESENTATION DU PARTENAIRE ET

DE LA ZONE D'ETUDE

I.1 Présentation du partenaire

QMM est une société anonyme de droit malgache, détenue à hauteur de 80% par Rio Tinto et de 20% par l'Etat malgache représenté par l'OMNIS. Elle a mis en chantier une opération d'extraction de sables minéralisés près de Tolagnaro à l'extrémité sud-est de Madagascar. Au cours des 40 années à venir, QMM prévoit extraire de l'ilménite et du zircon à partir des sables minéraux lourds sur une zone d'environ 6000 hectares le long de la côte.

QMM a commencé à explorer la région Anosy vers la fin des années 80 et en même temps à entamer des études sociales et environnementales préliminaires. Au milieu des années 90, QMM a mis en place un programme social et environnemental permanent.

Une Convention d'Etablissement, servant de cadre légal et fiscal des opérations, a été conclue en 1998 entre QMM et l'Etat malgache. Celle-ci a été ratifiée par l'Assemblée nationale malgache et promulguée par le Président de Madagascar.

QMM a réalisé une EIES (étude d'impact environnementale et sociale) formelle entre 1998 et 2001. Le Gouvernement a octroyé un permis environnemental en 2001.

Le projet minier a obtenu la décision d'investissement de Rio Tinto en août 2005. La construction a démarré en janvier 2006 et en mai 2009, la première expédition d'ilménite a été acheminée du port d'Ehoala, nouvellement construit au sud-ouest de Tolagnaro.

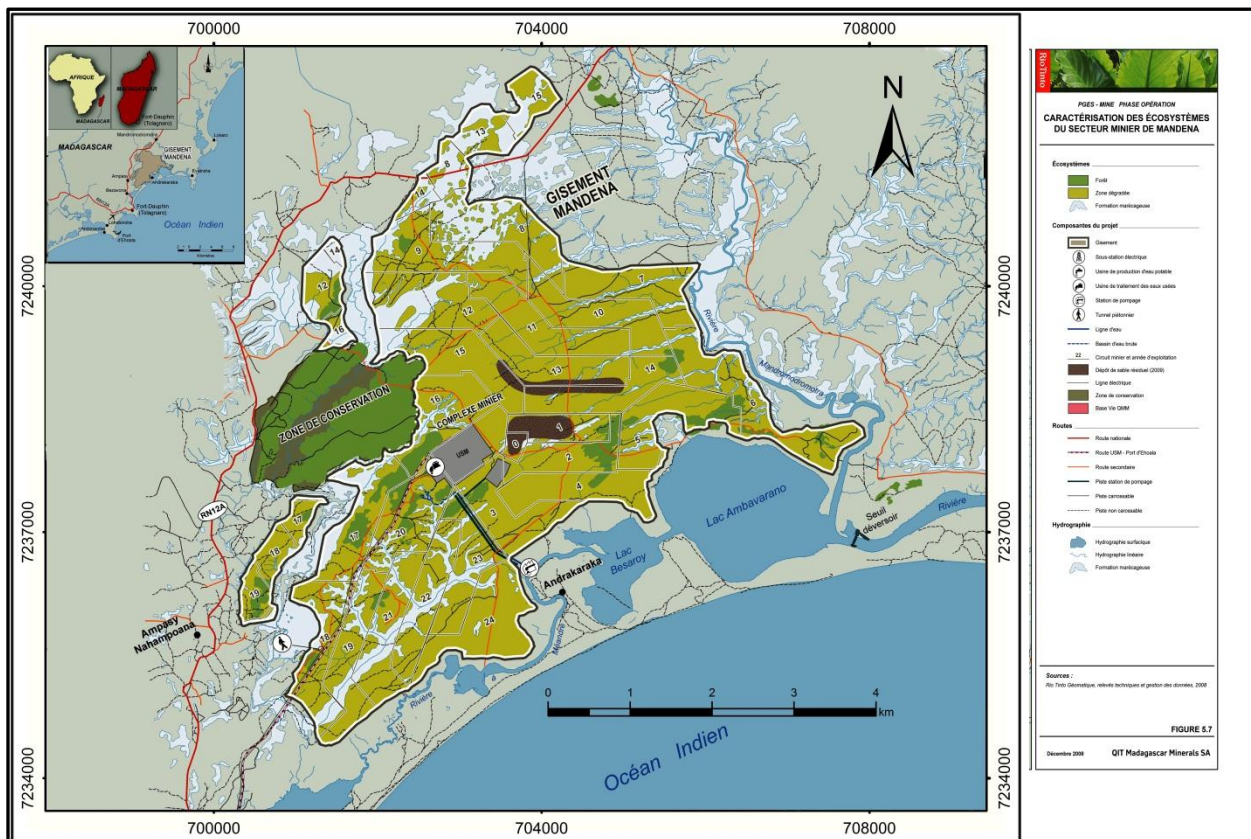
Le coût total de l'investissement à Madagascar et au Canada pour achever le projet est de 1,1 milliard de dollars US, avec environ 940 millions de dollars US investis à Madagascar.

Source : <http://www.riotintomadagascar.com/>

I.2 Présentation de la zone d'étude

I.2.1 Localisation

La zone de Mandena (carte 1) se trouve dans la région Anosy, à environ 10Km au nord de la ville de Tolagnaro, suivant la route nationale n°12a. Elle s'étend entre les latitudes 24°56'S et 24°58'S, et les longitudes 46°59'E et 47°01'E, et à 50m d'altitude, comprise entre deux chefs-lieux de commune rurale : la commune rurale d'Ampasy-Nahampoana d'une superficie de 9850ha, et la commune rurale de Mandromondromotra avec 15700ha.



Carte 1 : Carte de localisation de la zone de Mandena

Source: QIT Madagascar Minerals, modifié par l'auteur

I.2.2 Description des milieux d'étude

I.2.2.1 Milieux physiques

a) Climat

Mandena se trouve dans une zone à climat chaud et humide, et la température est plus fraîche que la normale. La température moyenne annuelle est de 23,7°C, le mois le plus froid est le mois de Juillet avec une température de 19,9°C, tandis que les mois les plus chauds sont en Janvier et en Décembre avec 26,9°C de température.

La précipitation annuelle moyenne à Tolagnaro est d'environ 1600mm, et de 2217,8mm pour la zone de Mandena en particulier. La saison des pluies s'étend de Novembre à Mai et compte pour 70% des précipitations annuelles.

Le tableau I montre les données climatiques (précipitation et température) de la station de Tolagnaro:

Tableau I: Paramètres climatiques de Tolagnaro (2010-2014)

Mois /années	2010		2011		2012		2013		2014	
Paramètres	P (mm)	T (°C)	P (mm)	T (°C)	P (mm)	T (°C)	P (mm)	T (°C)	P (mm)	T (°C)
Janvier	73,20	26,25	294,00	26,30	293,80	25,33	218,50	23,59	184,81	26,41
Février	80,80	26,38	316,00	25,50	126,42	26,74	986,08	23,96	140,76	26,39
Mars	392,00	25,74	106,00	26,10	209,77	25,65	239,16	22,61	29,45	26,52
Avril	92,20	25,30	293,00	24,90	332,78	24,20	115,49	21,10	19,46	24,79
Mai	89,20	23,61	131,00	23,00	113,34	22,81	253,43	19,89	90,80	22,82
Juin	83,60	21,02	130,00	22,40	95,49	21,57	45,78	18,45	49,18	22,01
Juillet	87,40	20,04	20,00	20,80	11,37	21,36	40,61	18,64	97,56	20,85
Aout	72,91	20,68	408,00	21,00	1,94	22,19	97,61	18,18	105,84	21,15
Septembre	32,40	21,38	16,00	22,00	376,92	21,97	7,17	20,12	63,45	21,55
Octobre	73,60	23,92	48,00	22,70	72,67	23,61	150,79	18,40	254,74	22,79
Novembre	26,20	25,95	58,00	24,40	87,58	23,41	113,20	21,08	150,03	23,65
Décembre	153,58	25,67	214,00	25,00	109,66	25,10	82,49	21,06	439,02	25,53

Source : Station météorologique de Tolagnaro (2010-2014)

Toutes ces données sont traduites par la courbe Ombrothermique (figure 1) suivante :

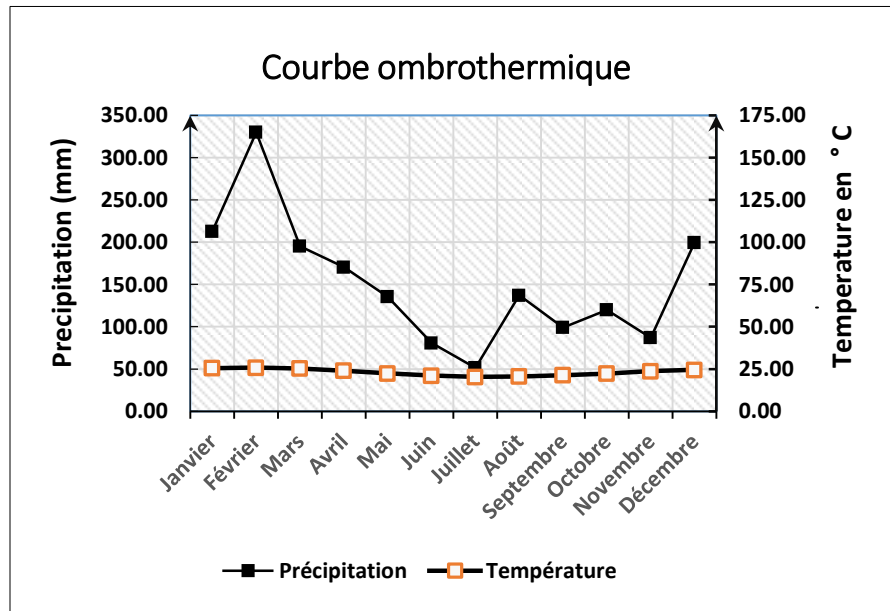


Figure 1 : Diagramme Ombrothermique de Walter et Leith (2010-2014)

b) Géologie et Géomorphologie

Le relief de la zone de Tolagnaro est dominé par la chaîne de montagnes de Vohimena, orientée selon un axe nord-sud, et qui culmine à 529m au niveau du pic Saint-Louis (près de Tolagnaro). A la base de cette falaise montagneuse (à l'est), une plaine côtière, avec une topographie de type ondulatoire (dune/interdune), et s'étend sur quelques kilomètres jusqu'à l'Océan Indien (QMM, 2001).

Du point de vue géologique, la région est divisée en deux (02) zones :

- L'Androy, appartenant au socle cristallin précambrien. Il est recouvert à l'Est par les basaltes du massif volcanique de l'Androy et à l'Ouest et au Sud par des dépôts quaternaires (sables roux et blancs et formations dunaires au Sud d'Ambovombe) ;

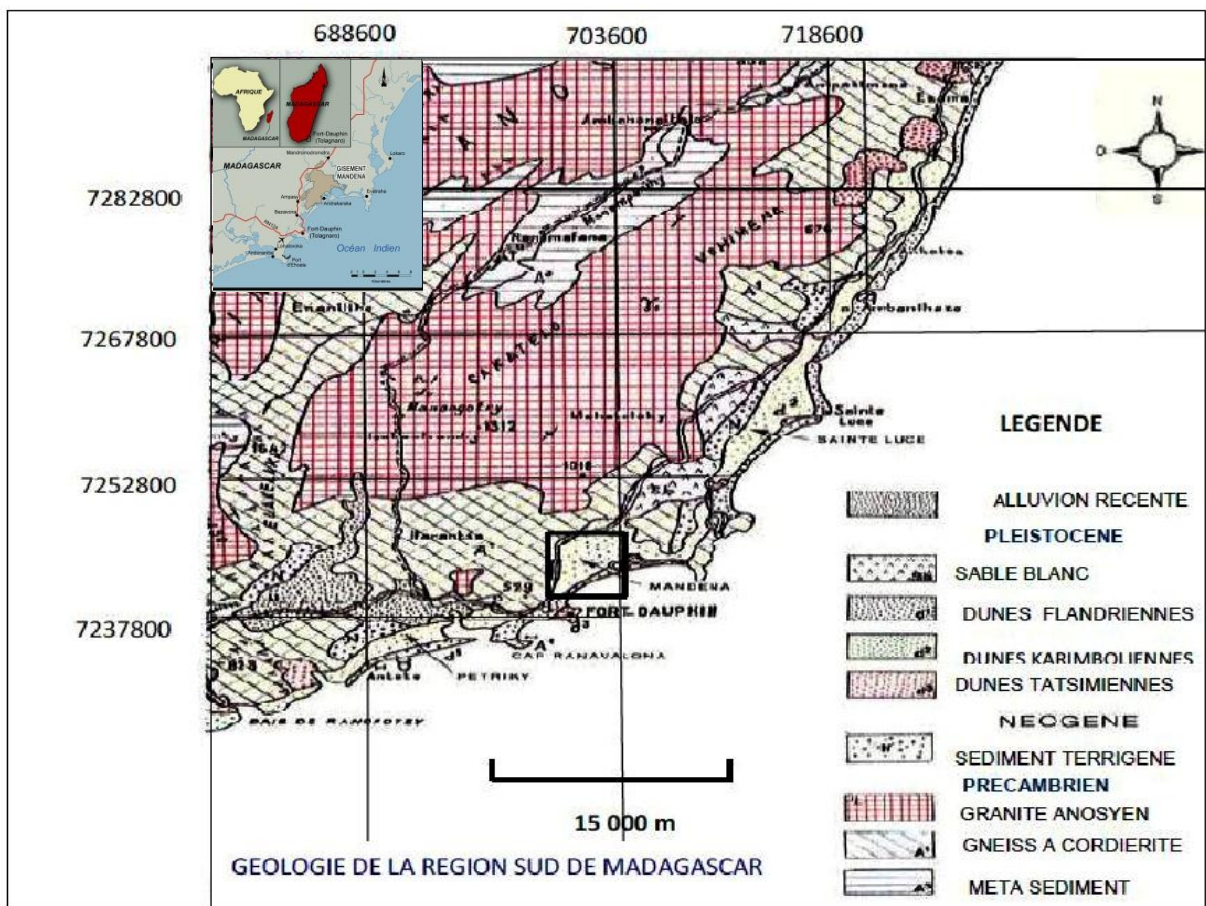
- L'Anosy (Tolagnaro) est formé de roches granitiques, gneissiques (léptynite) et migmatiques avec des sols ferrallitiques.

Tolagnaro est formée par des dépôts dunaires se trouvant entre la mer et la chaîne anosyenne.

Des massif sont situés à la base de complexe ultramétamorphique androyen et sont composés de roches telle que (RANDRIAMALALA ,1999):

- les formations ignées : composées de granite, de syénite et de charnockite ;
- les formations cristallophylliennes : Représentées par une succession de banc de leptynite et de gneiss à cordiérite ;
- les formations tardives recoupantes : Caractérisées par de pyroxenites et des bancs applitiques de quartzite.

La géologie de la zone de Mandena (carte 2) est caractérisée par un modèle sédimentaire de dunes karimboliennes résultant du cycle de transgression - régression marine du Pléistocène. Les substrats rocheux originel est de nature latéritique, dans la baie de Mandena, la couche de sable minéralisé s'est accumulée sur une épaisseur moyenne de 18m, elle repose sur une épaisse couche d'argile marine et sur le substrat rocheux latéritique.



Carte 2 : Carte géologique de la région

Source: Lewis Environmental Consultants, 1992.

c) Hydrologie et hydrogéologie

Les eaux de surface de Mandena regroupent principalement deux réseaux fluviaux, les rivières Lanirano à l'est, et à l'ouest la rivière Mandromodromotra. Trois lacs dans le sud: Lanirano, Besaroy et Ambavarano, et une rivière à méandre qui serpente sur environ 4km, dans une région marécageuse, entre les lacs Lanirano et Besaroy. Les lacs et la rivière à méandre forment un réseau lagunaire, relié à l'océan par la rivière Anony.

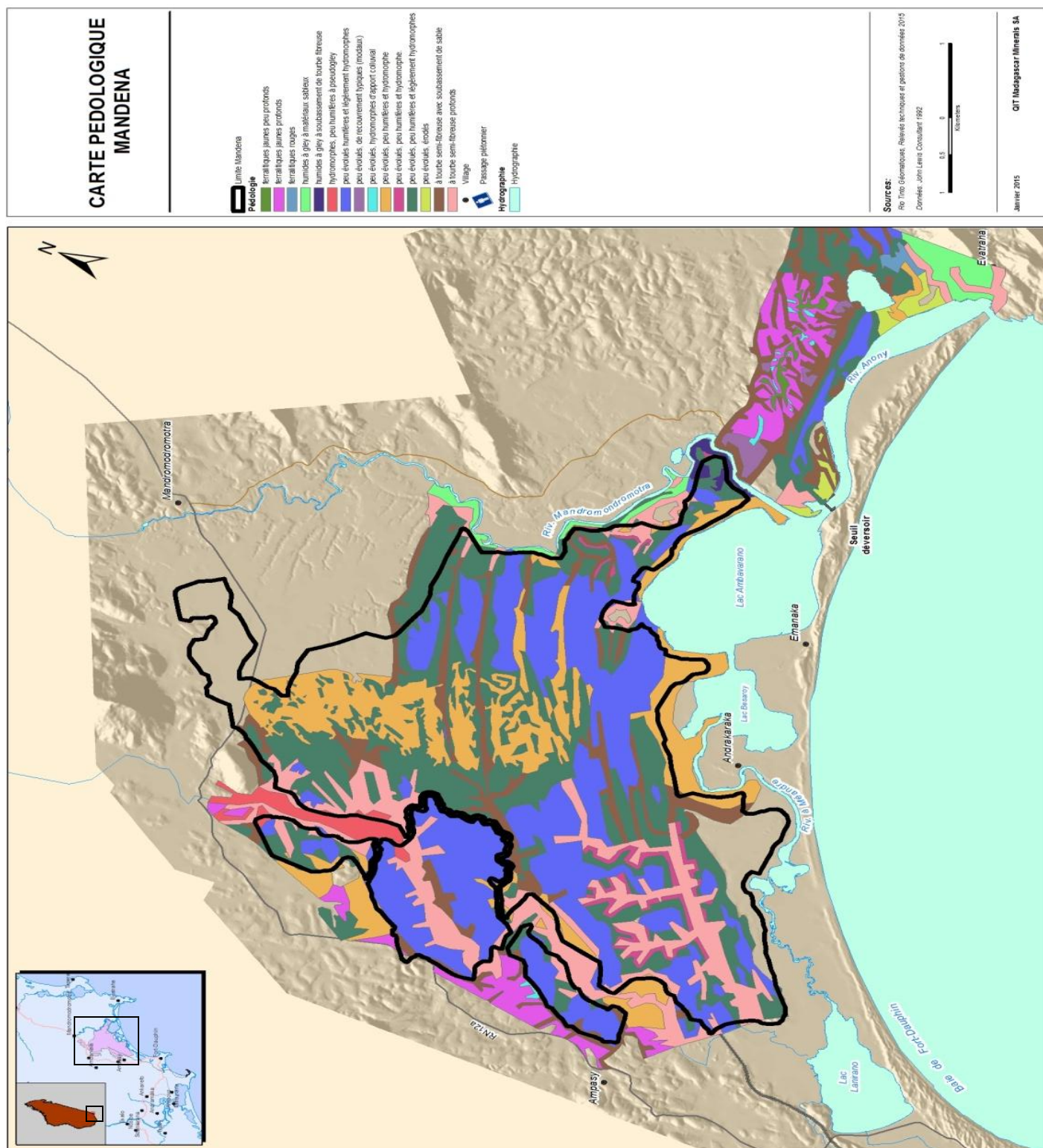
Les eaux souterraines viennent soit des précipitations, soit directement ou dans les écoulements de surfaces à partir des terrains adjacents (Water Management Consultants, 2001, cité par QMM, 2001). Le niveau de la nappe phréatique varie généralement de 2m (0m près des cours d'eau) à 8m selon les endroits.

d) Pédologie

La zone est couverte majoritairement d'un sol appartenant à la classe des sols peu évolués, en l'occurrence des sols peu évolués non climatiques formés de sédiments marins et éoliens, et des sols peu évolués non climatiques formés de sédiments colluviaux. Le sol est formé sur les sables Holocènes déposés par la dernière régression marine.

Les autres classes de sols présents sont relativement peu représentées: il s'agit de sols à sesquioxydes de fer et de manganèse associés à la roche du socle et de sols hydromorphes qui se sont constitués dans des pièges topographiques, comme les interdunes. Il y a également des sols tourbeux et des sols à Gley (QMM, 2001).

Chimiquement, les sols de Mandena sont acides avec un pH variant de 3.1 à 4.7. Le niveau de salinité du sol va de faible à modérée. Généralement, la concentration des cations est extrêmement faible, de même pour leur potentiel d'échanges ainsi que le taux de calcium-magnésium. La teneur en MO (Matière organique) de la plupart des sols est élevée, mais les principaux nutriments (N, P, K) sont peu abondants. Les autres éléments nutritifs à l'état de traces (cuivre, zinc, manganèse, bore et molybdène) sont également déficitaires (QMM, 2001).



Carte 3 : Carte pédologique de la zone de Mandena

Source : Rio Tinto Géomatiques, Relevés technique et gestions de données 2015.

I.2.2.2 Milieu biologique

a) Flore

Dans la région de Mandena, trois types de formations végétales sont répertoriés : la forêt littorale, les milieux ouverts et les marécages. La forêt littorale est une variante édaphique de la forêt humide de l'est. Celle de Mandena est de type tropical humide sur sols sableux. Les milieux ouverts sont des formations secondaires composés de forêt dégradée et anjavidy (*Phillipia Sp*) qui montrent la dégradation des sols et les formations marécageuses occupent les dépressions interdunaire, les marécages couvrent 13% de la zone d'étude.

b) Faune

La forêt littorale de Mandena abrite 18 espèces de mammifères, 14 espèces d'amphibiens, 34 espèces de reptiles et 31 espèces d'oiseaux, pour un total de 97 vertébrés terrestres. Les milieux ouverts comptent 4 espèces de mammifères, 4 espèces d'amphibiens, 11 espèces de reptiles et 32 espèces d'oiseaux (51 au total). Quant aux milieux marécageux, ils abritent 10 espèces de mammifères, 13 espèces d'amphibiens, 25 espèces de reptiles et 28 espèces d'oiseaux pour un total de 76 vertébrés terrestres. Ces milieux, en tant qu'habitat faunique leur servent de refuge, de lieu de reproduction, et de lieu de recherche de nourriture.

I.2.2.3 Milieu socio - économique

Comme toute la ville de Tolagnaro, la zone de Mandena est peuplée surtout par les Antanosy, qui sont originaire du sud-est de Madagascar, mais on peut aussi rencontrer des Antandroy. En 2001, les Communes d'Ampasy-Nahampoana comptaient respectivement 3442 habitants et 2801 habitants pour la commune de Mandromodromotra. (QMM, 2001). En 2008 plus de 46 000 habitants vivaient à Tolagnaro. Depuis l'installation de la société minière QMM, la population de la ville a plus que doublé, aujourd'hui le nombre de personnes vivant à Tolagnaro est estimé à plus de 70000. Dans la région Anosy la densité moyenne de la population est estimée à 22 habitants/ km².

En général, la plupart de la population vit de l'agriculture qui est la principale source de revenu des habitants (QMM 2001), de la pêche (eau douce ou maritime), de l'élevage surtout l'élevage de zébus dont la valeur est beaucoup plus important que la dimension économique, et l'élevage de porcs. Ils vivent également de l'exploitation forestière telle que la collecte de bois et

le charbonnage, et aussi par l'exploitation des Mahampy (*Lepironia mucronata*) pour fabriquer des produits artisanaux, ce dernier est surtout une activité féminine.

Le nouveau port de Tolagnaro situé à Ehoala (jouant un rôle important sur le plan régional, dans la mesure où sa position géographique se trouve sur la route des échanges Europe-Afrique du Sud-Océan Indien-Asie) à vocation à offrir un nouveau souffle à l'économie locale. La découverte de gisement d'ilménite (un minerai de titane et de fer) et de zirsill (un mélange de zircon et de sillimanite utilisé notamment dans l'industrie de l'électronique) a ainsi fortement inspiré les investissements du géant mondial Rio Tinto et de sa filiale malgache QMM SA. Les sables noirs de Tolagnaro renferment du bioxyde de titane qui sert de base à la couleur blanche et entre dans la composition de tous les produits synthétiques blancs, peintures, plastiques, etc. Ce gisement qui comblerait jusqu'à 10 % des besoins mondiaux pendant 40 ans permettra l'exportation de 750 000 tonnes d'ilménite et 40 000 tonnes de zirsill par an, à destination du Canada. L'installation de QMM SA a rassuré les investisseurs étrangers, à savoir des loueurs de 4x4, hôteliers, restaurateurs, logisticiens et voyageurs, qui s'intéressent désormais aux potentiels de Tolagnaro. Mais d'un point de vue Tolagnaro l'arrivée de QMM SA inspire une certaine réserve, d'autant que l'inflation est devenue la règle du jeu, même si ce projet a créé de très nombreux emplois directs. Les exigences pour la réalisation du projet ont été nombreuses : Rio Tinto/QMM a dû construire des routes et une centrale électrique produisant au moins l'équivalent de toute l'électricité actuellement consommée à Madagascar.

Dans le contexte économique actuel de Tolagnaro le port d'Ehoala est pressenti comme un outil déterminant de développement. Rio Tinto/QMM, qui est chargé de la gestion de l'infrastructure, a investi 110 millions de dollars et l'État Malgache 35 millions. La compagnie, propriétaire de l'usine d'extraction située à 14 kilomètres du Port, a construit une route reliant la mine de Mandena et le port d'Ehoala. L'équipement servira également à l'acheminement d'équipements divers, d'engins, de matériels, et de pièces de rechange. L'activité portuaire étant d'utilité publique, le site d'Ehoala assurera aussi dans d'excellentes conditions l'exportation et l'importation à Tolagnaro. Le sisal, les produits de la pêche, les produits de première nécessité, les matériaux de construction et les carburants circuleront ainsi plus aisément. Le port commence à permettre le développement du tourisme de croisière. Au final, il s'agit d'un véritable outil pour le développement de la région d'Anosy.

I.3 Synthèse bibliographique

I. 3.1 Les propriétés physico-chimique du sol

a) Importance de la propriété physico-chimique

Le sol prend naissance et évolue sous l'action combinée des facteurs du milieu. Lorsque l'évolution est terminée et qu'elle a donné naissance à un milieu équilibré, stables, les complexes organo-minéraux doués de propriété physique, chimique et biologiques bien définies confèrent au sol son individualité propres. (DUCHAUFFOUR, 1960)

En plus de la classification de leurs valeurs d'aptitude qui devient un passage obligé pour pouvoir planifier l'utilisation du sol et de choisir à bon escient les techniques adéquates de sa mise en valeurs, le sol peut aussi être classifié à partir de leurs propriété physico-chimique qui évoluent dans le temps, au cours de la différenciation des couches superposés constituant le sol. (RAMBELOSON F.R, 2006).

Le sol est d'abord caractérisé par une texture et une structure qui vont fortement conditionner ses propriétés physiques, chimiques, notamment celles liées à l'eau. (ANDRIANIRINA Y.F, 2007)

Les études pédologiques visent à acquérir la connaissance des sols, de leurs propriétés physiques et chimiques et de la teneur en matière organique. Elles retracent l'histoire du sol et tentent de prévoir son devenir. (BOULARD.B, MAPAQ.M, GRENIER, GIROUX. M, GIRARD.V, 2003)

b) Les caractères physico-chimiques du sol

- La couleur

La couleur du sol est déterminée par le contenu en matière organique, les conditions de drainage et le degré d'oxydation. La couleur du sol, tout en restant facilement observable, a peu d'utilité pour la prévision des caractéristiques du sol. La couleur est utilisée pour distinguer les limites des horizons dans un profil de sol, pour déterminer l'origine du matériau de base d'un sol, comme indication des conditions d'humidité et d'engorgement, et en tant que moyen qualitatif de mesure du contenu en matière organique, en sel et en carbonate des sols.(FAO)

La couleur d'un échantillon de terre fournit des informations quant à sa composition. (GOBAT. J.M, 2007)

Tableau II : Principales informations fournies par la couleur des échantillons du sol

Couleur de la terre	Signification
jaune	calcaire
jaune-ocre	calcaire riche en fer
jaune-beige	argiles calcaires (marnes)
brun	matière organique
brun-noir	idem, proportions élevées
noir	matière organique pure, tourbe minéralisée
rouge	oxydes de fer
taches rouille	fer oxydé sous l'influence de l'eau
gris-bleuté	fer réduit sous l'influence de l'eau
gris-blanc	appauvrissement en éléments et en argiles
violet-noir	présence de manganèse

Source : Protocoles de description du sol, version 2007

La couleur a une signification due essentiellement à la matière organique, au fer et au type d'argile. (ANDRINIELA. N. I, 2013)

La couleur est déterminée par le code Munsell Soil Color Chart, nom de la couleur à l'état sec/à l'état humide, dans ce code, à chaque couleur correspond une notation comportant 3 paramètres :

- La teinte (Hue) équivaut à la couleur spectrale dominante, laquelle est désignée par l'initiale du nom anglais de la couleur : R (rouge), Y (jaune), G (vert), B (bleu), YR (jaune-rouge) ; le nombre qui précède les initiales indique la proportion de l'intensité de la première couleur par rapport à l'ensemble
- La pureté (Value) correspond à la luminosité relative de la couleur en fonction de la quantité totale de lumière. Dans la pratique, le gris est additionné à la couleur de la gamme. L'intensité du gris est obtenue en mélangeant le noir absolu 0 au blanc pur noté 10. Les symboles de la pureté sont placés verticalement.
- L'intensité (Chroma) ou saturation est la force de la couleur spectrale. Elle correspond à la couleur de la gamme ajoutée d'une certaine proportion de gris de valeur connue, dont la quantité décroît de gauche à droite.



Figure 2: Code de Munsell Soil Color Chart

Source: Wikipédia

- La texture

La texture ou composition granulométrique est définie d'après la proportion de l'élément du sol, classés par catégories de grosseurs, après destruction des agrégats. Les éléments minéraux sont supposés de forme sphérique et l'Association internationale de la Science du sol les a classés de la façon suivante (DUCHAUFFOUR, 1960) :

- Sables grossiers : de 2mm à 0,2mm
- Sables fins : de 0,2mm à 20 μ
- Limons : de 20 à 2 μ
- Colloïdes minéraux : < 2 μ

La texture traduit la composition granulométrique de la terre fine, sa mesure précise ne peut se faire qu'en laboratoire. Mais avec un peu d'expérience elle s'apprécie néanmoins au touché. Selon leurs dimensions les particules se divisent en sables (2mm à 50 μ m), les limons (50 μ m à 2 μ m), les argiles (< 2 μ m). La connaissance de la texture permet d'indiquer les tendances du sol quant à ses qualités physiques (GOBAT. J.M, 2007).

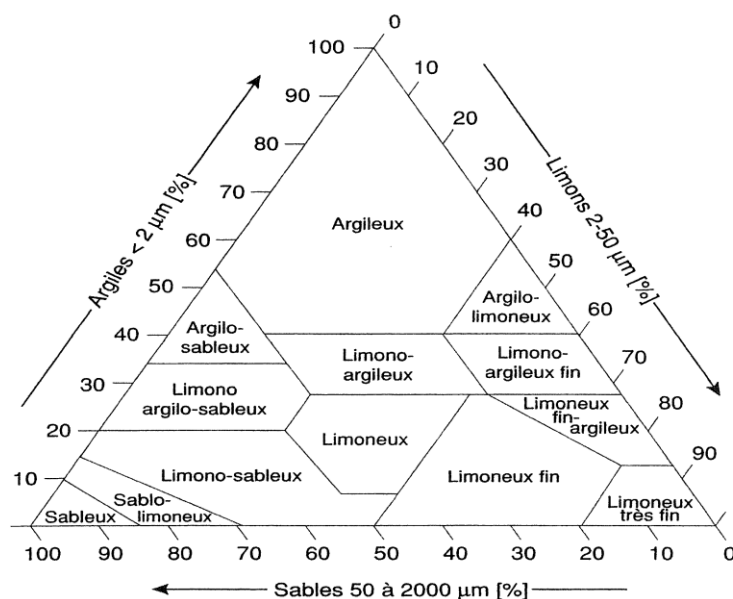


Figure 3: Triangle des textures (version USAID in Gobat et al)

Les éléments minéraux du sol (sable, limon et argile) déterminent la texture d'un sol. La texture influe sur le comportement d'un sol, en particulier sa capacité de rétention des éléments nutritifs et de l'eau. (FAO)

- La structure

La structure est la disposition des assemblages des éléments constituant en agrégats ou en unités structurales. La structure d'un sol peut être d'origine mécanique (poids de la terre, racines,...) et d'origine chimique (les ciments : argile, MO, Cation). La structure d'un sol peut-être particulière (graveleux, sableux, limoneux, plus ou moins fibreux), massive (cohérente, non cohérente), fragmentaire (arrondie, prismatique, polyédrique, cubique, lamellaire,) (RANDRIAMBOAVONJY, 2000)

La structure est le mode d'assemblage des constituants du sol à un moment donné, elle est variable dans le temps, par exemple en fonction de la saison. La structure est un état susceptible de modifications dans le temps, sous l'influence de facteurs, favorables ou défavorables. (GOBAT. J.M, 2007)

La structure complète la notion de texture, elle est liée à l'état des colloïdes du sol qui peuvent être, floculés à l'état d'agrégats élémentaires, plus ou moins stables ou dispersés (DUCHAUFFOUR, 1960)

- Le pH

Le pH agit fortement sur la fertilité du sol. En fait, le pH des eaux libres et interstitielles contenues dans la porosité, intervient de façon essentielle dans la nature et le développement des végétaux propres à tel ou tel écosystème terrestre ainsi que dans ceux de la microflore et de la faune édaphique. (ANDRINIELA. N. I, 2013)

Le pH est une notation qui rend compte de la concentration en ions H^+ du milieu et désigne ainsi le caractère très acide, acide, neutre ou alcalin d'un sol. (EKOUMOU. A. C, 2000).

Tableau III: Le statut acido-basique des sols

pH	Degré d'acidité
4 - 4.5	Très acide
4.5 - 5.5	acide
5.5 - 6.5	Peu acide
6.5 - 7.5	Neutre
7.5 - 8.5	Peu alcalin
>8.5	Alcalin

- Matière organique

Les débris de végétaux et d'animaux de toute nature constituent la source essentielle de la matière organique du sol. Elle est une source importante d'éléments nutritifs pour les plantes et la connaissance de sa teneur totale dans le sol renseigne sur sa potentialité fertilisante. La matière organique a également un rôle important dans la fabrication des agrégats, autrement dit sur l'élaboration de la structure du sol. L'absence de la matière organique rend la structure du sol instable. (SAUER. L. J, 1999)

Un sol prend naissance dès lors que la vie végétale et animale vient s'installer dans les débris de la décomposition d'une roche mère. A la mort de ces êtres vivants, leur matière s'incorpore au sol, se mélangeant aux substances minérales. Ils représentent alors les « constituants organiques » ou « matières organiques » (HUBER. G, SCHAUB. C. 2011)

Les débris végétaux de toutes nature, feuilles, rameaux morts qui tombent sur le sol, constituent la source essentielle de la matière organique, dès leur arrivée au sol, ils sont plus ou moins rapidement décomposés par l'activité biologique (DUCHAUFFOUR, 1960)

- Eléments échangeables

Les éléments échangeables calcium, magnésium, potassium et sodium, sont considérés en général comme représentant des éléments en réserve susceptibles de passer à l'état assimilable par les plantes. La détermination des cations échangeables s'effectue sur le filtrat récupéré lors de la saturation du sol avec l'acétate d'ammonium. Le sodium et le potassium sont dosés au photomètre à flamme, le calcium et le magnésium sont dosés par complexométrie d'absorption atomique. Les teneurs des éléments échangeables sont exprimées en Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} et Na^{+} . (RABEMANANTSOA. A. N, 2011).

- Somme des bases échangeables

La somme des éléments échangeables S est la somme de charges cationiques échangeables ou cations absorbés (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+}) fixés sur le complexe absorbant. La somme des éléments échangeables S est exprimée en mé%. (RAZAFIMAHEFA. P, 2010)

La somme des cations échangeables, notée S est la somme des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} et Na^{+}), dits d'acidité négligeable, susceptibles d'être fixés sur des sites négatifs dans un sol. (<http://www.student.ulb.ac.be>)

La somme des bases échangeables est la somme des cations basiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} et Na^{+}) susceptibles d'être fixés sur des sites négatifs dans un sol. Plus cette somme est élevée, plus le sol contient des cations basiques, ce qui ne veut pas dire qu'il devient plus basique. L'unité est le milliéquivalent par 100 grammes ($\text{mEq}/100 \text{ g}$) de sol. (BOULARD.B, MAPAQ.M, GRENIER, GIROUX. M, GIRARD.V, 2003)

- Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) d'un sol est une mesure du nombre total de sites disponibles pour l'échange de cations, ou du nombre total de cations échangeables, ou du nombre de sites négatifs dans la matrice du sol. (RAMANANTSOA. S, 2008)

La CEC est le nombre maximal de cations qu'une quantité déterminée de sol pourra retenir. Elle dépend du nombre de sites électriquement positifs que contient le complexe argilo-humique. Il est possible de mesurer la quantité totale des sites d'absorptions susceptibles d'être occupés par les cations. Cette mesure s'appelle CEC exprimé en milliéquivalent pour 100 grammes de sol ($\text{meq.}100\text{g}^{-1}$) ou ($\text{me.}100\text{g}^{-1}$). (RABEMANANTSOA. A. N, 2011)

- Taux de saturation

En chimie, le taux de saturation du sol est le rapport de la somme des cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} et Na^{+}) par la capacité d'échange cationique apportée par l'argile et les matières organiques présentes dans le sol. Ce rapport est utilisé en agronomie ou dans les sciences traitant du sol. Il peut être supérieur à 1. (RABEMANANTSOA. A. N, 2011)

Le taux de saturation est la proportion du complexes adsorbant effectivement occupés par les quatre cations échangeables alcalins et alcalino-terreux (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} et Na^{+}) à un moment donné, pour un horizon du sol.(<http://eduterre.ens-lyon.fr>)

I. 3.2 Evaluation de la végétation

- Structure totale (diamétrique)

La structure totale permet d'apprécier le passé et l'actuel de la forêt étudiée pour préfigurer sa potentialité et son évolution. En outre, la densité est un descripteur de base de l'état des sites et constitue un indice simple de la compétition moyenne au sein de la forêt. (ANDRINIELA. N. I, 2013)

La structure totale indique la distribution du nombre d'arbres suivant des classes diamétrique. (RAMANANTSOA. S, 2008)

- Structure verticale

La structure verticale montre les différentes stratifications qu'il y a au niveau d'une forêt. (ANDRINIELA. N. I, 2013)

Cette étude consiste à découler la structure des hauteurs qui renseigne sur la distribution du nombre de tiges par classe de hauteur. Cette analyse donne alors des indications sur la structure verticale et permet de déterminer à partir des hauteurs totales des arbres, la stratification de la forêt qui va nous donner une idée sur le tempérament des espèces. (RAMANANTSOA. S, 2008)

La structure verticale concerne les strates qui sont des sous-ensembles d'une formation définis par les hauteurs sensiblement identiques des végétaux qui les constituent. Concrètement, il s'agit d'une série de tranches de hauteurs. (RANDRIAMALALA. J, 2009)

- Structure horizontale

La structure horizontale est la répartition de la masse végétale dans le plan horizontal. Son approche est effectuée par des analyses dendrométriques c'est-à-dire des études de la surface terrière et du biovolume. (NOROMILANTO, 2011)

La structure horizontale d'une végétation concerne la répartition des individus du peuplement. (RANDRIAMALALA. J, 2009)

C'est l'étude de l'abondance et de la dominance pour les formations initiales. L'abondance vise à identifier la densité de la population ou peuplement étudié selon le type de sol, elle sera utile pour ressortir les espèces les plus nombreuses de chaque type de forêt. (RAMANANTSOA. S, 2008)

- Structure floristique

Elle exprime le nombre total des espèces présentes sur une surface donnée. (NOROMIARILANTO, 2011)

La structure floristique vise à connaître la composition floristique de la forêt pour en sortir la végétation. En confrontant les données recueillies actuellement avec les données archivées, l'accroissement ou la diminution de la richesse floristique (nombre d'espèces, genres et familles présents) de la végétation. (RAMANANTSOA. S, 2008)

- Structure spatiale

C'est la disposition dans l'espace des composants de la végétation. (SAUER. L. J, 1999)

La structure spatiale est la manière dont les plantes sont réparties et agencés les uns par rapport aux autres. (RAMANGASON, 1986)

Pour apprécier la structure spatiale, l'abondance et la dominance absolue, l'analyses des hauteurs et l'index PHF (Position du houppier, forme du houppier, fût) sont considérés. (RAMANANTSOA. S, 2008)

I. 3.3 L'eau dans le sol

a) Importance

La fertilité du sol ne se manifeste que dans la mesure où il existe dans le sol une réserve d'eau suffisante pour compenser les pertes par évapotranspiration et ainsi assurer une bonne hydratation de la plante. (HUBER. G, SCHAUB. C., 2011)

b) Les formes de l'eau dans le sol

- L'eau de ruissèlement : en hydrologie ce sont les eaux qui s'écoulent à la surface des sols. Il s'oppose au phénomène d'infiltration. Ce phénomène se produit quand l'intensité des précipitations dépasse l'infiltration et la capacité de rétention de la surface du sol. (BOULARD.B, MAPAQ.M, GRENIER, GIROUX. M, GIRARD.V, 2003)
- L'eau de gravité : Correspond à l'eau qui remplit momentanément, après les périodes de pluie, les pores plus grossiers du sol. Elle obéit à la pesanteur et s'écoule d'autant plus vite que le volume des pores grossiers. (DUCHAUFFOUR, 1960)

C'est l'eau de saturation qui s'écoule d'abord rapidement puis de plus en plus lentement quittant les espaces vides qui se remplissent d'air. Cette eau occupait la macroporosité du sol. Lorsque l'eau cesse de s'écouler, la terre ressuyée atteint son taux d'humidité à la capacité au champ, valeur qui traduit sa capacité de retentions d'eau. (BOULARD.B, MAPAQ.M, GRENIER, GIROUX. M, GIRARD.V, 2003)

- L'eau retenue : C'est l'eau retenue par le sol ressuyés qui remplit les pores fins entre les diamètres de $0,2\mu$ et ceux de 8μ . (DUCHAUFFOUR, 1960)

C'est l'eau que retient le sol soit à l'intérieur des fins capillaires, soit sous forme de films assez épais autour des éléments solides. La plante s'en nourrit tandis que s'abaisse le taux d'humidité de la terre. Mais bientôt la plante semble souffrir et se fane, le point de flétrissement est atteint. Pourtant une mesure de l'humidité montre qu'il y a encore de l'eau dans la plante. (BOULARD.B, MAPAQ.M, GRENIER, GIROUX. M, GIRARD.V, 2003)

c) Valeurs caractéristiques

- Capacité au champ : RICHARD et WADLEY (1952) ont défini la capacité au champ, mesuré deux jours environ après une période pluvieuse, sa valeur est égale à la somme capacité de rétention + eau de gravité à écoulement lent (DUCHAUFFOUR, 1960)

Un sol saturé d'eau se draine d'abord rapidement par gravité lorsque nul obstacle (couche imperméable) n'empêche l'écoulement en profondeur. Cet écoulement rapide se ralentit fortement dès que la macroporosité est dégagée, ce qui arrive généralement après deux ou trois jours de drainage, le sol a alors atteint sa capacité de retentions au champ. (BOULARD.B, MAPAQ.M, GRENIER, GIROUX. M, GIRARD.V, 2003)

- Le point de flétrissement: Le point de flétrissement, en botanique, détermine la teneur minimale en eau du sol en dessous de laquelle la plante ne peut vaincre la tension capillaire de l'eau. (AFIDOL)

Le point de flétrissement correspond à l'humidité du sol à partir de laquelle la plante ne peut plus prélever d'eau car la réserve utile en eau du sol a été entièrement consommée. La plante flétrit puis meurt si ce taux d'humidité perdure. (<http://www.aquaportail.com/>)

- L'eau utile : La réserve utile (RU) en eau d'un sol, exprimée en millimètre d'eau, correspond à la quantité d'eau que le sol peut absorber et restituer à la plante. La RU est encore la quantité d'eau comprise entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement. (AFIDOL)

La réserve utile (RU) correspond à la fraction de la réserve qui est exploitable par la plante, c'est-à-dire la fraction accessible par les racines et absorbable par leur succion. Elle est exprimée en millimètres. (<http://www.aquaportail.com/>)

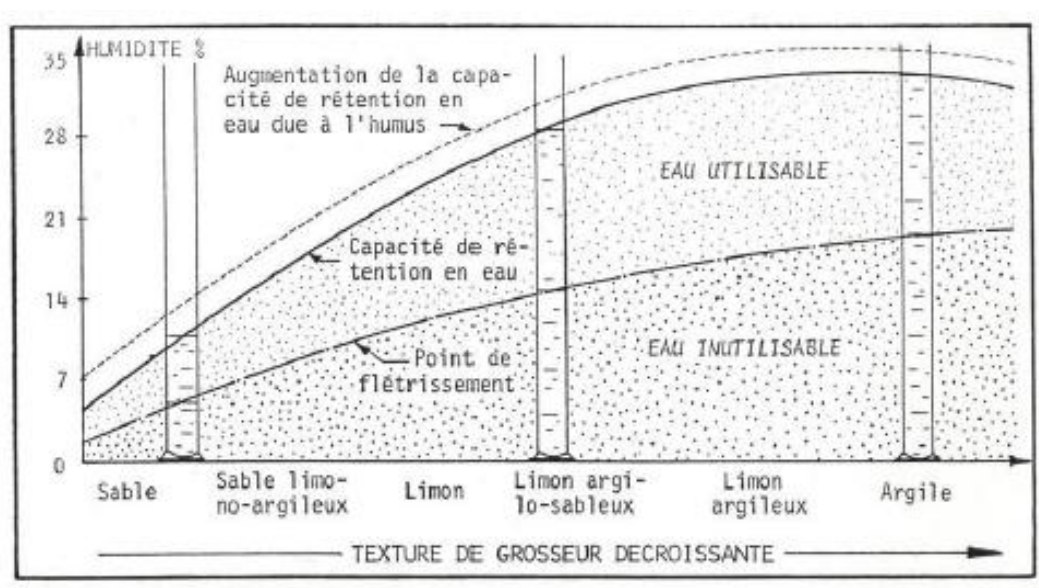


Figure 4 : Courbe de rétention d'eau d'un sol

Source : <http://www.fao.org/soils>

CHAPITRE II : METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Synthèse méthodologique

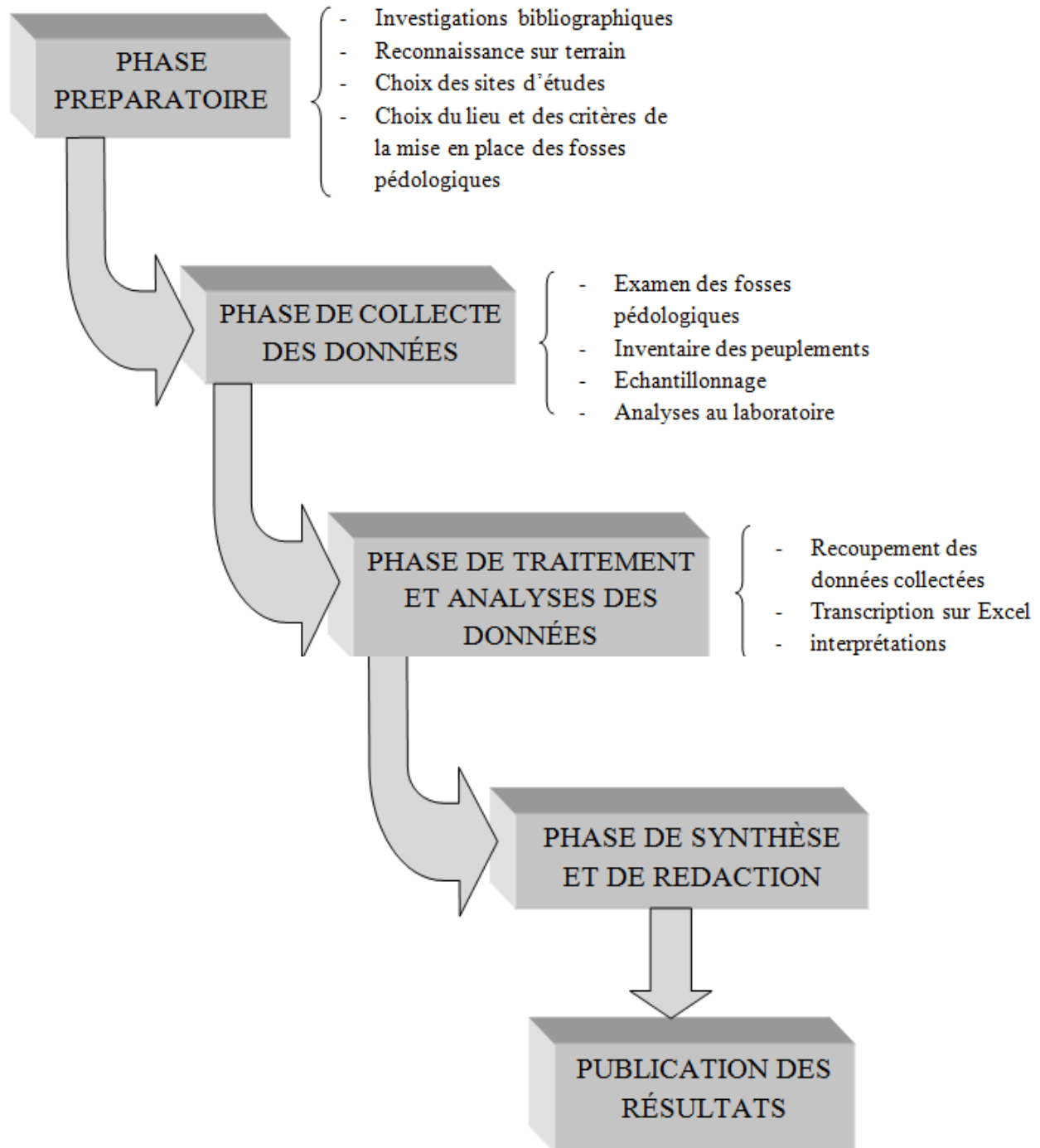


Figure 5: Schéma récapitulatif de la méthodologie

II.1 Démarche globale

II.1.1 Phase préparatoire

Afin de bien mener le travail de recherche, des investigations bibliographiques sur le thème ont été réalisées avant la descente sur terrain tout au long et même durant la phase de rédaction. Cette étape de travail consiste à effectuer :

- La compilation des acquis expérimentaux et documentaires de la réhabilitation.
- L'analyse des documents présentant des processus de recherche et d'essai à long terme de réhabilitation adopté par QMM.
- La confrontation des données déjà existantes suite aux travaux de recherches précédentes suivies de leur analyse.
- Deux types d'état de référence sont mis en considération :
 - Le sol sous végétation se trouvant dans un domaine qui n'a pas encore été exploitée, le milieu ouvert à anjavidy ou *Phillipia Sp* (photo 2) et la forêt dégradée (photo 1) et dans un domaine qui ne le sera jamais, la zone de conservation (photo 3). Ils constituent la zone de référence naturelle.



Photos 1 : Forêt dégradée

(*Vepris ellioti*, *Buxus madagascariensis*, *Psiaia utilisissima*, *Quasia indica*)



Photos 2 : Milieux ouverts à anjavidy

(*Phillipia sp*, *Niaouli Sp*)



Photos 3: Zone de conservation (vue de dessus)

- Le deuxième est le sol réhabilité (photo 4) avec la réhabilitation plantée en 2013 et 2014.



Photos 4 : Site Réhabilité

Tableau IV: Organisation générale des travaux sur terrain

Activités	Paramètres à étudier
Bibliographie	Plus d'information sur la zone d'étude
Pré- terrain	Phase de reconnaissance
Observation et visite sur les sites considérés : - Zone de conservation - Forêt dégradée - Milieux ouverts - Sites réhabilités	- Localisation - Caractérisation - Morphologie et topographie de la zone...
Observation du site de Mandena en générale	Voir les réalités sur terrain
- Observation directe par ouverture d'une fosse pédologique dans la zone de conservation, dans la forêt dégradée et dans les milieux ouverts à anjavidy - Echantillonnage - Remblayage de la fosse pédologique	- Etude des caractères physico-chimiques observable sur terrain - Examen du profil du sol - Récoltes et préparation des échantillons (Analyse au laboratoire)
Saisie et traitement de toutes les données dans ces zones pour la préparation du rapport préliminaire	Enregistrement de toutes les données concernant le sol dans ces zones
- Observation directe par ouverture des fosses pédologiques dans les sites réhabilités (rehab 1an et rehab 2ans) - Echantillonnage - Remblayage des fosses pédologiques	- Etude des caractères physico-chimique, Examen des profils - Récoltes et préparation des échantillons (Analyses au laboratoire)
Saisie et traitement de toutes les données dans les sites réhabilités pour la préparation du rapport préliminaire	Enregistrement de toutes les données concernant le sol dans ces sites
Analyse et comparaison préliminaire des données dans tous les sites étudiés	- Comparaison de toutes les données et informations obtenus sur tous les sites - Traitement des résultats de la recherche -Interprétation des données obtenues

II.1.2 Phase de collecte de données

II.1.2.1 Activité principale

C'est le travail sur terrain ainsi que les analyses au laboratoire. Pour les sites réhabilités, le choix s'est porté sur la réhabilitation âgée de 2 ans dont l'espèce est *Eucalyptus citriodora* (plantée en 2013) et la réhabilitation âgée de 1an avec *Eucalyptus robusta* (plantée en 2014).

On a également fait des études de comparaison entre deux types de topsoil² (sous-forêt et marécageux) pour des données complémentaires.

Ces sites ont été choisis par rapport à leurs topographie et à l'état de croissance des espèces plantés.

Les principales activités durant cette étape sont donc:

- La classification de la zone d'étude en 2 sites: sites de référence naturelle et sites réhabilités.
- La levée des coordonnées géographique avec le GPS
- La mise en place des fosses pédologiques (Photo 5)
- L'observation des profils pédologiques de chaque site étudié
- Les inventaires des peuplements exotiques et autochtones (inventaire floristique) en cas de présence de végétation
- Prélèvement des échantillons de sol (Photo 7)
- Analyse au laboratoire



Photo 5: Mise en place d'une fosse pédologique

² Terre humifère provenant du décapage de la mine

II.1.2.2 Inventaire et échantillonnage

a) Inventaire de peuplement

Les inventaires statistiques font appel à des plans d'échantillonnages, pratiqués lorsque le massif à inventorier devient trop vaste pour se permettre de passer sur toute la surface en inventaire pied à pied, pour des raisons de coûts. Les mesures sont effectuées sur des placettes de différents types et de dimension et les résultats obtenus sur la totalité des placettes sont extrapolés à l'ensemble du peuplement d'arbre.

b) Plan d'échantillonnage pour les inventaires de peuplement

L'échantillonnage aléatoire simple: chaque individu d'une population a la même chance d'être choisi, puisque la constitution de l'échantillon est tirée par hasard dans une placette d'inventaire (carrée, rectangle, circulaire).

c) Echantillonnage des sols

- L'échantillonnage aléatoire simple consiste à prélever des échantillons à des endroits choisis au hasard sur le terrain. Cette approche (non combinée à une autre méthode) n'est pas recommandée pour localiser des stations d'échantillonnage. D'un point de vue statistique, elle peut permettre d'évaluer la contamination moyenne d'un milieu. (RANDRIAMBOVONJY, 2000)

Au total dix (10) fosses pédologiques de 1.5m X 1m X 1m (RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostome) (Photo 6) sont creusées pour tous les sites étudiés (3 sites de références et 2 sites réhabilités) suivant une stratification bien définie.

Le choix de la mise en place des fosses pédologiques repose sur plusieurs facteurs :

- Années de plantation
- Essences plantées (*Eucalyptus citriodora* et *Eucalyptus robusta*)
- Recouvrement des sols (Type de Topsoil)
- Topographie du milieu (Sommet, pente, plateau, bas fond)
- Croissance de la végétation

Le nombre de fosse pour les zones de références naturelles (Carte 3):

- 1 fosse pour la zone de conservation (ZC)
- 1 fosse pour la forêt dégradée (FD)
- 1 fosse pour les milieux ouverts à anjavidy (AJV)

Pour les sites réhabilités (Carte 3) :

- Réhabilitation plantée en 2013 : 3 fosses dont le choix de l'emplacement suit la croissance de la végétation. (RHB13 I ; RHB13 II ; RHB13 III)
- Réhabilitation plantée 2014 : 4 fosses suivant la croissance de la végétation et la topographie du milieu. (RHB14 I ; RHB14 II ; RHB14 III ; RHB14 IV)

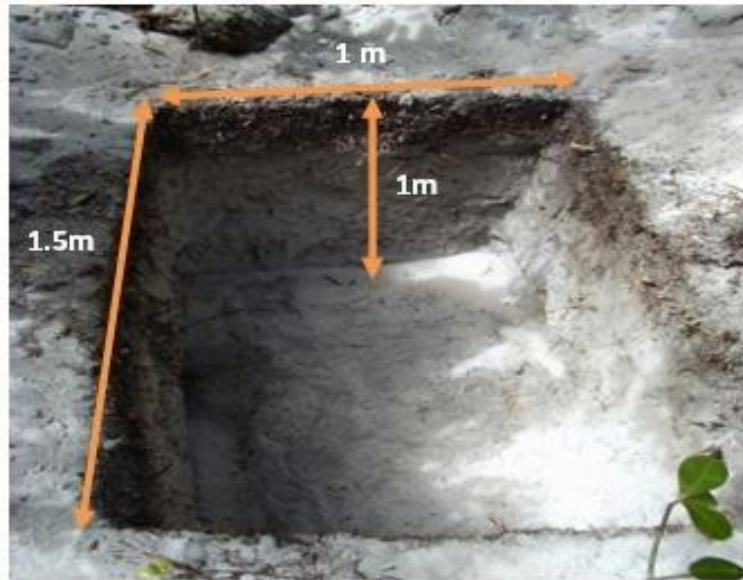
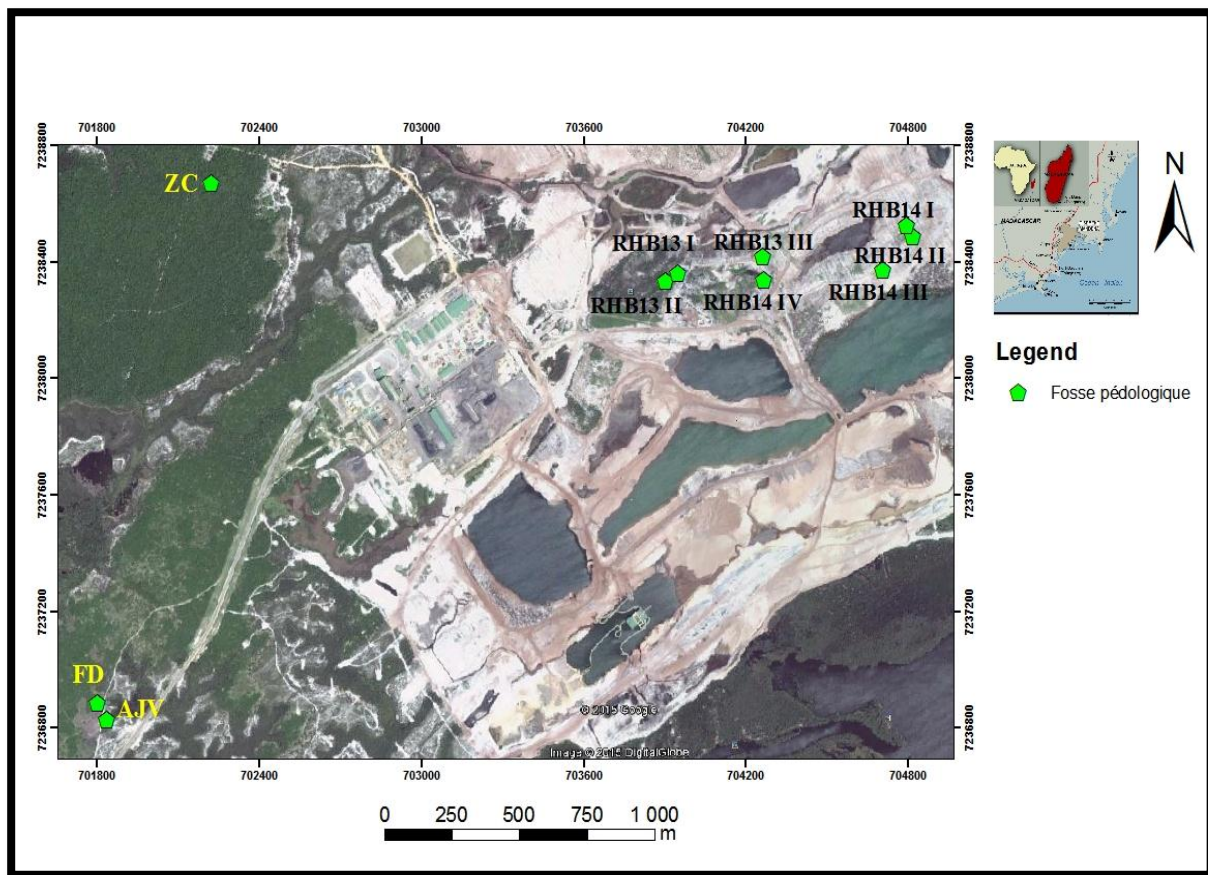


Photo 6: Une fosse pédologique (X: 7238671; Y: 702222)



Carte 4 : Carte de la mise en place des fosses pédologiques

II.1.3 Phase de traitement et d'analyse de données

Cette étape consiste à :

- Recouper tous les données collectées (les inventaires floristiques, données pédologiques, les résultats d'analyses au laboratoire), et ensuite les compiler pour faciliter leur traitement.
- Transcrire tous ces données sur le logiciel Excel
- Traiter et analyser ces données pour les analyses statistiques (test de normalité et comparaison des moyennes), pour la comparaison des résultats obtenus entre les différentes zones d'étude.

II.1.4 Phase de synthèse et de rédaction

Toutes les démarches des travaux, les résultats obtenus qui ont été sélectionnés pour être publier, ainsi que leurs interprétations seront par la suite représenter thématiquement pour la publication. La structure et le format du document sont conçus pour suivre les normes de la Facultés des sciences.

II.2 Méthodes spécifique à chaque questions

Cette méthode consiste surtout à montrer tous les démarches et les travaux sur terrain par rapport aux études menés.

II.2.1 Les propriétés physico-chimiques des sols réhabilités évoluent-ils vers ceux des sites de référence naturelle ?

II.2.1.1 Description d'une fosse pédologique

Pour avoir les informations nécessaires sur le sol lors de son étude, l'examen du profil sur terrain est vraiment important. Cette étude comprend quelques étapes : d'abord par une simple observation sur terrain, puis par un examen détaillé d'une fosse pédologique pour voir les propriétés physiques qui comprend la couleur, la texture, la structure, la porosité, la propriété mécanique, les activités biologiques et l'enracinement et enfin par les analyses au laboratoire pour les analyses chimiques.

a) La couleur

La détermination de la couleur consiste à comparer directement sur le terrain. Elle est désignée par une notice de code de couleur des sols par A. CAILLEUX qui donne la référence de celui de Munsell, ce code est en format de poche de 11 X 14.5cm, avec 4 planches contiguës, pliées en accordéon de manière à montrer simultanément toutes les couleurs. Le code comprend également des perforations affectant chacune des 259 couleurs du Code et permettant ainsi la comparaison par contact direct avec la couleur à identifier.

On désigne la couleur par des lettres en ordonnées et en abscisses le nombre de deux chiffres. Les lettre K à T désignent autant que possible les valeurs, du clair au foncé (exemple : N 29).

b) La texture

C'est la composition élémentaire d'un échantillon, défini par les proportions relatives des éléments constitutants, groupés par classes de dimensions après avoir été individualisés, la texture correspond à une classification des sols en fonction de la taille des éléments minéraux. Elle peut être testée sur terrain et également au laboratoire à partir de l'analyse granulométrique, permettant de classer les sols en une dizaine de textures. Ici l'analyse granulométrique a été faite au laboratoire de QMM.SA.

c) La structure

La structure est également appréciée sur le terrain, par le touché des échantillons à l'état sec et à l'état humide. Elle est définie par la manière dont les particules élémentaires sont associées entre elles, formant ou non des agrégats. Un agrégat est l'unité naturelle tridimensionnelle d'un assemblage cohérent et défini de particules élémentaires.

d) L'enracinement

On observe surtout l'abondance des racines (absence des racines, peu de racines, de nombreuses racines, de très nombreuses racines,...) la taille (mince, moyenne, grosse, très grosse), la pénétration (entre les agrégats, dans les agrégats, suivant les faces des agrégats ou des fissures).

e) Prélèvement d'échantillon pour les analyses au laboratoire

Le technique d'échantillonnage utilisée est l'échantillonnage aléatoire simple puisque la constitution de l'échantillon est tirée par hasard, cette méthode est aussi valable statistiquement car elle possède la plus grande probabilité de représentativité. De plus, la mise en plan et l'interprétation des résultats d'analyse provenant d'échantillons prélevés de façon aléatoire simple peuvent s'avérer laborieuses, même s'il présente des problèmes au niveau de la localisation des unités d'échantillonnage. (ANDRINIELA N. I, 2013).

Le mode de prélèvement est le même pour tous les sites étudiés, la zone de conservation, la forêt dégradée, le milieu ouvert à anjavidy, la réhabilitation plantée en 2013, et la réhabilitation plantée en 2014.

Après toutes les observations des caractères physiques, les échantillons sont prélevés et tous les horizons décrits sont prises indépendamment dans des sachets plastiques hermétiques pour éviter la contamination extérieure. Puis seront transportés pour être analysé.

Les fosses sont échantillonnées un à un mais pas ensemble c'est-à-dire finir d'étudier toutes les caractéristiques physiques et chimique de la première fosse avant d'entamer la deuxième.



Photo 7: Quelques échantillons des sols

Selon les possibilités et les moyens du laboratoire seul ces paramètres ont pu être déterminés :

- La matière organique totale
- Le taux d'humidité
- Le pH
- La granulométrie

Toutes ces analyses ont été faites au laboratoire de QMM S.A à Mandena.

f) Les méthodes d'analyses au laboratoire

- La matière organique totale

Pour mesurer le taux de la MO, la méthode utilisée est la perte au feu ou LOI (Loss on Ignition). La perte au feu permet de mesurer directement la matière organique dans le sol. Placer les échantillons pendant une nuit (16 heures) dans un four à moufle à 375 °C. La perte de poids, après calcination, nous donne la matière organique. Il faut éviter les températures plus élevées, car les carbonates présents dans le sol se fractionnent, augmentant la teneur en matière organique. Le pré-séchage des échantillons à 150 °C réduit la variabilité du test en éliminant l'eau emprisonnée dans les feuillets de sol.

L'échantillon de sol doit être broyé et tamisé à 2 mm (10 Mesh) pour cette méthode.

- Sécher l'échantillon de sol pendant une nuit (16 heures) à 150 °C.
- Nettoyer les creusets en les chauffant au rouge, puis laisser refroidir au dessiccateur pendant 10 minutes.
- Prendre le poids du creuset vide. Ajouter 10 g de sol séché. Noter le poids final.
- Calciner le sol au four à moufle à 375 °C pendant 16 heures.
- Laisser refroidir dans un dessiccateur et peser le creuset contenant les cendres.

Les résultats de l'échantillon sont calculés à partir de l'une ou l'autre des équations suivantes :

$$\% M.O. = \frac{\text{poids sol sec (g)} - \text{poids sol incinéré (g)}}{\text{poids sol sec (g)}} \times 100$$

$$\% M.O. = \frac{((P_1 - P_0) - (P_2 - P_0))}{(P_1 - P_0)} \times 100$$

Où

M. O: matière organique

P0: poids du creuset vide

P1: poids final

P2: poids du creuset contenant les cendres.

- L'humidité

La méthode adoptée est simple, la mesure de l'humidité se fait pendant la méthode de la perte au feu pendant le pré-séchage de l'échantillon.

- Prendre 10g de sol, pesé avec une balance à précision.
- Insérer l'échantillon dans une étuve, puis faire sécher à 150°C
- Puis prendre la valeur (% humidité) qui s'affiche sur l'écran de l'étuve.

- Le pH

En pratique, l'analyse du pH a été réalisée par le pH-H₂O (ou pH-eau) déterminé en mesurant le taux d'acidité dans un mélange sol / eau de 1 pour 5 : il reflète la concentration de protons dans la solution du sol. Il n'est pas nécessaire de sécher l'échantillon, la mesure peut se faire directement après échantillonnage.

- Cette méthode consiste à prendre 1ml de sol dans une éprouvette graduée puis le verser dans un bécher.
- Prendre 5ml d'eau distillé et le mélanger avec l'échantillon de sol
- Puis agiter avec un agitateur électrique
- Prendre la valeur du pH 3fois avec un pH-mètre de laboratoire tous les 10mn, puis faire la moyenne pour obtenir la valeur finale.

- La granulométrie

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer quantitativement la distribution des particules de sol par classes de diamètres. Le nombre et la grandeur des classes de diamètres dépendront de l'objectif poursuivi et éventuellement, de l'importance de l'échantillon. Le principe est la suivante :

- Faire sécher l'échantillon de sol dans un four à 500°C.
- Briser mécaniquement les agrégats avec un marteau en caoutchouc.
- Verser l'échantillon dans une série de tamis (2,8mm à 45µm)
- Agiter dans une machine pendant 15mn
- Peser (balance à précision) et noter la fraction retenue sur chaque tamis et passant au travers du dernier.
- Vérifier si la somme des fractions retenues ou passant est égale à la masse initiale mise en œuvre (masse refus)



Photo 8: Série de tamis pour les analyses granulométrique

II.2.1.2 Traitement et analyses des données

D'abord déterminer les types d'horizon observé sur chaque fosse, puis comparer le profil pédologique des sites, ensuite interpréter les résultats obtenus au laboratoire, et enfin essayer de classer les types de sols observés.

II.2.2 Les végétations plantées dans les sables déminéralisés auront-ils un taux de croissance égale à ceux des zones de référence naturelle ?

II.2.2.1 Recueil de peuplement

La méthode adoptée est l'inventaire statistique dont le plan d'échantillonnage est l'échantillonnage aléatoire simple (échantillon tiré par hasard), en utilisant une placette circulaire à surface fixe de 5.64m de rayon (Figure 6) puisque l'inventaire se fait dans un peuplement très dense. Le but est de voir la relation sol-végétation, en comparant la croissance des arbres plantés (espèce exotiques) ainsi que leur structure diamétrique.

Il faut préciser que les recueils n'ont été faits que sur les sites réhabilités *Eucalyptus citriodora* planté en 2013 et *Eucalyptus robusta* planté en 2014, qui vont être comparé avec celle de la zone de conservation (site de référence), pour pouvoir justifier le choix de l'emplacement des fosses.

Pour la réhabilitation plantée en 2013, 6 placettes d'inventaire (placette A, placette B, placette C, placette D, placette E, placette F) ont été effectuées, et tous les individus inclus dans chaque placette sont inventoriés, de même pour celle de 2014 avec 4 placettes d'inventaire (placette G, placette H, placette I, placette J) car cela est noté comme suffisante pour la représentativité des résultats.

Les paramètres relevés sont la hauteur fût (Hfut)³, la hauteur totale (Htot)⁴ et le diamètre à hauteur poitrine (DHP)⁵ pour les peuplements d'arbre plantés et tous les autres végétations rencontrées ont été seulement listés.

³ Hauteur du fût: hauteur de la première ramification d'une tige ligneuse

⁴ Hauteur totale: hauteur maximale de l'arbre

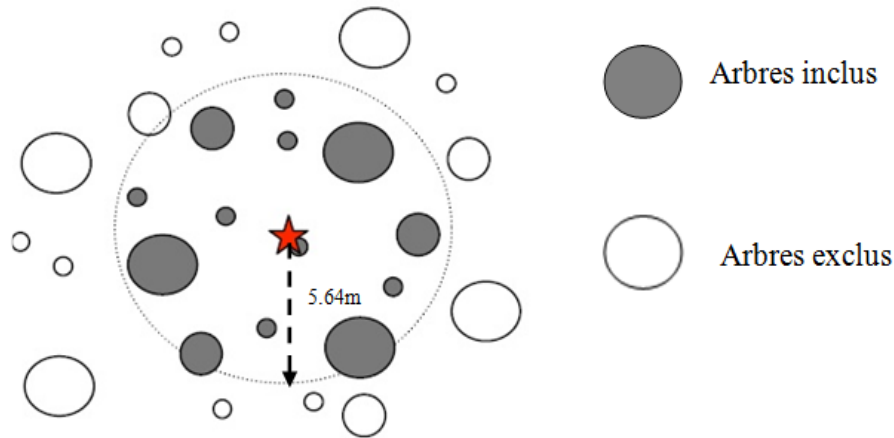


Figure 6: Placette circulaire à surface fixe

Les arbres sont dits inclus lorsqu'une grande partie du tronc de l'arbre se trouve encore dans la placette (environ 90%) et ils sont dits exclus dans le cas contraire.

II.2.2.2 Analyses statistiques

Une étape très importante pour pouvoir justifier la différence de croissance des arbres et pour trouver leur densité par hectare.

Les analyses statistiques utilisées sont :

- Le test de normalité: ce test permet de vérifier si les données réelles suivent une loi normale ou non. C'est un cas particulier des tests d'adéquation (ou tests d'ajustement, tests permettant de comparer des distributions), appliqués à une loi normale. Ce test prend une place importante en statistique. En toute rigueur, il est indispensable de vérifier la normalité des résultats.

Il y a quelques types de test de normalité, mais le choix s'est porté sur le test de Shapiro et Wilk tout simplement parce que ce test peut se faire sur Excel sans avoir recours à d'autre logiciel de statistique contrairement aux autres tests comme celle de Kolmogorov-Smirnov par exemple.

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

⁵ Diamètre à hauteur poitrine mesuré à 1,30m du sol, à l'aide d'un DBH mètre

- W : Statistique de test
- $x_{(i)}$: le i-ème plus petit nombre dans l'échantillon
- \bar{x} : la moyenne des échantillons

Le coefficient a_j est donné par la table de Shapiro et Wilk avec le pourcentage des risques correspondant.

- La comparaison de deux moyennes de deux échantillons indépendantes : pour pouvoir prouver la différence de croissance des peuplements, la comparaison des moyennes des DHP est ici applicable dans la réhabilitation âgée de 2ans car la mesure des diamètres est beaucoup plus précise par rapport à Htot qui est mesuré approximativement vue la taille des arbres, mais ce dernier est utilisé pour la réhabilitation âgée de 1an. Ce test est basé sur l'écart réduit des grands échantillons c'est-à-dire n_A et $n_B \geq 30$.

$$Z = \frac{\mu_A - \mu_B}{\sqrt{\frac{\sigma_A^2}{n_A} + \frac{\sigma_B^2}{n_B}}} = \frac{m_A - m_B}{\sqrt{\frac{S_A^2}{n_A} + \frac{S_B^2}{n_B}}}$$

Ecart type de la
différence des moyennes

- m_A ; m_B : moyennes des DHP ou Htot des arbres
- S_A^2 ; S_B^2 : Variance estimées sur l'échantillon
- n_A ; n_B : Nombres d'individus inventoriés

II.3 Cadre opératoire

Tableau V: Cadre logique de l'étude

Objectif globale: évaluer l'évolution des sols réhabilités sur les sites exploités par QMM à Mandena		
Problématique: Quel est le bilan de la réhabilitation au niveau de l'amélioration de la qualité du sol?		
Hypothèses	Indicateurs	Démarches
Les propriétés physico-chimiques des sols réhabilités évoluent-ils vers ceux des sites de référence naturelle	<ul style="list-style-type: none"> - valeurs pH - granulométrie du sol -Matière organique totale - Taux d'humidité 	<ul style="list-style-type: none"> -documentation -observation sur terrain -travail en laboratoire (analyse)
Les végétations plantées dans les sables déminéralisé auront-ils un taux de croissance égale à ceux des zones de référence naturelle.	<ul style="list-style-type: none"> -quantité et qualité des espèces plantées -comparaison entre les différentes espèces utilisées pour la réhabilitation 	<ul style="list-style-type: none"> -documentation -observation sur terrain

CHAPITRE III: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1 Evolution des propriétés du sol

III.1.1 Sur le plan physico-chimique

III.1.1.1 pH

La mesure du pH d'un sol permet de définir la réaction du sol (ou statut acido-basique). Pour la plupart des sols de la zone d'étude la valeur du pH est comprise entre 3 et 4.5, le sol est donc très acide.

Cette valeur du pH est soumise à des variations saisonnières. Elle varie avec l'état hydrique du sol, la température, la présence ou non d'une culture en période de croissance active soit avec les saisons. L'acidité du sol s'explique dans ce cas par le lessivage qui par circulation d'eau notamment en saison de pluies accélère l'entraînement des cations produits par acidification, des anions et des particules. Chimiquement parlant l'acidification du sol se traduit par une perte des cations échangeables (Ca_2^+ , Mg_2^+ , K^+ , Na^+) du complexe d'échange et leur remplacement progressif par les ions H^+ et Al_3^+ .

Le graphe suivant montre la variation de pH dans les sites d'étude.

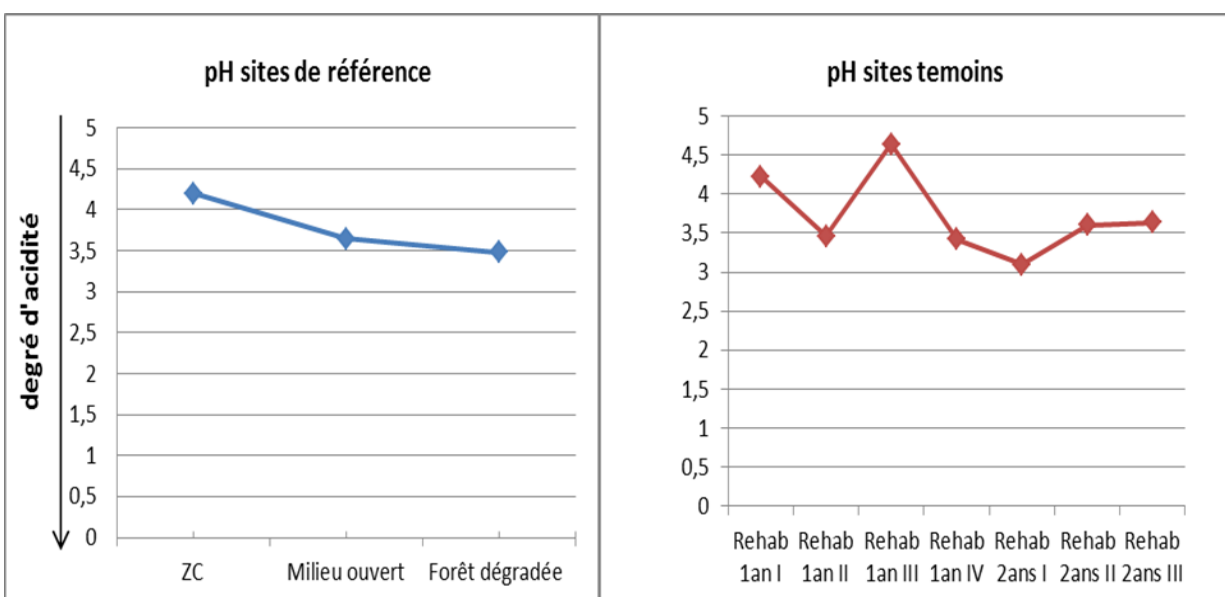


Figure 7 : pH du sol dans les sites d'étude

III.1.1.2 Granulométrie

Les résultats de l'analyse granulométrique révèlent des pourcentages de sable qui sont supérieurs à 90% (Figure 8). D'après le triangle de texture (Figure 2) qui permet de déterminer la classe texturale des sols, la zone d'étude présente des sols essentiellement sableux. Ces sols sont très perméables à l'eau et à l'air du fait de leur porosité texturale (espacement entre les particules) entraînant une bonne aération, un bon drainage du sol et un bon développement racinaire. Toutefois, en saison sèche, ces sols vont avoir tendance à sécher très rapidement.

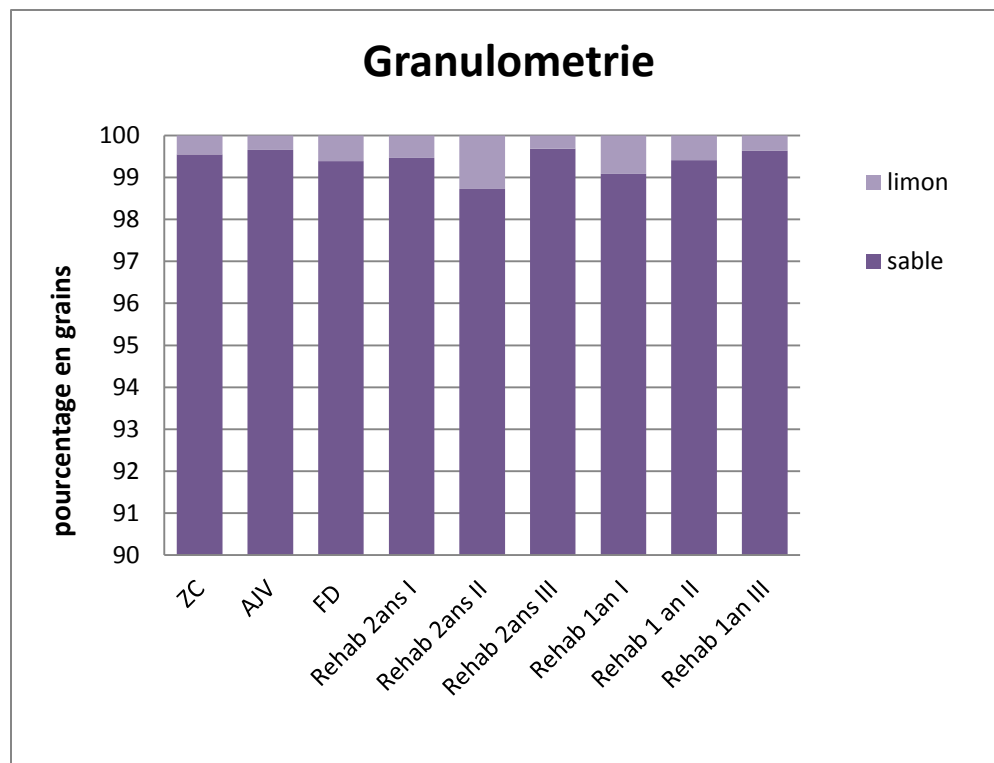


Figure 8 : Granulométrie des sites d'étude

III.1.1.3 Matière organique totale

La matière organique est une composante importante du sol car elle joue sur sa structure. Elle améliore le taux d'infiltration et de rétention d'eau. Pour 1 kg de sol, le taux normal en matière organique est de 20 à 30 g soit 2 à 3% du poids totale du sol (ARVALIS institut du végétal, mai 2005).

Dans les zones d'étude la zone de conservation, les milieux ouverts, et les deux fosses dans la réhabilitation âgée de 2ans avec rehab 2ans I et rehab 2ans III montrent une teneur favorable en MO, une faible teneur pour les deux premières fosses de la réhabilitation âgée de 1

an (rehab 1an I et rehab 1an II) et une teneur très élevée dans la forêt dégradée et dans trois sites réhabilités avec rehab 1an III, rehab 1an IV et rehab 2ans II. Ces variations s'expliquent par la faible et même l'absence d'activité biologique dans ces milieux, car en sol acide, la vie du sol est ralentie par suite d'une faible activité biologique (minéralisation, dégradation de la matière organique, nitrification...) due à un mauvais développement des bactéries.

Cette faiblesse de l'activité biologique entraîne alors une augmentation du taux de matière organique due à la très lente décomposition de cette dernière et aussi une pénurie de nutriments absorbables par les plantes du fait de la minéralisation qui est limitée. La nutrition se fait mal : le pH perturbe l'équilibre électrochimique et empêche l'absorption des éléments nutritifs par la plante.

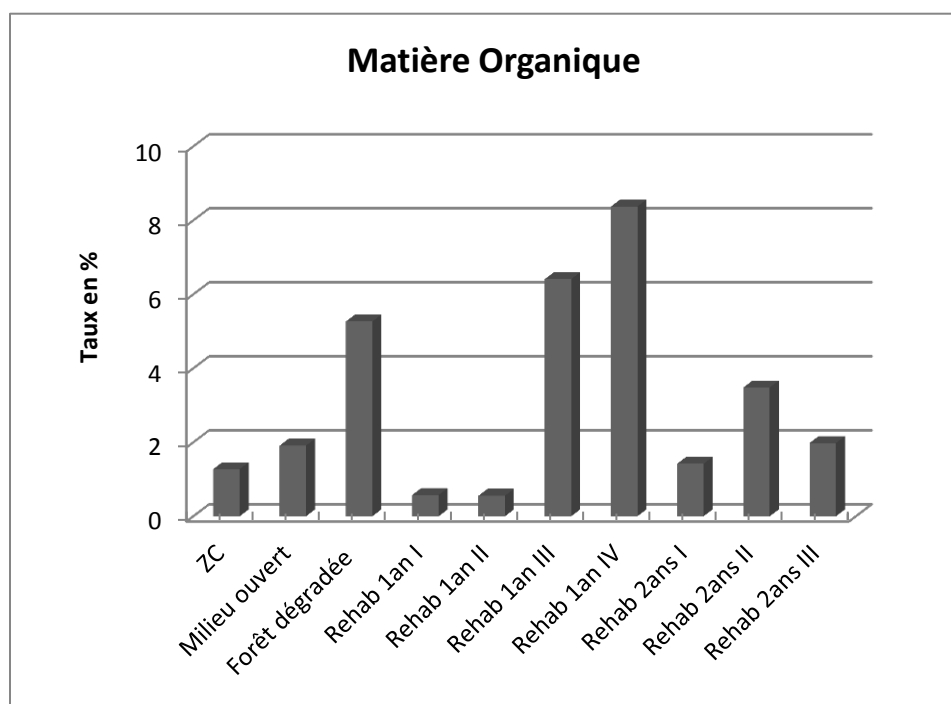


Figure 9 : Taux de matière organique pour chaque site

III.1.2 Selon le profil pédologique

Sur les dix (10) fosses creusées, sept (7) types de profils pédologiques ont été identifiés. Chaque profil pédologique des sites d'étude présente des différences entre les horizons dans 1m de profondeur, comme le montre les descriptions suivantes :

III.1.2.1 Zone de conservation

Relief : plateau

Pente : < 5%

Description du profil



0 – 20 cm : Horizon brun - gris foncé, sablo-limoneuse, humide, structure grumeleuse au niveau des racines, nombreuses racines de taille moyenne.

20 – 100 cm : Horizon gris clair, sableuse, humide, structure particulière, racine peu abondant, très friable. Nombreux trous d'insectes.

Photo 9: ZC (Zone de conservation)

III.1.2.2 Forêt dégradée

Relief: plateau

Pente : < 5%

Description du profil



0 – 25 cm : Horizon gris foncé, sablo-limoneuse, humide, structure massive non cohérent, nombreuse racine de taille mince à moyenne, existence des traces d'activité animal (fourmis, galeries).

25 – 100cm : Horizon gris clair, sableuse, humide, structure particulière, peu de racine, de taille mince, très friable.

Photo 10: FD (Forêt dégradée)

III.1.2.3 Milieu ouvert à anjavidy (Phillipia Sp)

Relief : pente

Pente : > 10 %

Description du profil



0 – 15cm : Horizon brun-gris très foncé, sablo-limoneuse, humide, structure massive non cohérent, nombreuse racine, de taille fine, traces d'activité biologique (fourmis, galerie).

15 – 45cm : Horizon brun-foncé, sablo-limoneuse, humide, structure particulière, peu de racine.

45 – 100cm : Horizon gris clair, sableuse, humide, structure particulière, absence de racine, très friable.

Photo 11: AJV (Milieux ouvert à anjavidy)

III.1.2.4 Réhabilitation 2 ans I (première fosse)

Relief: pente supérieur

Pente: [5- 10%]

Description du profil



0 – 27 cm: Horizon gris très foncé (topsoil sou forêt), sablo- limoneuse, humide, structure massive non cohérent, racines de diamètre inférieur à 2mm abondant, trace d'activité biologique.

27 - 80 cm: Horizon brun, sablo- limoneuse, humide, structure massive non cohérent, racines peu abondant, activités biologiques absentes.

80 – 100cm : Horizon brun foncé, sableuse, humide, structure particulière, racines absentes, activités biologiques absentes.

Photo 12 : Réhabilitation de 2ans I

III.1.2.5 Réhabilitation 2 ans II (deuxième fosse)

Relief: sommet

Pente: > 10%

Description du profil



0 – 80cm: Horizon brun gris très foncé (topsoil marécageux), sablo-limoneuse, humide, structure compacte, absence des racines, activités biologiques absentes.

80 – 100cm: Horizon jaune brun, sableuse, humide, structure particulière, racines absentes, activités biologiques absentes.

Photo 13: Réhabilitation de 2ans II

III.1.2.6 Réhabilitation 1an I (première fosse)

Relief : sommet

Pente : < 5%

Description du profil



0 – 26cm : Horizon gris foncé (topsoil marécageux), sablo-limoneuse, humide, structure particulière, peu de racine, traces d'activité biologique

26 – 100cm : Horizon brun jaune clair, sableuse, sec, structure particulière, racines absentes, activités biologiques absentes.

Photo 14: Réhabilitation de 1an I

III.1.2.7 Réhabilitation 1 an II(deuxième fosse)

Relief : pente inférieure

Pente : 5 – 10 %

Description du profil



0 - 19cm : Horizon brun foncé (topsoil marécageux), sablo- limoneuse, humide, structure compacte, racines absentes, activités biologiques absentes.

19 – 36cm : Horizon gris rose, sableuse, humide, structure particulière, racines absentes, activités biologiques absentes.

36 – 65cm : Horizon brun foncé (topsoil marécageux), sablo- limoneuse, humide, structure compacte, racines absentes, activités biologiques absentes.

65 – 100cm : Horizon gris rose, sableuse, humide, structure particulière, racines absentes, activités biologiques absentes.

Photo 15: Réhabilitation de 1an II

L'observation des profils a montré que pour les sites réhabilités c'est surtout le type et le dépôt du topsoil qui fait la différence, surtout sur la structure des couches. Les sites de référence ont à peu près le même profil, celui qui diffère est le milieu ouvert avec la présence de trois (3) couches. L'absence et la faible activité biologique, ainsi que l'abondance des racines sont plus ou moins les mêmes dans les sites réhabilités.

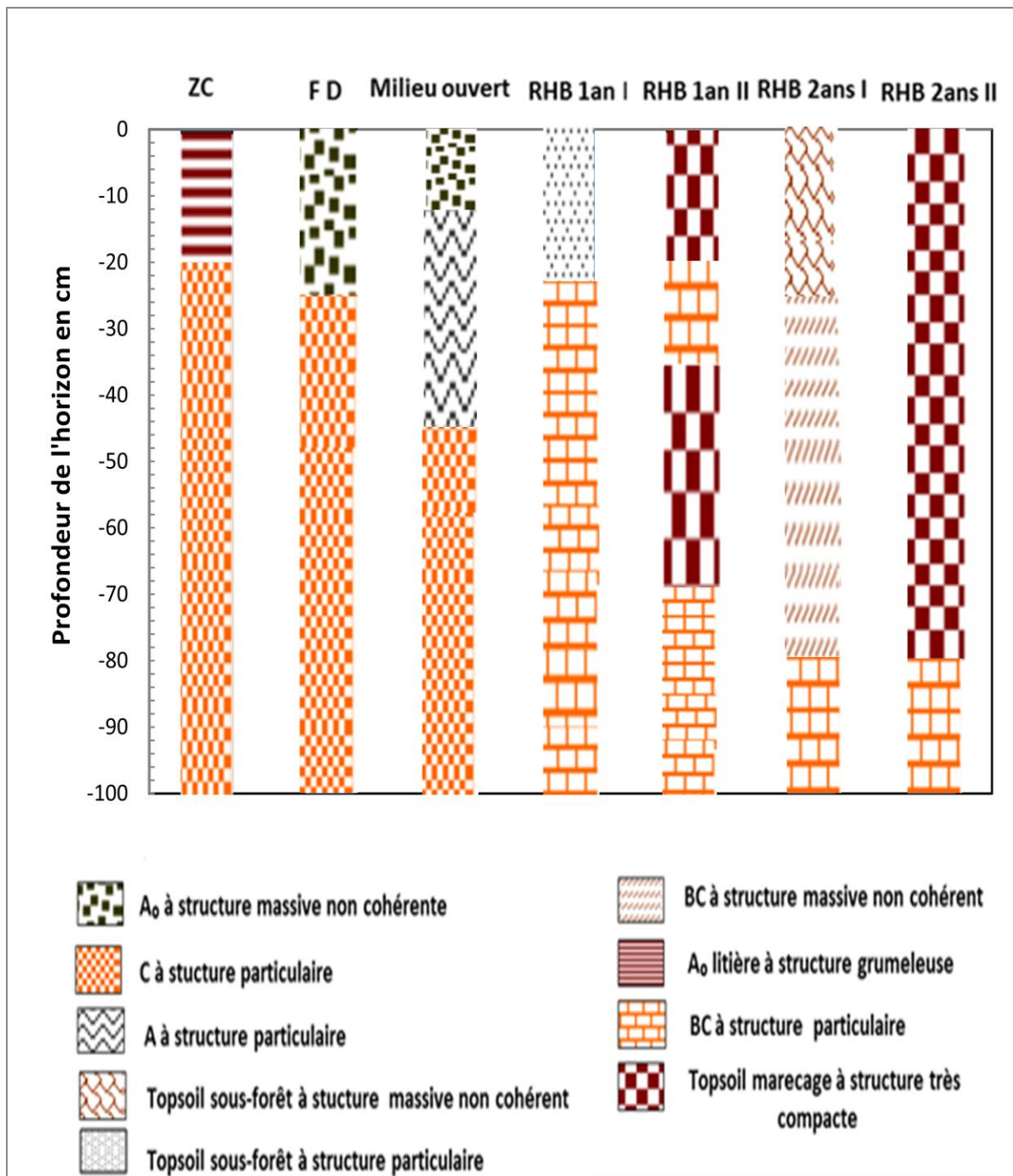


Figure 10 : Schémas récapitulatif des profils pédologiques de chaque site

III.2 Evolution de la végétation

III.2.1 Traitements statistiques

III.2.1.1 Test de normalité des données

	DHP								
nombre n	xi	xi- \bar{x}	(xi- \bar{x}) ²	dj	aj	dj*aj	S ₁	S ₁ ²	n ₁ ²
1	1,5	1,5	2,25	6,9	0,4254	2,93526	1,56049	2,43513	900
2	1,8	1,8	3,24	4,7	0,2944	1,38368			
3	2	2	4	4,5	0,2487	1,11915			
4	2,2	2,2	4,84	3,6	0,2148	0,77328			
5	2,3	2,3	5,29	3,2	0,187	0,5984			
6	2,4	2,4	5,76	2,8	0,163	0,4564			
7	2,7	2,7	7,29	2,2	0,1415	0,3113			
8	2,8	2,8	7,84	2	0,1219	0,2438			
9	3	3	9	1,8	0,1036	0,18648			
10	3,5	3,5	12,25	1,1	0,0862	0,09482			
11	3,7	3,7	13,69	0,9	0,0697	0,06273			
12	3,8	3,8	14,44	0,8	0,0537	0,04296			
13	3,8	3,8	14,44	0,7	0,0381	0,02667			
14	4	4	16	0,5	0,0227	0,01135			
15	4,1	4,1	16,81	0,3	0,0076	0,00228			
16	4,4	4,4	19,36	somme		8,24856			
17	4,5	4,5	20,25	somme ²		68,0387			
18	4,5	4,5	20,25						
19	4,6	4,6	21,16						
20	4,6	4,6	21,16						
21	4,6	4,6	21,16						
22	4,8	4,8	23,04						
23	4,8	4,8	23,04						
24	4,9	4,9	24,01						
25	5,2	5,2	27,04						
26	5,5	5,5	30,25						
27	5,8	5,8	33,64						
28	6,5	6,5	42,25						
29	6,5	6,5	42,25						
n ₁ =30	8,4	8,4	70,56						
moyenne m ₁ (\bar{x})	4,10667	Tn	576,56						
W	0,11801								

Selon la table de Shapiro et wilk pour n=30 et pour un risqué de 1% la valeur de W critique égale à 0,900, on a W > W critique, on accepte donc au risqué de 1% l'hypothèse de la distribution statistique données, m₁ suit une loi normale.

	DHP											
nombre n	xi	xi- \bar{x}	(xi- \bar{x}) ²	dj	aj	dj*aj	S ₂	S ₂ ²	n ₂ ²			
1	2,6	2,6	6,76	8,9	0,3751	3,33839	2,08777	4,35879	2500			
2	3,4	3,4	11,56	8	0,2574	2,0592						
3	3,4	3,4	11,56	6,9	0,226	1,5594						
4	3,6	3,6	12,96	5,8	0,2032	1,17856						
5	4	4	16	5,3	0,1847	0,97891						
6	4	4	16	5,1	0,1691	0,86241						
7	4	4	16	5	0,1554	0,777						
8	4,1	4,1	16,81	4,8	0,143	0,6864						
9	4,2	4,2	17,64	4,5	0,1317	0,59265						
10	4,5	4,5	20,25	3,9	0,1212	0,47268						
11	4,7	4,7	22,09	3,7	0,1113	0,41181						
12	5	5	25	3,3	0,102	0,3366						
13	5	5	25	3	0,0932	0,2796						
14	5,3	5,3	28,09	2,7	0,0846	0,22842						
15	5,3	5,3	28,09	2,6	0,0764	0,19864						
16	5,5	5,5	30,25	2	0,0685	0,137						
17	6	6	36	1,5	0,0608	0,0912						
18	6	6	36	1,5	0,0532	0,0798						
19	6,3	6,3	39,69	1,1	0,0459	0,05049						
20	6,4	6,4	40,96	1	0,0386	0,0386						
21	6,5	6,5	42,25	0,8	0,0314	0,02512						
22	6,6	6,6	43,56	0,6	0,0244	0,01464						
23	6,6	6,6	43,56	0,5	0,0174	0,0087						
24	6,7	6,7	44,89	0,4	0,0104	0,00416						
25	7	7	49	0,1	0,0035	0,00035						
26	7,1	7,1	50,41	somme		14,4107						
27	7,1	7,1	50,41	somme ²		207,669						
28	7,1	7,1	50,41									
29	7,2	7,2	51,84									
30	7,3	7,3	53,29									
31	7,4	7,4	54,76									
32	7,4	7,4	54,76									
33	7,5	7,5	56,25									
34	7,5	7,5	56,25									
35	7,5	7,5	56,25									
36	7,9	7,9	62,41									
37	8	8	64									
38	8	8	64									
39	8,3	8,3	68,89									
40	8,4	8,4	70,56									
41	8,4	8,4	70,56									
42	8,7	8,7	75,69									
43	8,9	8,9	79,21									

44	9	2,272	5,161984
45	9,1	2,372	5,626384
46	9,3	2,572	6,615184
47	9,4	2,672	7,139584
48	10,3	3,572	12,75918
49	11,4	4,672	21,82758
n₂=50	11,5	4,772	22,77198
moyenne m₂ (\bar{x})	6,728	Tn	213,5808
W	0,972321		

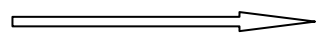
Selon la table de Shapiro et wilk pour $n=50$ et pour un risqué de 1% la valeur de W critique égale à 0,930 on a $W > W_{\text{critique}}$, on accepte donc au risqué de 1% l'hypothèse de la distribution statistique données, m_2 suit une loi normale.

III.2.1.2 Comparaison des moyennes des DHP

- On a deux échantillons de $n \geq 30$
- Deux variables continues
- m_1 et m_2 suivent une loi normale
 - Hypothèse 0(H_0): $\mu_1 = \mu_2$
 - Hypothèse 1(H_1): $\mu_1 \neq \mu_2$
- Risque bilatéral 5%
- H_0 est rejeté si $|Z| \geq 1,96$

En utilisant la formule vue dans la méthodologie : $|Z| = 39,2999$

$39,2999 \geq 1,96$, on conclut donc que les moyennes de DHP diffèrent entre les deux échantillons

 m_2 significativement supérieur à m_1

III.2.2 Composition floristique de la végétation

Tableau VI: Listes des familles des espèces dominantes de chaque site

	Zone de conservation	Forêt dégradée	Milieux ouverts à anjavidy	Rehab 2ans	Rehab 1ans
Familles dominantes	FABACEAE	FABACEAE	MYRTACEAE	MYRTACEAE	MYRTACEAE
	EUPHORBIACEAE	RUTACEAE	ERICACEAE	POACEAE	POACEAE
	RUBIACEAE	SALINACEAE			
	ASTERACEAE	EBENACEAE			
	SALICACEAE	CELASTRACEAE			
	CELASTRACEAE	ASTERACEAE			

La famille des MYRTACEAE dans les milieux ouverts est ici représentée par le genre *Phillippia sp.*, sur sol dégradé, tandis que pour les sites réhabilités, cette famille est représentée par les espèces exotiques plantées *Eucalyptus citriodora* et *Eucalyptus robusta*. Quant à la famille des POACEAE, ces végétations herbacées, proviennent des topsoils sous-forêt recouvrant les sites réhabilités.

Ces familles ont des caractéristiques différentes par rapport au sol, la famille des FABACEAE, POACEAE, SALICACEAE, ASTERACEAE et les MYRTACEAE supportent généralement les sols ayant un pH moyennement acide à basique. Les EBENACEAE sont des plantes essentiellement neutrophiles. Quant à la famille des EUPHORBIACEAE, ils n'exigent pas de sol spécifique et ont une grande capacité d'adaptation à des troubles écologiques et climatiques.

Les *Eucalyptus* sont des espèces à croissance rapide, se développent en sol sableux, terre de bruyère riche en humus, ils supportent un sol acide et neutre, humide ou sec. A maturité ils atteignent une hauteur de 15 à 20m et un diamètre allant jusqu'à 6m. Ces arbres sont donc propices aux conditions difficiles du sol dans la zone de Mandena.

III.2.3 Structure verticale

L'analyse de la structure des hauteurs est faite dans le but de dégager une vue générale sur la stratification verticale de la forêt. La structure des hauteurs est donnée par la distribution du nombre de tiges par classe de hauteur et renseigne sur la structure verticale du peuplement.

- Réhabilitation âgée de 1an

Pour la réhabilitation de 1an avec *Eucalyptus robusta* la hauteur des arbres n'atteigne pas les 5m. Les arbres de hauteur inférieure à 5 m dominent avec 1125 individus par hectare, pour les arbres dont la hauteur est inférieure à 1m, la densité est de 100 individus par hectare. En comparant avec celle de la zone de conservation qui est un vestige d'une forêt secondaire, ceci montre un accroissement positif du peuplement dans la rehab 1an car en 1an seulement, il dépasse le 1m.

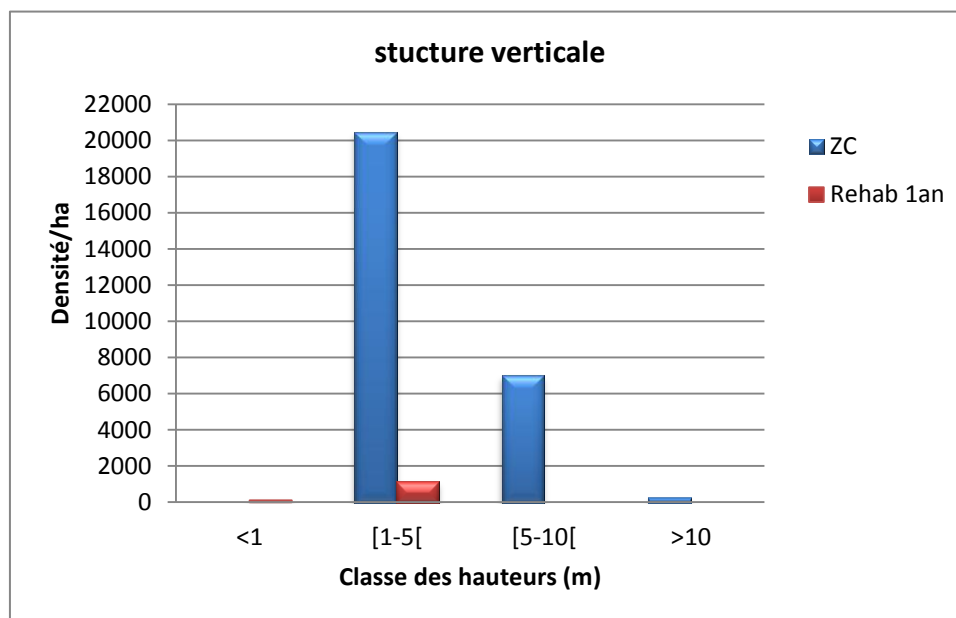


Figure 11: Structure verticale de rehab 1an

- Réhabilitation âgée de 2ans

L'analyse verticale dans rehab 2ans avec *Eucalyptus citriodora* montre que les arbres ont déjà une hauteur dépassant les 5m avec 566 individus par hectare, mais ce sont encore les arbres de hauteur inférieure à 5 m qui dominent avec 1066 individus par hectare. Seule la zone de conservation présente des arbres avec une hauteur dépassant les 10m.

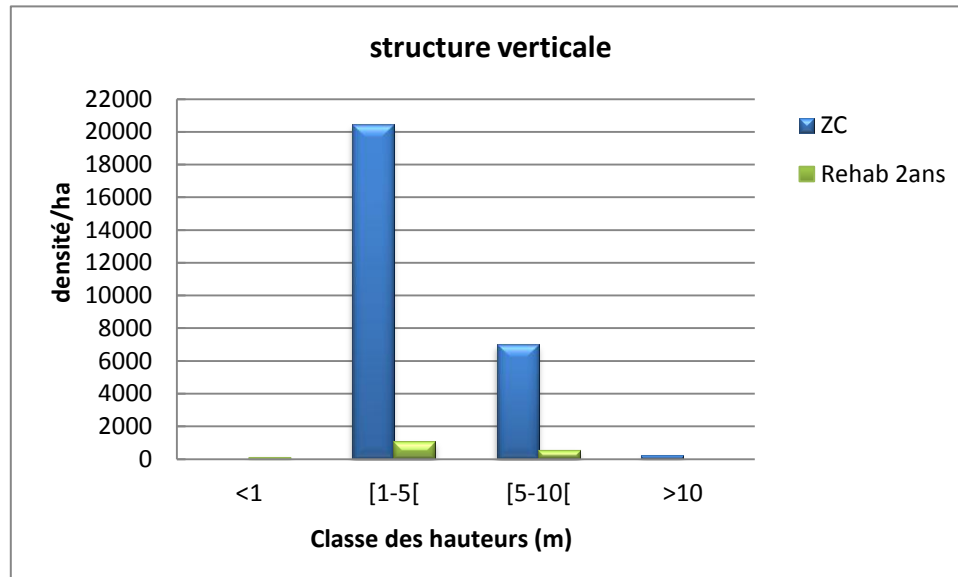


Figure 12: Structure verticale de rehab 2ans

D'après les résultats des inventaires, il est constaté que la hauteur des arbres dans les sites réhabilités ne dépasse pas les 10m, et moins de 5m pour rehab 1an. La densité par hectare pour les arbres de 1 à 5m de hauteur sont à peu près les mêmes pour la rehab 1an et pour la rehab 2ans, mais sont vraiment inférieures à celle de la zone de conservation.

III.2.4 Structure diamétrique

La structure diamétrique est un paramètre de caractérisation d'un peuplement forestier. La répartition des arbres d'une espèce en catégorie de diamètre définit la structure diamétrique de l'espèce et la répartition des arbres d'un peuplement entier définit la structure diamétrique totale qui représente alors la répartition des arbres, toutes espèces confondues, par catégorie de diamètre. (<http://www.afes.fr>)

- Réhabilitation âgée de 1an

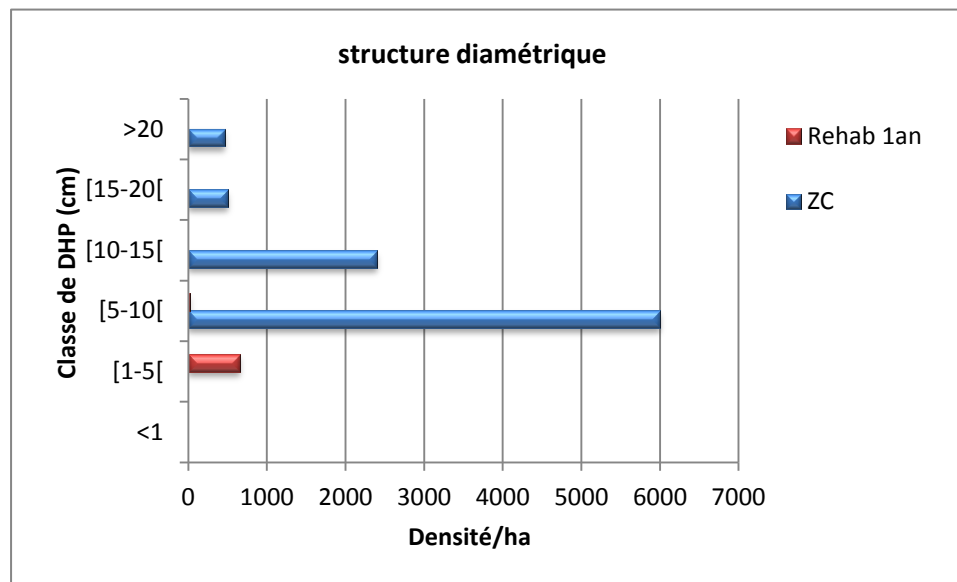


Figure 13 : Structure verticale de Rehab 1an

Pour la réhabilitation âgée de 1an, la structure diamétrique montre que les arbres ont généralement un DHP se trouvant dans l'intervalle [1-5[, seul quelques individus atteignent un diamètre supérieur à 5cm.

- Réhabilitation âgée de 2ans

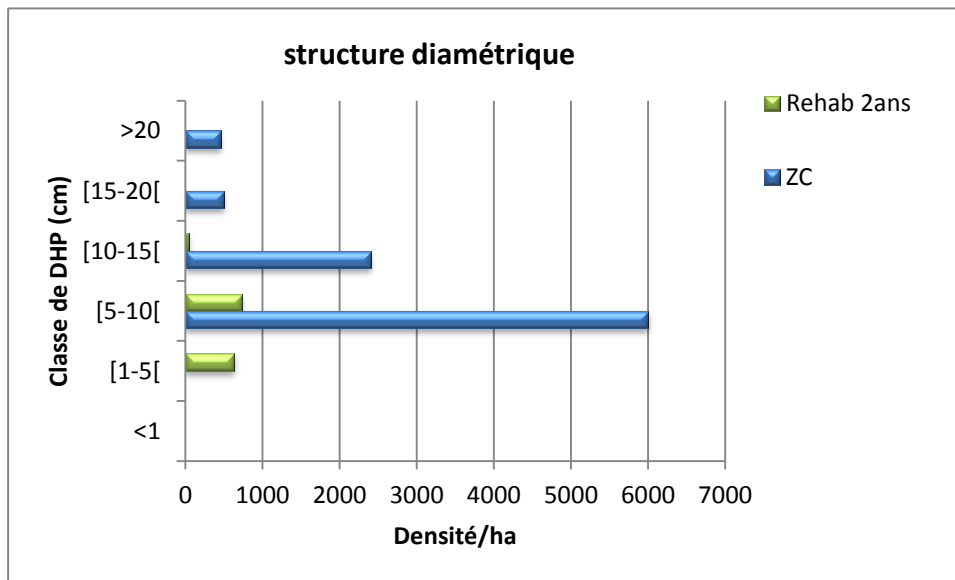


Figure 14 : Structure diamétrique de Rehab 2ans

Dans la réhabilitation âgée de 1an, quelques individus ont un DHP supérieur à 10cm, C'est-à- dire entre [10-15[mais la plupart des peuplement se trouve entre les diamètre [1-5[et [5-10[.

On observant les structures diamétriques de ces sites, quelques remarques sont observées :

- Seule la zone de conservation renferme des arbres avec un DHP supérieur à 15cm et même jusqu'à supérieur à 20cm.
- La croissance des arbres en diamètre est en fonction des âges du peuplement dans les sites réhabilités.

III.2.5 Relation sol-végétation

L'influence du sol sur la végétation est parfaitement identifiable à l'échelle de l'individu. La structure verticale et diamétrique ont permis de montrer la grande différence de l'accroissement des végétations ainsi que leur types selon les sites d'étude avec des types de sols différenciés.

Dans la zone de conservation, où le sol humique et légèrement hydromorphes présente une bonne structure, et un taux de matière organique raisonnable, pareille pour la forêt dégradée. Par contre pour le site réhabilité âgée de 2ans deux types de sol se rencontrent, la première un sol légèrement humique et légèrement hydromorphes avec un faible taux de matière organique et où la hauteur moyenne des arbres atteigne jusqu'à 6m avec un fût de 1,8m, la deuxième avec un sol dont les horizons sont non différenciée sauf le topsoil très compacte, difficile pour la pénétration des racines dans ces sols, au plus avec des arbres chétifs⁶ ayant une hauteur moyenne de 2m et un fût inférieur à 1m. (Figure 15)

Dans les milieux ouverts, la présence des espèces indicatrices de dégradation du sol notamment *Phillipia sp* (anjavidy), et dans la réhabilitation âgée de 1an il existe certains endroits où il n'y a pas de végétation comme dans RHB 1an II, là où les horizons du profil ne sont pas très différenciés, avec une succession de dépôt de topsoil.

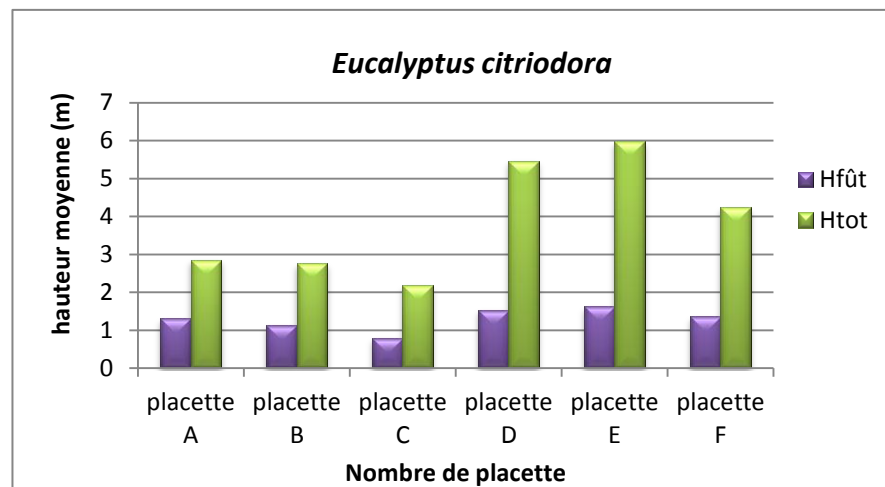


Figure 15 : Etat de la hauteur fût par rapport à Htot (rehab 2ans)

⁶Qui manque d'ampleur, insuffisant, frêle

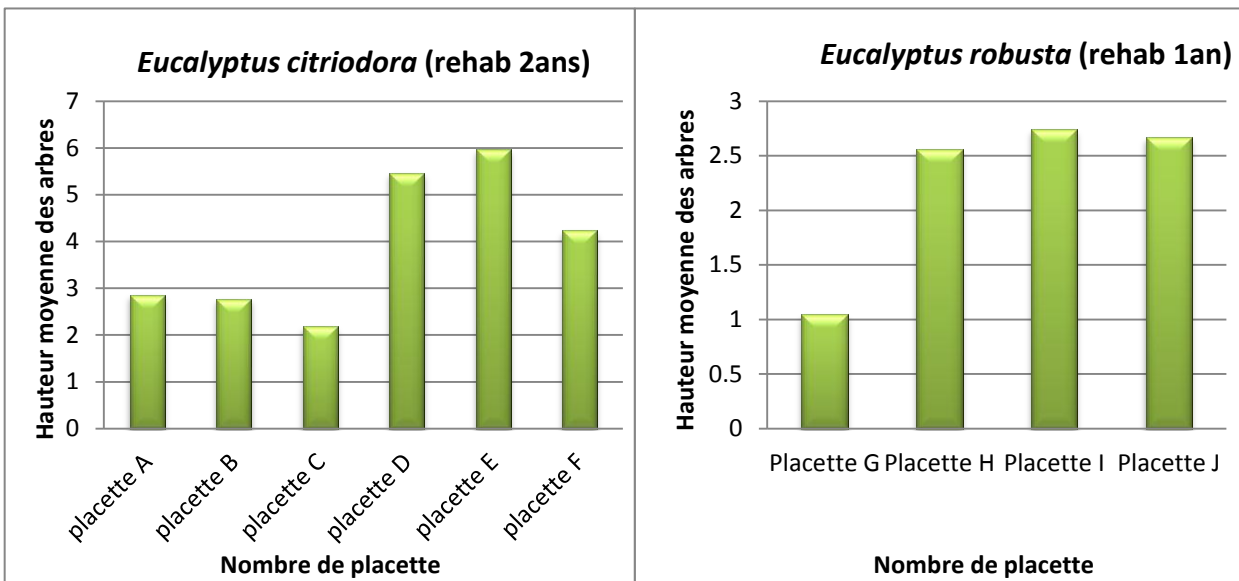


Figure 16 : Hauteur moyenne des arbres par placette

La figure montre bien la différence de croissance de la végétation de même âge dans les sites réhabilités, pour *Eucalyptus citriodora*, la hauteur moyenne varie entre 2 à 6m, et de 1 à 2,8m pour *Eucalyptus robusta*. Cette différence de hauteur est surtout causée non seulement par la nature du topsoil dans ces sites réhabilités mais aussi et surtout par son mode de dépôt qui ne sont pas uniformes et qui ont été trop compactés.



Photo 16: Etat actuel de la réhabilitation 2013



Photo 17: Etat actuel de la réhabilitation 2014

III.3 Relation sol-eau-végétation

III.3.1 Humidité des sols

Le suivi dans le temps de l'humidité du sol peut être réalisé directement par gravimétrie (humidité pondérale d'échantillons de sol), ou indirectement en utilisant des relations entre propriétés physiques ou chimiques des sols et leur teneur en eau.

D'après l'analyse des fosses pédologiques, presque toutes les premières couches sont humides, et l'enracinement ne dépasse pas les deux premières couches. Là où le taux d'humidité du sol est élevé, le peuplement a une croissance encourageante par rapport à leur hauteur et leur diamètre.

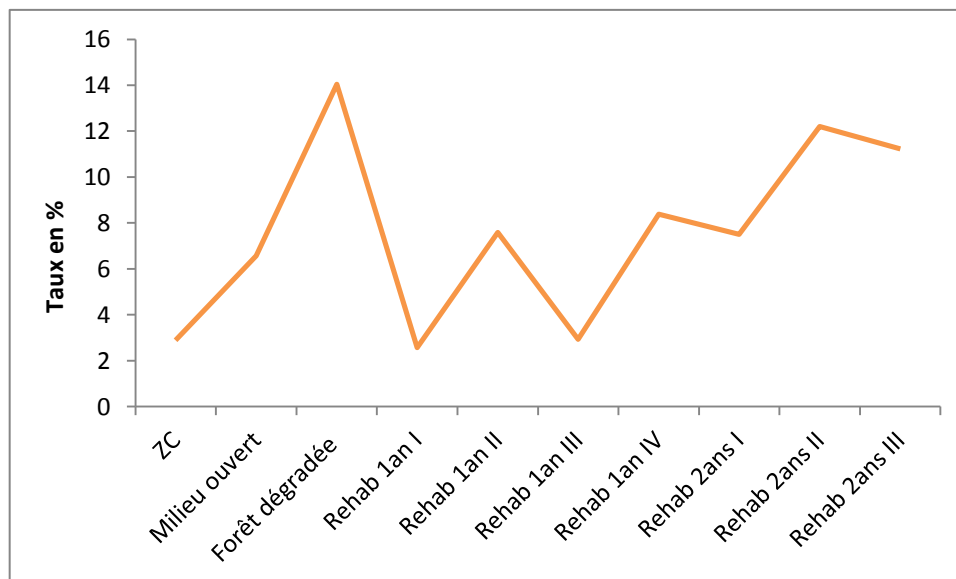


Figure 17: Courbe de variation de l'état d'humidité des sites

La forêt dégradée présente un taux d'humidité très élevée car l'échantillonnage a été fait en périodes de pluie, de même pour la fosse Rehab 2ans II. Mais pour les autres sites, l'échantillonnage a été fait en période sèche, il est à remarquer que pour les sites réhabilités ceux qui sont couverts par le topsoil marécage, ont un taux d'humidité beaucoup plus élevée que ceux couverts par le topsoil sous-forêt, ceci s'explique par la structure de ces deux type de topsoil, l'un avec une structure compacte et retient beaucoup plus l'eau que l'autre ayant une structure particulière.

III.3.2 Bilan Hydrique

Le bilan hydrique permet de suivre, selon une méthode simple, l'état de la réserve en eau du sol en tenant compte des besoins en eau de la végétation et des apports naturels par les pluies ou par irrigation.

D'après les données climatiques de Mandena, le bilan hydrique de la station météorologique de Mandena (Figure 18) a été conçu en utilisant le modèle de Thornthwaite (Tableau XX), ce bilan tient compte des réserves en eau du sol, de l'évaporation au niveau du sol, de la transpiration des plantes, de l'évapotranspiration qui cumule les deux phénomènes.

Tableau VII: Données hydrologique de la station de Mandena en 2014

	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Jul	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Rain	184,81	140,76	29,45	19,46	90,80	49,18	97,56	105,84	63,45	254,74	150,03	439,02
ETR	140	140	30	19	91	49	98	104	64	114	120	134
Surplus	145	0	0	0	0	0	0	0	0	42	30	305
Déficit	0	0	112	109	24	60	4	0	43	0	0	0
T°	26,41	26,39	26,52	24,79	22,82	22,01	20,85	21,15	21,55	22,79	23,65	25,53

T: Temperature

ETR: évapotranspiration

Toutes ces données sont traduites par le graphe suivant :

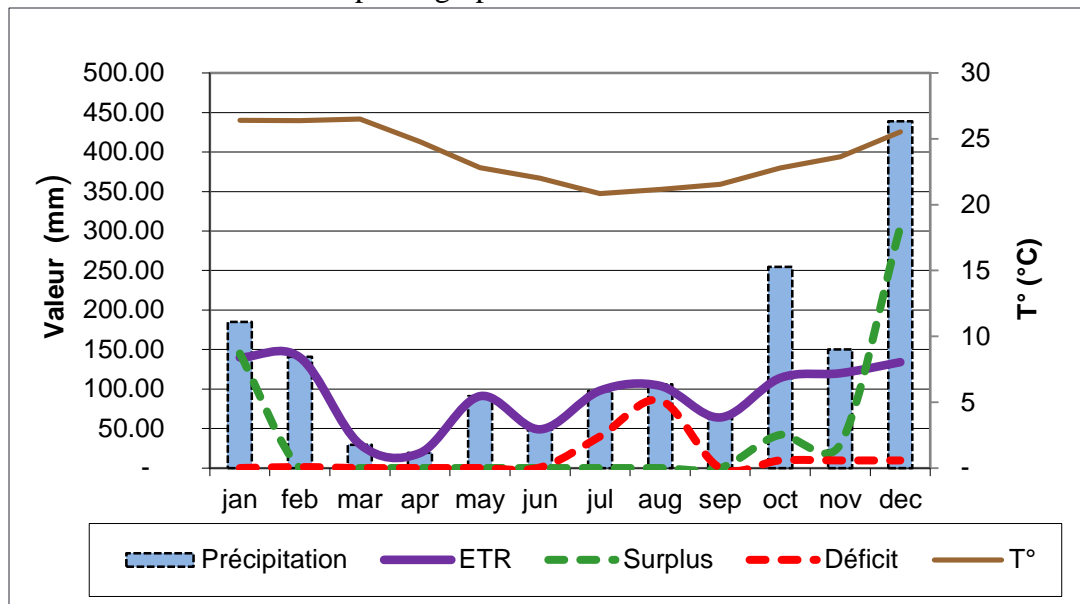


Figure 18 : Bilan hydrique de la station de Mandena en 2014

Le surplus correspond à l'eau utile c'est-à-dire à la fraction de la réserve qui est exploitable par la plante, la fraction accessible par les racines et absorbable par leur succion.

Le déficit par contre est le point de flétrissement, c'est-à-dire la limite inférieure de l'eau absorbables par les racines, lorsque cette limite est atteinte la végétation à tendance à se faner rapidement.

Ces données peuvent être représentatives de tous les sites d'étude. En 2014, du mois de Février à Août, il y a un très fort déficit en eau. Ce manque de réserve est normal compte tenu de la pluviométrie. Ce n'est qu'en mois de Septembre jusqu'en Janvier que les sols ont des réserves en eau. Sous des températures de 25 à 30°C, les plantes consomment par évapotranspiration environ 4 mm d'eau par jour (Wikipédia, 2015). Ce bilan insinue le besoin d'un apport d'eau pour les végétations surtout pour le mois de Juin jusqu'en Septembre ou on remarque un très fort déficit en eau, et il montre également que le reboisement devra se faire à partir du mois d'Octobre jusqu'en Février où il y a plus de précipitation et de réserve en eau pour la végétation dans le site de Mandena.

CHAPITRE IV: DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

IV.1 Discussion des résultats des sites réhabilités

La présence des horizons de transition sur certain profil (milieu ouvert et rehab 2ans I) marque le rajeunissement de ces sols. Ce rajeunissement peut être interpréter de deux façons pour les 2 cas : premièrement un rajeunissent marquant la régression du sol dans la forêt dégradée, ceci peut être causé par plusieurs facteurs comme l'acidification qui peut être induit par les changements climatiques. Deuxièmement un rajeunissement qui peut marquer une évolution du sol dans les sites réhabilités, une évolution résultant surtout de la présence de la végétation sur ces sites.

Le profil du sol des sites réhabilités diffèrent surtout par le type de topsoil mis en place et par le mode de dépôt des remblayes, c'est-à-dire que le remblayage des terrains ne se font pas uniformément d'où la présence de structure compacte pour les uns et massive non cohérente pour les autres et de même pour l'épaisseur des topsoil qui est différent pour chaque site.

L'accroissement des végétations diffèrent également selon le topsoil, les arbres plantés ont tendance à s'accroître plus rapidement sur le topsoil sous-forêt et reste chétif ou parfois meurt sur les topsoil marécage de même pour les feuillages et le DHP.

IV.2 Discussion des questions

IV.2.1 Les propriétés physico-chimiques des sols réhabilités évoluent-ils vers ceux des sites de référence naturelle ?

L'analyse des propriétés physico-chimiques des sites d'étude n'ont pas été suffisante, seuls quelques caractères physiques et chimiques ont pu être vérifiés selon la possibilité de la société, alors qu'il y a encore d'autres analyses importantes qui peuvent être des facteurs de l'évaluation des propriétés du sol après exploitation minière. De ce fait la réponse à la première question est négative, car il est fondamental que les analyses du sol soient complètes pour pouvoir évaluer son évolution.

IV.2.2 Les végétations plantées dans les sables déminéralisés auront-ils un taux de croissance égale à ceux des zones de référence naturelle ?

La structure verticale et la structure diamétrique ont montré un accroissement positif de la végétation des sites réhabilités par rapport aux sites de référence naturelle. Mais il y a plusieurs critères d'évaluation de la végétation qui n'ont pas été analysés comme la structure spatiale et horizontale. La réponse à cette question est donc négative.

IV.3 Recommandations

IV.3.1 Amélioration des réhabilitations

IV.3.1.1 Correction du pH

Les mesures du pH ont montrés une très forte acidité des sols surtout les sites réhabilité, ceci affecte sur la qualité du sol, et pourra être néfaste pour la végétation qu'il supporte. Pour corriger le pH, un apport de biomasse ne résoudra que partiellement le problème, un apport en chaux dolomitique ou de cendre de bois (amendement calcaire riche en calcium phosphore et potasse) est la méthode la plus simple.

IV.3.1.2 Choix et utilisation du topsoil

L'utilisation du topsoil sous- forêt et beaucoup plus indiqué que celle du topsoil marécageux, ceci est non seulement valable pour la végétation mais surtout pour l'amélioration de la qualité biologique du sol. Le topsoil sous-forêt est beaucoup plus riche biologiquement, et a une biomasse permettant de rendre le sol beaucoup plus fertile.

IV.3.1.3 La décompactions des substrats

Le substrat compacté de la mine manque d'un réseau macroporeux facilitant les mouvements de l'eau, l'aération et l'extension du système racinaire. Il vaut mieux alors replacer les déblais en évitant la compaction, plutôt que d'essayer de la réduire à posteriori (The Department for the Environment, 1996). Néanmoins, quand la compaction n'a pu être évitée, il faut l'alléger : un labourage profond, sur plus de 45 cm, permettra la pénétration racinaire, l'infiltration de l'eau et la lutte contre l'érosion.

IV.3.1.4 Application d'engrais organique

Cette méthode peut fournir des éléments nutritifs dans des formes lentement disponibles et améliorer les propriétés physico-chimiques des sols. Les engrais organiques épandus à la surface des sols sableux se décomposent rapidement, par conséquent, soit le fumier doit être incorporé plus profondément dans le sol, soit une couche de fumier d'au moins un centimètre d'épaisseur doit être appliquée en surface, ce qui permettra d'améliorer le stockage de l'eau, l'activité biologique, l'état nutritionnel et l'augmentation des rendements.

IV.3.1.5 Programmer un plan d'arrosage

Le déficit en eau de la station doit être récompensé pour une meilleure croissance des arbres. Les stations de la réhabilitation devraient donc avoir un apport en eau chaque année surtout les mois de juin au septembre.

IV.3.2 Etudes complémentaires

IV.3.2.1 Identification des plantes neutralisantes d'acide

Pour remédier biologiquement à l'acidité des sites réhabilités, la détermination d'espèces végétales capable de neutraliser l'acide en formant des sels et de l'eau sera une solution efficace. Cette technique est déjà utilisée dans la réhabilitation des sites miniers en Nouvelle-Calédonie.

IV.3.2.2 Etude de la durée de stockage du Topsoil

Dans la plupart des cas, la remise en place du sol de surface est le meilleur moyen de restaurer la productivité. Quand celui-ci a été stocké trop longtemps, il a alors tendance à perdre sa microflore et sa microfaune, les nutriments ont été lessivés et il devient une source de mauvaises herbes. Certaines normes préconisent la dimension des tas de topsoil pour une durée de plus de 6 mois de stockage.

IV.3.2.3 Faire des études beaucoup plus approfondies sur l'équilibre de l'eau du sol

L'eau et les gaz présents dans la zone des racines des plantes sont contenus dans les espaces lacunaires du sol où ils circulent. La rétention et la circulation de l'eau dans le sol sont d'une importance capitale pour la vie des arbres.

L'eau que contiennent les espaces lacunaires peut être retenue avec une puissance considérable. L'énergie de rétention et les forces qui la suscitent exercent une influence sur presque tous les phénomènes de quelques importances qu'intéressent les eaux du sol. La multiplicité des phases et des éléments du système sol-eau lui confère une grande complexité et son étude du point de vue thermodynamique générale peut aider à comprendre non seulement son équilibre mais aussi la dynamique de l'écoulement des eaux du sol.

IV.3.2.4 Suivi régulier de l'état pédologique et biologique des sites réhabilités

Le suivi régulier des sites d'études est très important surtout pour l'évaluation de l'efficacité des analyses précédentes. Le suivi doit suivre les mêmes procédures et avoir les mêmes techniques en vue de procéder à une comparaison des résultats et l'échelle spatio-temporelle doit être respectée dans le but de faire une simulation, pour cela un suivie annuelle est recommandé.

CONCLUSION

La réhabilitation des sites effectués par QMM donne des résultats assez convainquant. La présente étude montre que la propriété physico-chimique des sols influence non seulement sur la qualité de la végétation, mais aussi sur la disponibilité en eau. Les essais de réhabilitation ont montrés la très grande efficacité du topsoil sous forêt par rapport à celle du marécage, ceci est visible sur la croissance et le développement des arbres plantés.

Au niveau de l'évolution des propriétés physico-chimiques des sols, les résultats ont montrés que les propriétés chimiques des sites de référence naturelles et des sites réhabilités sont presque similaires. En effet ils sont tous chimiquement pauvres, avec un pH fortement acide variant de 3 à 4.5. Cette acidité du sol qui conditionne l'assimilation des éléments minéraux, nécessite d'être corrigé rapidement pour favoriser la bonne condition des sols des sites réhabilités par QMM. D'autres analyses chimique complémentaires s'avèrent également nécessaires pour les propriétés chimiques, tels que les bases échangeables, la capacité d'échange cationique ou encore le phosphore et l'azote totale.

La différence entre les profils se trouve sur leurs caractères physiques et sur l'épaisseur des couches surtout l'épaisseur du topsoil. Dans les sites de référence la structure est particulière à la base des couches, grumeleuses au niveau des racines pour la zone de conservation, massive non cohérente au niveau des racines, compacte à la base des couches pour la forêt dégradée et les milieux ouverts. Ils ont tous une texture sablo-limoneuse avec une forte enracinement, des couches supérieurs de couleur gris ou brun foncé, un passage graduel ou progressif des couches superposées et la présence d'activité biologique. Pour les sites réhabilités, le meilleur résultat est « rehab 2ans I » avec une structure particulière à la base des couches, massive non cohérente au niveau des racines, une texture sablo-limoneuse avec une forte enracinement, une couche supérieur de couleur gris-brun foncé, un passage brutal entre les couches superposées et l'absence d'activité biologique.

Au niveau de l'évolution de la végétation plantée: la composition floristique des sites réhabilités n'est pas très riche par rapport à celle de la zone de conservation en réponse aux besoins de la population qui priorise l'insertion des espèces à croissance rapide, mais il est

spécifié que dans les sites réhabilités où le topsoil utilisé est le types sous forêt, se trouvent des espèces autochtones existants également dans la zone de conservation et dans les autres sites de référence.

Dans le site témoin âgé de 2ans on note une hauteur maximale de 8.8m et une hauteur de 4m pour les sites réhabilités âgés de 1an, à titre de comparaison la zone de conservation présente des arbres avec une hauteur plus de 10m. Pour ces sites le DHP des arbres est très variables surtout pour celle de la réhabilitation âgée de 2ans allant de 1.5cm à 11.5cm, alors qu'il est de l'ordre de 5 à 43cm dans la zone de conservation.

Quant à la relation sol-eau-végétation, le taux d'humidité des sites réhabilités varie également selon le types de topsoil utilisé, avec un taux très élevée sur les sites ayant un topsoil type sous-forêt et faible pour ceux sous topsoil type marécage. L'humidité des sols agit sur l'accroissement de la végétation. Et avec le bilan hydrique l'état de réserve en eau des sites d'études et la période de reboisement ont pus être déterminée.

L'insuffisance des analyses chimiques et floristiques n'ont pas permis de donner une réponse positive aux questions posées, l'objectif n'est donc pas atteint, ce qui ne minimise pas les travaux effectués.

Ces résultats, nous a permis de conclure que les quelques années de réhabilitation effectuée par Rio Tinto QMM présente une bonne perspective d'avenir mais efforts et des travaux restent à faire pour atteindre l'objectif de revegétalisation des sites exploités, parmi ces travaux : l'identification des plantes neutralisantes d'acide ; l'étude de la durée de stockage du topsoil ; l'études sur l'équilibre de l'eau du sol ainsi que le suivi régulier de l'état pédologique et biologique des sites réhabilités.

Cette étude ne représente relativement qu'une petite partie du travail à faire dans l'amélioration de la réhabilitation, mais elle constitue une base fondamentale pour la suite et la continuité des études à venir. Le sol se transforme et évolue avec le temps, d'où la limite de l'étude, mais à quel stade de son évolution se trouve le sol réhabilité actuellement et quand atteindra-t-il l'état des zones de référence naturelle ?

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDRINIELA. N. I, 2013. Evolution Pédologique et biologique des sites réhabilités à Ambatovy, Mémoire d'ingénieur, Ecole supérieure des sciences agronomiques, Université d'Antananarivo, 60p.
- ANDRIANIRINA Y. F, 2007. Effet de différentes sources organiques de phosphore sur les caractéristiques physico-chimiques des ferralsols de Tanety, Mémoire de DEA, Université de Fianarantsoa.
- BOULARD.B, MAPAQ.M, GRENIER, GIROUX. M, GIRARD.V, IRDA, 2003. Description statistique des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec, 108p.
- DUCHAUFFOUR, 1960. Précis de Pédologie, Masson et C^{ie}, 419p.
- EKOUMOU A. C, 2000. Analyse de la structure de la FCL de Lomie et Messok par Ananie Université de Dschang.
- GANZHORN. U. J, GOODMAN. S. M. and VINCELLETTE. M, 2007. Biodiversity, Ecology and Conservation of Littoral Ecosystems in Southeastern Madagascar, Tolagnaro (Tolagnaro), SI/MAB series 11,410p
- GOBAT J.M, 2007. Protocole de description des sols, travaux pratique en Biogéoscience, Université de Neuchâtel.52p.
- HUBER. G, SCHAUB. C., 2011, La fertilité des sols: L'importance de la matière organique, Environnement- Innovation, 42p.
- NOROMIARILANTO. F, 2011. évaluation du potentiel de régénération de la végétation de transition entre les parcelles 1 et 2 du parc national d'Andohahela en vue d'une restauration écologique. Mémoire de DEA, Facultés des Sciences, Université d'Antananarivo, 63p.
- QMM S.A. Plan de Gestion Environnemental, document officiel, 2001.
- QMM S.A. Programme de réhabilitation. Phase 2 : Recherche et expérimentation. Protocole de Travaux. Composante 2 : Essences autochtones et milieux naturels, 1997, pages 2-11.
- RAMANANTSOA. S, 2008. Amélioration des connaissances sur la flore, le sol et la production de plants pour le programme de réhabilitation du site minier d'Ambatovy, Mémoire d'ingénieur, Ecole supérieure des sciences agronomiques, Université d'Antananarivo, 80p.

- RANDRIAMBOAVONJY. J. C., 2000. Les analyses courantes du sol. Manuel forestier n°8. 44 p.
- RANDRIAMBOAVONJY. J. C., 2000. Examen du profil pédologique. Manuel forestier n°2. 28 p.
- RANDRIAMALALA J, 2009. Influence des pratiques agricoles et du milieu sur les dynamiques forestières post-culturelles dans le corridor Ranomafana-Andringitra, Thèse de Doctorat, Ecole supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, 121p.
- RANDRIAMALALA R. P, 1999. Valorisation naturelle et artificielle des ilménites de Fort-dauphin, application à leur valorisation. Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo, 110 p.
- RABEMANANTSOA. A. N, 2011. Caractérisation du sol d'Ambatovy région d'Alaotra Mangoro est de Madagascar par analyse physico-chimique et par spectrométrie de fluorescence X. Mémoire de DEA, Faculté des Science, Université d'Antananarivo, 61p.
- RAKOTONIRINA. T. H., 2010. La place du port d'Ehoala dans l'exploitation d'ilménite le cas de la commune Urbaine de Tolagnaro région Anosy, Facultés des lettres et sciences humaines, Département de géographie, Université d'Antananarivo.
- RAMBELOSON. F. R, 2006. Aménagement des sols du bassin versant du lac Itasy, Mémoire de DEA, Ecole supérieur des sciences agronomiques, Université d'Antananarivo, 80p.
- RAMANGASON. G. H, 1986. Analyse de la structure horizontale et verticale de la forêt sèche d'Ampijoroa. Thèse de Doctorat, Etablissement d'Enseignement Supérieur des Sciences, Université de Madagascar, 173p.
- RAZAFIMAHEFA. P, 2010, Contribution à l'étude des paramètres physico chimiques (ph, matières organiques, éléments Echangeables,...) des sols du moyen est de Madagascar dans le moyen-ouest et du moyen cadre de la valorisation de la culture du riz, Mémoire DEA, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo.
- SAUER. L. J, 1999, Le sol un système vivant avant tout. Groupe de coordination sur les bois Raméaux, p35-43.
- SCOTT. D. F, BURNS. M. R, RAAL. P, and SCHOLLES. R. J., Dune sand fertility in relation to vegetation cover, as influenced by dredge mining, at Richards Bay, South Africa.1993, Division of Forest Science and Technology, page 4-11.

SITES INTERNET

<http://www.afes.fr/>

<http://www.afidol.org>

<http://eduterre.ens-lyon.fr>

<http://www.fao.org/soils>

<http://www.aquaportail.com/>

<http://www.riotinto.com/>

<http://www.riotintomadagascar.com/>

Liste des espèces dans la réhabilitation âgée de 2ans par placette

[illegible]

Tableau IX: Liste de peuplement placette B

Nom du chef d'équipe : Ismaëlle				N° Parcelle : B				Pente : [0;5[5;10[>10			
Date de relevé : 23/12/2014				Altitude : 21m				Sol : Topsoil Oui Non			
Lieu : Réhabilitation				Coordonnées				Erosion : Faible Moyenne Forte			
				GPS X 7238265							
Année de Plantation : 2013				Y 0703894				Trace de Feu : Oui Non			
N° Arbre	Espèce		DC	DHP/C	Htot	Hfût	P	H	F	Etat	Observations
1	<i>Eucalyptus citridora</i>		1,2		1,1					Chétif	Misy maina ny raviny
2	<i>Eucalyptus citridora</i>		1,5		1,3					Chétif	
3	<i>Eucalyptus citridora</i>		3,6		1,6					Chétif	Maina ny raviny
4	<i>Eucalyptus citridora</i>		1,5		0,5					Chétif	
5	<i>Eucalyptus citridora</i>			2,3	2,5	<1					
6	<i>Eucalyptus citridora</i>			1,5	2,2	<1					
7	<i>Eucalyptus citridora</i>			4,8	4,3	1,6					
8	<i>Eucalyptus citridora</i>			5,8	4,7	1,2					
9	<i>Eucalyptus citridora</i>			6,5	4,7	1,1					
10	<i>Eucalyptus citridora</i>			5,2	3,9	1,1					
11	<i>Eucalyptus citridora</i>			4,5	5	1,1					
12	<i>Eucalyptus citridora</i>			3,1	4	1,1					
13	<i>Eucalyptus citridora</i>			2,9	3,8	1,4					
14	<i>Eucalyptus citridora</i>		2,8		1,6						
15	<i>Eucalyptus citridora</i>		<1		0,35						
16	<i>Eucalyptus citridora</i>										
	A Remplir obligatoirement pour tous les arbres à inventorier dans les parcelles										
	A Remplir pour les jeunes arbres n'ayant pas encore un DHP										
	A Remplir pour les arbres ayant un DHP										

Tableau X: Liste de peuplement placette C

Nom du chef d'équipe : Ismaelle			N° Parcelle : C			Pente :			[0;5]	[5;10]	>10
Date de relevé : 23/12/2014			Altitude : 28m			Sol :			Topsoil Oui Non		
Lieu : Réhabilitation			GPS			X 7238324			Erosion : Faible Moyenne Forte		
Année de Plantation : 2013			Y 0703922			Trace de Feu :			Oui Non		
N° Arbre	Espèce		DC	DHP/C	Htot	Hfût	P	H	F	Etat	Observations
1	<i>Eucalyptus citridora</i>			3	3	<1					
2	<i>Eucalyptus citridora</i>			2,7	2,7	<1					
3	<i>Eucalyptus citridora</i>	2,8		1,7						Chétif	
4	<i>Eucalyptus citridora</i>	1,5		1,6						chétif	
5	<i>Eucalyptus citridora</i>			2	2,3	<1					Maina
6	<i>Eucalyptus citridora</i>			3,8	3	<1					
7	<i>Eucalyptus citridora</i>			3,5	2,5	<1					
8	<i>Eucalyptus citridora</i>			2,2	2,3	<1					
9	<i>Eucalyptus citridora</i>	2,4		1,7						Vigoureux	
10	<i>Eucalyptus citridora</i>	1,2		0,6						Chétif	Maina ny tahony
11	<i>Eucalyptus citridora</i>			2,4	2	<1					Maina ny raviny
12	<i>Eucalyptus citridora</i>	2,2		0,5						Chétif	Maina
13	<i>Eucalyptus citridora</i>			1,8	2	<1					Maina ny laingony
14	<i>Eucalyptus citridora</i>			5,5	4,1	<1					
15	<i>Eucalyptus citridora</i>			4,4	3,2	<1					
16	<i>Eucalyptus citridora</i>	2		1,7						chétif	
	A Remplir obligatoirement pour tous les arbres à inventorier dans les parcelles										
	A Remplir pour les jeunes arbres n'ayant pas encore un DHP										
	A Remplir pour les arbres ayant un DHP										

Tableau XI: Liste de peuplement placette D

[illegible]

Tableau XII: Liste de peuplement placette E

Nom du chef d'équipe : Ismaelle				N° Parcelle : E				Pente : [0;5[[5;10[>10			
Date de relevé : 24/12/2014				Altitude : 23m				Sol : Topsoil Oui Non			
Lieu : Réhabilitation				Coordonnées GPS X 7238258				Erosion : Faible Moyenne Forte			
Année de Plantation : 2013				Y 0703859				Trace de Feu : Oui Non			
N° Arbre	Espèce		DC	DHP/C	Htot	Hfût	P	H	F	Etat	Observations
1	<i>Eucalyptus citridora</i>			4,7	4,7	1,5					
2	<i>Eucalyptus citridora</i>			6,5	5,9	1,35					
3	<i>Eucalyptus citridora</i>			11,4	8,8	1,7					
4	<i>Eucalyptus citridora</i>			5,5	4,6	1,7					
5	<i>Eucalyptus citridora</i>			7,5	6,4	1,5					
6	<i>Eucalyptus citridora</i>			7,1	6,3	2					
7	<i>Eucalyptus citridora</i>			11,5	6,5	1,9					
8	<i>Eucalyptus citridora</i>			8	6,5	2					
9	<i>Eucalyptus citridora</i>			8,4	6,7	1,8					
10	<i>Eucalyptus citridora</i>			7,2	6,6	1,65					
11	<i>Eucalyptus citridora</i>			8,9	6	2					
12	<i>Eucalyptus citridora</i>			6	6,2	1,8					
13	<i>Eucalyptus citridora</i>			5,3	4,8	1,4					
14	<i>Eucalyptus citridora</i>			7	6,4	1,5					
15	<i>Eucalyptus citridora</i>			7,1	6,6	1,6					
16	<i>Eucalyptus citridora</i>			5,3	5,6	1,5					
17	<i>Eucalyptus citridora</i>			9,1	6,4	1,9					
18	<i>Eucalyptus citridora</i>			4	4,8	1,1					
19	<i>Eucalyptus citridora</i>			4,2	4,8	1,1					
20	<i>Eucalyptus citridora</i>			7,5	5,8	1,7					
21	<i>Eucalyptus citridora</i>			7,9	6,5	1,7					
22	<i>Eucalyptus citridora</i>			3,4	4,5	1,4					
A Remplir obligatoirement pour tous les arbres à inventorier dans les parcelles											
A Remplir pour les jeunes arbres n'ayant pas encore un DHP											
A Remplir pour les arbres avant un DHP											

Tableau XIII: Liste de peuplement placette F

Nom du chef d'équipe : Ismaelle			N° Parcelle : F			Pente :			[0;5[[5;10[>10		
Date de relevé : 29/12/2014			Altitude : 29m			Sol :			Topsoil Oui Non		
Lieu : Réhabilitation			Coordonnées			GPS			X 7238305		
Année de Plantation : 2013			Y 0703843			Erosion :			Faible Moyenne Forte		
Trace de Feu :			Oui			Non					
N° Arbre	Espèce		DC	DHP/C	Htot	Hfût	P	H	F	Etat	Observations
1	<i>Eucalyptus citridora</i>			2,6	3,2	<1					
2	<i>Eucalyptus citridora</i>			6	4,5	1,4					
3	<i>Eucalyptus citridora</i>			4,1	4,2	1,1					
4	<i>Eucalyptus citridora</i>			7,3	5,9	1,6					
5	<i>Eucalyptus citridora</i>			3,6	4	1,15					
6	<i>Eucalyptus citridora</i>			8,7	5,7	1,8					
7	<i>Eucalyptus citridora</i>			8,3	5,7	2					
8	<i>Eucalyptus citridora</i>	2			1,2						
9	<i>Eucalyptus citridora</i>			6,7	4,8	1,15					
10	<i>Eucalyptus citridora</i>			5	4,1	<1					
11	<i>Eucalyptus citridora</i>			4	3,6	0,9					
12	<i>Eucalyptus citridora</i>			7,5	5,1	1,5					
13	<i>Eucalyptus citridora</i>			9,3	5	1,3					
14	<i>Eucalyptus citridora</i>			4	3,2	1,2					
15	<i>Eucalyptus citridora</i>			5,9	4	1,6					
16	<i>Eucalyptus citridora</i>			4,6	3,5	1,1					
17	<i>Eucalyptus citridora</i>			5,8	3,7	1,2					
18	<i>Eucalyptus citridora</i>			4,5	4,5	1,25					
19	<i>Eucalyptus citridora</i>			5,5	4,9	1,2					
20	<i>Eucalyptus citridora</i>			4,1	4,7	1,5					
	A Remplir obligatoirement pour tous les arbres à inventorier dans les parcelles										
	A Remplir pour les jeunes arbres n'ayant pas encore un DHP										
	A Remplir pour les arbres ayant un DHP										

Liste des espèces dans la réhabilitation âgée de 1 an par placette

Tableau XIV: Liste de peuplement placette G

Nom du chef d'équipe : Ismaelle				N° Parcelle : G				Pente : [0;5[[5;10[>10			
Date de relevé : 19/01/2015				Altitude : 54m				Sol : Topsoil Oui Non			
Lieu : Réhabilitation				Coordonnées GPS X 7238436				Erosion : Faible Moyenne Forte			
Année de Plantation : 2014				Y 0704693				Trace de Feu : Oui Non			
N° Arbre	Espèce		DC	DHP/C	Htot	Hfût	P	H	F	Etat	Observations
1	<i>Eucalyptus robusta</i>		<1		1						
2	<i>Eucalyptus robusta</i>		<1		1						
3	<i>Eucalyptus robusta</i>		<1		1,1						
4	<i>Eucalyptus robusta</i>		<1		0,9						
5	<i>Eucalyptus robusta</i>		<1		1,2						
6	<i>Eucalyptus robusta</i>		<1		1,2						
7	<i>Eucalyptus robusta</i>		<1		0,9						
8	<i>Eucalyptus robusta</i>		<1		0,7						
9	<i>Eucalyptus robusta</i>		<1		0,8						
10	<i>Eucalyptus robusta</i>		<1		1,2						
11	<i>Eucalyptus robusta</i>		<1		1,3						
12	<i>Eucalyptus robusta</i>		<1		1,1						
13	<i>Eucalyptus robusta</i>		<1		1,2						
14	<i>Eucalyptus robusta</i>										
15	<i>Eucalyptus robusta</i>										
16	<i>Eucalyptus robusta</i>										
17	<i>Eucalyptus robusta</i>										
<div style="background-color: #00FF00; padding: 2px;">A Remplir obligatoirement pour tous les arbres à inventorier dans les parcelles</div> <div style="background-color: #FFFF00; padding: 2px;">A Remplir pour les jeunes arbres n'ayant pas encore un DHP</div> <div style="background-color: #00FFFF; padding: 2px;">A Remplir pour les arbres ayant un DHP</div>											

Tableau XV: Liste de peuplement placette H

[illegible]

Tableau XVI: Liste de peuplement placette I

[illegible]

Tableau XVIII: Liste des espèces dans la zone de conservation

NOM VERNACULAIRE	FAMILLE	GENRE	ESPECE	H Total	DHP
Zambo	CLUSIACEAE	<i>Mammea</i>	<i>bongo</i>	3,5	5
Fotombavy	SARCOLAENACEAE	<i>Leptolaena</i>	<i>pauciflora</i>	5	6
Zoramena	FLACOURTIACEAE	<i>Scolopia</i>	<i>erythrocarpa</i>	5,5	5
Fandra	PANDANACEAE	<i>Pandanus</i>	<i>sp</i>	6,5	6
Fanolafotsy	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>multiflora</i>	5	6
Zambo	CLUSIACEAE	<i>Mammea</i>	<i>bongo</i>	3,5	5
Sisikandrongo	ANACARDIACEAE	<i>Poupartia</i>	<i>chapelieri</i>	6,5	12
Fanolamena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	7	6
Fanolamena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	4,5	5
Fanolamena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	5,5	6,5
Fanolamena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	5,5	6,5
Harandrato	FABACEAE	<i>Intsia</i>	<i>bijuga</i>	4,5	6
Fanolamena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	3,1	5
Meramavo	SARCOLAENACEAE	<i>Sarcolaena</i>	<i>delphinensis</i>	4,5	6
Fanolamena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	5	7
Harandrato	FABACEAE	<i>Intsia</i>	<i>bijuga</i>	7,5	25
Fanolafotsy	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>multiflora</i>	3,5	5
Zora	FLACOURTIACEAE	<i>Scolopia</i>	<i>orientalis</i>	5	5
Fotombavy	SARCOLAENACEAE	<i>Leptolaena</i>	<i>pauciflora</i>	5,5	12
Nofotrakoho	VERBENACEAE	<i>Vitex</i>	<i>grandidiana</i>	8,5	30
Fanolamena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	3,5	5
Meramavo	SARCOLAENACEAE	<i>Sarcolaena</i>	<i>delphinensis</i>	6	11
Fotombavy	SARCOLAENACEAE	<i>Leptolaena</i>	<i>pauciflora</i>	3	5
Fanolamena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	4	5
Fanolamena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	3,5	10
Zora	FLACOURTIACEAE	<i>Scolopia</i>	<i>orientalis</i>	4	6
Fanolamena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	6,5	15
Hazomainty	EBENACEAE	<i>Diopiros</i>	<i>lanceolata</i>	6,5	8
Fanolamena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	4	6
Roadria	ANONACEAE	<i>Ambavia</i>	<i>gerardii</i>	5,5	12
Fotombavy	SARCOLAENACEAE	<i>Leptolaena</i>	<i>pauciflora</i>	4	6
Falinandro be	LILIACEAE	<i>Dracaena</i>	<i>reflexa</i>	3,5	6
Fanolamena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	4	6,5
Voapaky	EUPHORBIACEAE	<i>Uapaca</i>	<i>thouarsii</i>	7,5	12
Zoramena	FLACOURTIACEAE	<i>Scolopia</i>	<i>erythrocarpa</i>	6,5	5
Hazomainty	EBENACEAE	<i>Diopiros</i>	<i>lanceolata</i>	7	9

Nofotrakoho	VERBENACEAE	<i>Vitex</i>	<i>grandidiana</i>	10	43
Falinandro be	LILIACEAE	<i>Dracaena</i>	<i>reflexa</i>	4	8
Rotry	MYRTACEAE	<i>Syzygium</i>	<i>emirnese</i>	7,8	18
Voapaky	EUPHORBIACEAE	<i>Uapaca</i>	<i>thouarsii</i>	5	6
Hazomainty	EBENACEAE	<i>Diopiros</i>	<i>lanceolata</i>	4,5	5
Mafotra	MYRSINACEAE	<i>Brochoneura</i>	<i>madagascariensis</i>	3,75	6
Falinandro be	LILIACEAE	<i>Dracaena</i>	<i>reflexa</i>	4,5	10
Mafotra	MYRSINACEAE	<i>Brochoneura</i>	<i>madagascariensis</i>	6,5	8
Fanolamena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	8,5	25
Mafotra	MYRSINACEAE	<i>Brochoneura</i>	<i>madagascariensis</i>	5	6
Voapaky	EUPHORBIACEAE	<i>Uapaca</i>	<i>thouarsii</i>	7	12
Nofotrakoho	VERBENACEAE	<i>Vitex</i>	<i>grandidiana</i>	6,5	10
Ampoly	RUTACEAE	<i>Vepris</i>	<i>elliotti</i>	7	6
Falinandro be	LILIACEAE	<i>Dracaena</i>	<i>reflexa</i>	4,5	7
Fotombavy	SARCOLAENACEAE	<i>Leptolaena</i>	<i>pauciflora</i>	6,5	11
Zambo	CLUSIACEAE	<i>Mammea</i>	<i>bongo</i>	3,5	6
Mafotra	MYRSINACEAE	<i>Brochoneura</i>	<i>madagascariensis</i>	4,5	13
Voapaky	EUPHORBIACEAE	<i>Uapaca</i>	<i>thouarsii</i>	7	15
Fanolamena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	4,5	8,5
Mafotra	MYRSINACEAE	<i>Brochoneura</i>	<i>madagascariensis</i>	5	10
Mafotra	MYRSINACEAE	<i>Brochoneura</i>	<i>madagascariensis</i>	4	10
Fotombavy	SARCOLAENACEAE	<i>Leptolaena</i>	<i>pauciflora</i>	5,5	8
Zora	FLACOURTIACEAE	<i>Scolopia</i>	<i>orientalis</i>	6	5
Fotombavy	SARCOLAENACEAE	<i>Leptolaena</i>	<i>pauciflora</i>	11	7
Fanolafotsy	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>multiflora</i>	6,5	5
Falinandrobe	LILIACEAE	<i>Dracaena</i>	<i>reflexa</i>	4,5	5
Ampoly	RUTACEAE	<i>Vepris</i>	<i>elliotti</i>	7	10
Zoramena	FLACOURTIACEAE	<i>Scolopia</i>	<i>erythrocarpa</i>	7	13
Fanola mena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	5	8
Roadria	ANONNACEAE	<i>Ambavia</i>	<i>gerardii</i>	6	7
Fotombavy	SARCOLAENACEAE	<i>Leptolaena</i>	<i>pauciflora</i>	5	6
Fanola mena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	5	7
Fanola mena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	4,5	5
Falinandrobe	LILIACEAE	<i>Dracaena</i>	<i>reflexa</i>	4,5	6
Maranitratoraky	CELASTRACEAE	<i>Elaeodendron</i>	<i>alluaudianum</i>	6	5
Mafotra	MYRSINACEAE	<i>Brochoneura</i>	<i>madagascariensis</i>	5,5	5
Tanatananala	RUBIACEAE	<i>Gaertnera</i>	<i>sp</i>	4	5
Voapaky	EUPHORBIACEAE	<i>Uapaca</i>	<i>thouarsii</i>	6,5	5
Sagnirambaza	SAPINDACEAE	<i>Macphersonia</i>	<i>radkoferi</i>	6	5
Roadria	ANONNACEAE	<i>Ambavia</i>	<i>gerardii</i>	5	11
Zoramena	FLACOURTIACEAE	<i>Scolopia</i>	<i>erythrocarpa</i>	5,5	5
Fanola mena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	5	6

Fotombavy	SARCOLAENACEAE	<i>Leptolaena</i>	<i>pauciflora</i>	7,5	10
Nofotrakoho	VERBENACEAE	<i>Vitex</i>	<i>grandidiana</i>	5,5	5
Fanolafotsy	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>multiflora</i>	6	6
Fanolafotsy	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>multiflora</i>	6	8
Fanolafotsy	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>multiflora</i>	5	6
Fanola mena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	5	6
Nofotrakoho	VERBENACEAE	<i>Vitex</i>	<i>grandidiana</i>	6,5	8
Mafotra	MYRSINACEAE	<i>Brochoneura</i>	<i>madagascariensis</i>	5,5	5
Falinandrobe	LILIACEAE	<i>Dracaena</i>	<i>reflexa</i>	5	5
Mafotra	MYRSINACEAE	<i>Brochoneura</i>	<i>madagascariensis</i>	7	8
Fanola mena	THEACEAE	<i>Asteropeia</i>	<i>micraster</i>	7,5	8
Fotombavy	SARCOLAENACEAE	<i>Leptolaena</i>	<i>pauciflora</i>	7,5	10
Mafotra	MYRSINACEAE	<i>Brochoneura</i>	<i>madagascariensis</i>	7,5	11

Tableau XIX: Listes des végétations rencontré dans la forêt dégradée

Famille	Genre	Espèce	Nom vernaculaire
RUTACEAE	<i>Vepris</i>	<i>elliotii</i>	Ampoly
FABACEAE	<i>Dalbergia</i>	<i>maritima</i>	Manaritoloho
EBENACEAE	<i>Diospyros</i>	<i>myriophylla</i>	Forofoky
BUXACEAE	<i>Buxus</i>	<i>madagascarica</i>	Maroando
SALINACEAE	<i>Ludia</i>	<i>antanossarum</i>	Zora
CLUSIACEAE	<i>Psorospermum</i>	<i>revolutum</i>	Harongampanihy
CELASTRACEAE	<i>Brexia</i>	<i>madagascariensis</i>	Voakarepoky
ASTERACEAE	<i>Psiadia</i>	<i>utilissima</i>	Dingadingana
POLYPODIACEAE	<i>Phymatodes</i>	<i>scolopendria</i>	Tanamolisy
SIMAROUBACEAE	<i>Quassia</i>	<i>indica</i>	Bemafaitry

Tableau XX: Modèle de Thornthwaite

THORNTHWAITE-TYPE MONTHLY WATER-BALANCE MODEL

(modified from Dingman 2001: ex. 7-13, Box 7-3 using ET model of Hamon (1963))

Input Data

Computed Values

Location:

Lat. = 48,0 degree

SOILmax = 10 mm

0,84 rad

Declination (deg)	-21,3	-13,3	-2,0	9,8	18,9	23,3	21,3	13,7	3,0	-9,0	-18,6	-23,3
Declination (rad)	-0,37	-0,23	-0,03	0,17	0,33	0,41	0,37	0,24	0,05	-0,16	-0,32	-0,41
DayLength (hr)*	8,6	10,0	11,7	13,5	15,0	15,8	15,4	14,1	12,4	10,6	9,1	8,2

*For lat. > 66.5, replace #NUM! with 24 in summer; 0 in winter.

WATER BALANCE

Temperatures in C, water-balance terms in mm.

Month:	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Year
=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
PPT	294	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	294
TEMP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
RAIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SNOW	294	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	294
PACK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
MELT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
INPUT (W _m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PET	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W - PET	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SOIL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ΔSOIL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
AET	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W-ET-ΔSOIL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tableau XXI : Données brutes des propriétés physiques

Station	Latitude	Longitude	Epaisseur (cm)	Couleur	Transition	Texture	Structure	Activité_Biologique	Enracinement_Nombre
RHB 2ans I	7238336	703901	27	Gris très foncé		Sablo-limoneuse	Massive non cohérent	Fourmis	Abondant
RHB 2ans I	7238336	703901	53	Brun	Passage brutal < 2 cm	Sablo-limoneuse	Massive non cohérent	Inexistante	Peu abondant
RHB 2ans I	7238336	703901	20	Brun foncé	Passage brutal < 2 cm	sableuse	Particulaire	Inexistante	Inexistant
RHB 2ans II	7238360	703947	80	Brun gris très foncé		sablo- limoneuse	compacte	Inexistante	Inexistante
RHB 2ansII	7238360	703947	20	Jaune brun	Passage brutal< 2cm	sableuse	particulaire	Inexistante	Inexistante
ZC	7238671	702222	20	Brun gris foncé		sablo-limoneuse	grumeleuse au niveau des racines	fourmis,cavités,galleries	nombreuse racines
ZC	7238671	702222	80	Gris clair	Passage net > 2cm	Sableuse	particulaire	Inexistante	racine peu abondant
FD	7236884	701804	25	Gris foncé		sablo- limoneuse	Massive non cohérent		nombreuse racines
FD	7236884	701804	75	Gris clair	Passage net > 2cm	sableuse	particulaire		très peu de racine
AJV	7236827	701836	15	Brun gris très foncé		Sablo-limoneuse	Massive non cohérent	galleries,fournis	racine abondants
AJV	7236827	701836	30	Brun foncé	Passage net	Sablo-limoneuse	particulaire		Inexistante
AJV	7236827	701836	55	Gris clair	passage brutal	Sableuse	particulaire		Inexistante
RHB 1an I	7238487	704815	26	Gris foncé		Sablo-limoneuse	particulaire	fourmis	racine peu abondant
RHB 1an I	7238487	704815	74	Brun jaune clair	Passage net > 2cm	sableuse	particulaire	Inexistante	Inexistante
RHB 1an II	7238526	704794	19	Brun foncé		Sablo-limoneuse	Compacte	Inexistante	Inexistante
RHB 1an II	7238526	704794	17	Gris rose	Passage net > 2cm	sableuse	particulaire	Inexistante	Inexistante
RHB 1an II	7238526	704794	29	Brun foncé	Passage net > 2cm	Sablo-limoneuse	Compacte	Inexistante	Inexistante
RHB 1an II	7238526	704794	35	Gris rose	passage brutal	sableuse	particulaire	Inexistante	Inexistante
RHB 1an III	S 24°57'23,7"	E 047°01'23,7"	25	Gris rose		Sablo-limoneuse	grumeleuse au niveau des racines	fourmis,cavités,galleries	racine peu abondant
RHB 1an III	S 24°57'23,7"	E 047°01'23,7"	21	Brun gris très foncé	passage brutal	Sablo-limoneuse	Compacte	Inexistante	racine peu abondant
RHB 1an III	S 24°57'23,7"	E 047°01'23,7"	54	Brun jaune	Passage net > 2cm	sableuse	particulaire	Inexistante	Inexistante
RHB 2ans III	S24°57'22,4"	E074°01'23,7"	73	Brun gris très foncé		Sablo-limoneuse	Compacte	Inexistante	Inexistante
RHB 2ans III	S24°57'22,4"	E 047°01'23,7"	27	Brun jaune	Passage net > 2cm	sableuse	particulaire	Inexistante	Inexistante
RHB 1an IV	S24°01'39,4"	E 047°01'39,4"	28	Brun gris très foncé		Sablo-limoneuse	Massive non cohérent	Inexistante	très peu de racine
RHB 1an IV	S24°01'39,4"	E 047°01'39,4"	72	Brun jaune	Passage net > 2cm	sableuse	particulaire	Inexistante	Inexistante

Tableaux XXII: Données brutes des propriétés chimiques

Station	Latitude	Longitude	pH	MO totale (%)	Humidité (%)
RHB 2ans I	7238336	703901	3,23	1,63	9,3
RHB 2ans I	7238336	703901	2,75	0,98	10,09
RHB 2ans I	7238336	703901	3,3	0,23	3,13
RHB 2ans II	7238360	703947	3,706	6,96	15,76
RHB 2ansII	7238360	703947	3,506	0	8,65
ZC	7238671	702222	4,2966	2,37	3,71
ZC	7238671	702222	4,1	0,18	2,07
FD	7236884	701804	3,5166	10,42	23,27
FD	7236884	701804	3,4433	0,11	4,82
AJV	7236827	701836	3,61	3,44	4,71
AJV	7236827	701836	3,6866	0,38	5,9
AJV	7236827	701836	3,6533	0	9,08
RHB 1an I	7238487	704815	4,64	1,15	1,55
RHB 1an I	7238487	704815	3,81	0	3,58
RHB 1an II	7238526	704794	3,34	0,83	2,26
RHB 1an II	7238526	704794	3,62	0	8,56
RHB 1an II	7238526	704794	3,06	1,39	1,15
RHB 1an II	7238526	704794	3,82	0	18,38
RHB 1an III	E 047°01'23,7"	S 24°57'23,7"	4,19	3,17	1,76
RHB 1an III	E 047°01'23,7"	S 24°57'23,7"	3,76	2,31	4,2
RHB 1an III	E 047°01'23,7"	S 24°57'23,7"	5,96	0,46	2,84
RHB 2ans III	E074°01'23,7"	S24°57'22,4"	3,87	6,41	18,94
RHB 2ans III	E 047°01'23,7"	S24°57'22,4"	3,41	0	3,51
RHB 1an IV	E 047°01'39,4"	S24°01'39,4"	3,1366	2,14	14,29
RHB 1an IV	E 047°01'39,4"	S24°01'39,4"	3,71	0,28	2,46

Tableau XXIII : Pourcentage en grain

Station	Latitude	Longitude	2.36mm(%)	1.18mm(%)	850µm(%)	600µm(%)	500µm(%)	425µm(%)	300µm(%)	212µm(%)	150µm(%)	125µm(%)	106µm(%)	90µm(%)	75µm(%)	45µm(%)	<45µm(%)	total	Masse refus(g)
RHB 2ans I	7238336	703901	0	1,174245	1,702262	6,081383	3,601545	6,543726	30,77206	29,93932	14,54278	2,750414	1,295085	0,701395	0,357265	0,252187	0,286337	100	380,67
RHB 2ans I	7238336	703901	0,369921	1,238716	2,313651	6,163462	4,621655	6,78282	30,24125	28,23257	14,55962	2,641215	0,999633	0,549704	0,338859	0,40663	0,540291	100	531,195
RHB 2ans I	7238336	703901	0,067511	3,258546	6,400072	13,16245	6,50585	8,805725	26,55895	21,66438	11,07185	1,804802	0,501834	0,009002	0,083264	0,054009	0,051759	100	444,37
RHB 2ans II	7238360	703947	0	2,163046	1,565693	4,017983	3,24771277	7,7435785	40,80234	27,22042	9,41931	1,622284	0,694816	0,421291	0,641368	0,201214	0,238941	100	318,07
RHB 2ansII	7238360	703947	0	0,190718	1,064153	5,1107	4,12670334	6,7359518	27,64864	27,129	17,16189	4,649106	1,923768	1,243815	0,9010775	1,542331	0,572155	100	361,79
ZC	7238671	702222	1,858773	3,443464	0,867095	2,571386	3,495789	9,787213	45,23596	22,68899	7,674291	1,181044	0,388698	0,22674	0,179399	0,229232	0,171924	100	401,34
ZC	7238671	702222	0	0,035604	0,255163	2,072949	3,016457	8,147401	42,92863	26,65559	12,53264	2,411188	0,860432	0,405491	0,17802	0,136482	0,363953	100	505,56
FD	7236884	701804	2,88022232	2,79308558	1,5237153	3,20050869	3,15811785	9,82290048	52,25378	16,704347	4,58056615	1,0903867	0,4568791	0,329707	0,3202864	0,445104	0,4403938	100	424,62
FD	7236884	701804	0	5,62550064	0,1314655	1,31220917	2,08632698	8,72808653	56,711161	17,816939	5,06417351	1,2584	0,5356455	0,264154	0,1296311	0,124739	0,2115677	100	817,705
AJV	7236827	701836	0	0,005887	0,245794	2,404957	3,736956	15,95749	63,47674	10,57946	2,394654	0,462152	0,166316	0,107443	0,09714	0,235492	0,12952	100	679,43
AJV	7236827	701836	0	0,040919	0,186592	1,66623	2,857798	11,88785	60,36565	16,82925	4,34562	0,937868	0,348632	0,148946	0,086749	0,103116	0,194775	100	610,96
AJV	7236827	701836	0	0,077543	0,286049	2,20568	3,170664	9,941067	53,76689	20,80921	6,437827	1,714571	0,680659	0,337745	0,191274	0,132685	0,248139	100	580,32
RHB 1an I	7238487	704815	0,17166095	1,733275557	2,9832339	6,62477917	5,5481484	6,89977001	22,689244	22,392587	19,5493484	6,2964568	2,4015866	1,404953	0,5899803	0,471651	0,2433252	100	600,02
RHB 1an I	7238487	704815	0	0,757462287	0,7959773	1,12549481	2,42858671	4,49983952	40,832353	31,100888	11,9781748	2,71317	1,4271959	0,798117	0,434364	0,515673	0,5927035	100	467,35
RHB 1an II	7238526	704794	0	6,42683234	5,0751406	7,34615062	3,90815213	5,19687684	18,021157	26,513307	19,9647385	4,2103938	1,4902191	0,789186	0,3652086	0,331626	0,3610108	100	238,22
RHB 1an II	7238526	704794	0	2,195675018	0,0202791	9,77822023	6,1298232	6,93177	22,03418	27,481887	19,9749276	3,2206921	0,9162473	0,379773	0,215696	0,366868	0,3539627	100	542,43
RHB 1an II	7238526	704794	0	2,12654652	4,1536973	8,78606367	5,21043133	7,13295493	26,143705	24,96665	15,3435694	3,2329785	1,1901337	0,606837	0,3478852	0,402814	0,3557323	100	382,31
RHB 1an II	7238526	704794	0	1,707716695	3,3781354	6,26740019	4,66891343	4,83409039	13,272768	13,135565	47,8160675	3,0930719	1,0776465	0,460897	0,1212186	0,103902	0,0626074	100	750,71
RHB 1an III	E 047°01'23,7" S 24°57'23,7"		0	0,4751208	0,5219865	0,80964463	0,55107459	0,92600074	18,988671	47,041807	23,4974709	3,4664426	1,4205142	1,082758	0,5850127	0,384622	0,2488728	100	618,79
RHB 1an III	E 047°01'23,7" S 24°57'23,7"		0	0,967054581	1,2555319	2,58154401	3,29782003	4,42550402	27,002131	33,991149	18,5838387	3,6797246	1,9259138	1,288313	0,6343222	0,21308	0,1540731	100	610,1
RHB 1an III	E 047°01'23,7" S 24°57'23,7"		0	0,656593407	2,8255495	8,43956044	4,94093407	6,66483517	23,18544	28,695055	21,1373626	2,6978022	0,4931319	0,122253	0,0521978	0,053571	0,0357143	100	728
RHB 2ans III	E074°01'23,7" S24°57'22,4"		4,90234426	4,078333203	3,9166601	7,7029388	4,44340139	5,91410467	24,576912	27,411406	12,845185	2,1173955	0,9100628	0,534564	0,2633706	0,19818	0,1851417	100	383,49
RHB 2ans III	E 047°01'23,7" S24°57'22,4"		0	0,781264031	2,2737477	6,14953573	5,3682717	6,44048923	23,281668	30,591426	19,8117782	3,2202446	1,0847896	0,526231	0,2316852	0,132905	0,1059645	100	556,8
RHB 1an IV	E 047°01'39,4" S24°01'39,4"		1,34233631	1,997282884	2,2608837	5,54981041	3,78368514	6,70965387	34,223493	26,678427	12,2716305	2,5163737	1,1132064	0,659002	0,3528195	0,273739	0,2676562	100	493,17
RHB 1an IV	E 047°01'39,4" S24°01'39,4"		0	1,367781155	2,6046944	5,95027018	5,71597433	7,72120905	31,640493	28,674856	12,816616	2,1361027	0,7809862	0,352499	0,1182033	0,056991	0,0633232	100	473,76

**Titre : «ETUDE DES RELATIONS PLANTE - SOL ET EAU DANS LE CADRE DE LA
REHABILITATION DU GISEMENT D'ILMENITE DE MANDENA A TOLAGNARO»**

Auteur: HARIFARABAKO Ismaelle Ainasoa

Nombre de page : 72

Nombre de tableaux : 23

Nombres de figures : 18

Email : ismaellei@yahoo.fr

Tel : +261331356326

Encadreur : Mme RAMBOLAMANANA Voahangy, Maître de conférences

RESUME

La réhabilitation fait partie des principaux engagements de Rio Tinto QMM dans le cadre de son projet d'exploitation d'ilménite à Tolagnaro. Le travail concerne surtout l'étude comparative du sol et de la végétation entre les sites réhabilités (Réhabilitation 2013 et réhabilitation 2014) et les sites de référence naturelle (la zone de conservation, la forêt dégradée et les milieux ouverts). Les paramètres étudiés pour chaque site sont les propriétés physico-chimiques (pH, matière organique, granulométrie, couleur, structure,...); la relation sol-végétation dont les inventaires de peuplements effectués ont permis de donner le taux de croissance des arbres (hauteur et DHP) des sites réhabilités et de la zone de conservation ; la relation sol-eau-végétation avec la détermination du bilan hydrique de la zone d'étude. Les résultats obtenus ont montrés que la réhabilitation effectuée par la société évolue positivement mais des améliorations et des travaux complémentaires s'imposent.

Mots clés : réhabilitation, sol, végétation, exploitation minière, profil pédologique

ABSTRACT

Rehabilitation is one of the main commitments of QMM as part of its ilmenite mining project in Tolagnaro. The work mainly concerns the soil and vegetation, and the study considered two (02) types of sites: rehabilitated natural sites (Rehabilitation 2013 and rehabilitation 2014) and reference sites (the conservation area, degraded forest and environments open). Parameters studied for each site are the physico-chemical properties (pH, organic matter, particle size, color, structure...); the soil-vegetation relationship that inventories stands have made it possible to give the vertical structure and diametric rehabilitated and conservation area sites soil-water-vegetation relationship with the determination of the water balance of the study area. The results have shown that the rehabilitation carried out by the company evolves positively but improvements and additional work is required.

Keywords: rehabilitation, soil, vegetation, mining, soil profile