



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DEPARTEMENT DES EAUX ET FORETS

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur
en Sciences Agronomiques, option Eaux et Forêts
Promotion AMBIOKA (2008-2013)

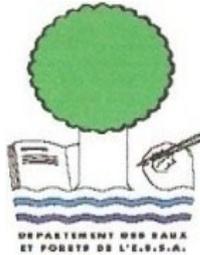
EVOLUTION PEDOLOGIQUE ET BIOLOGIQUE DES
SITES REHABILITES A AMBATOVOY

Présenté par : **ANDRINIELA Noro Idéalisoa**

Soutenu la date du : 05 Juin 2013

Devant le jury composé de :

Président : Pr. Bruno Salomon RAMAMONJISOA
Encadreur : Pr. Jean-Chrysostome RANDRIAMBOAVONJY
Examineurs : Mr Angelo Fanomezana RAZAFIMAMONJY
Pr. Gabrielle Lalanirina RAJOELISON



**Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur
en Sciences Agronomiques, option Eaux et Forêts**

Promotion : AMBIOKA (2008-2013)



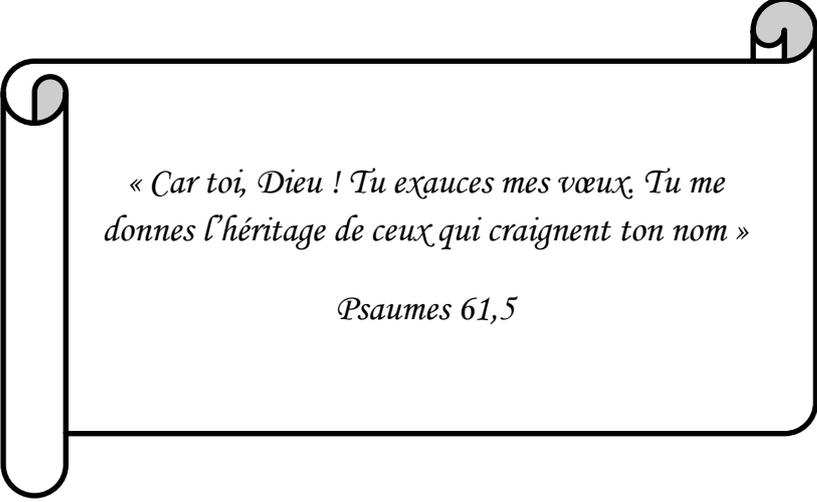
Présenté par : **ANDRINIELA Noro Idéalisoa**

Soutenu la date du : 05 Juin 2013

Devant le jury composé de :

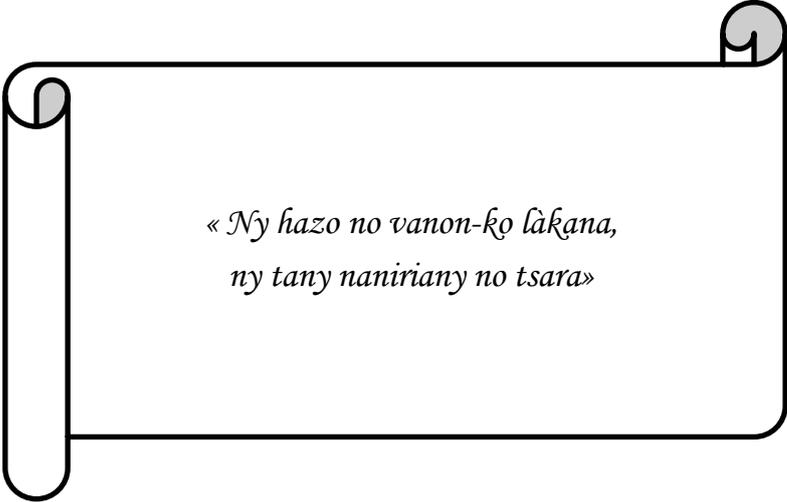
Président	: Pr. Bruno Salomon RAMAMONJISOA	(Département des Eaux et Forêts, ESSA)
Encadreur	: Pr. Jean-Chrysostome RANDRIAMBOAVONJY	(Département des Eaux et Forêts, ESSA)
Examineurs	: Mr Angelo Fanomezana RAZAFIMAMONJY	(RestEco, Environment Department, AMSA)
	Pr. Gabrielle Lalanirina RAJOELISON	(Département des Eaux et Forêts, ESSA)





*« Car toi, Dieu ! Tu exauces mes vœux, Tu me
donnes l'héritage de ceux qui craignent ton nom »*

Psaumes 61,5



*« Ny hazo no vanon-ko lâkana,
ny tany naniriany no tsara »*

A tous les miens ...

REMERCIEMENTS

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre du projet de réhabilitation de la Société Ambatovy.

Au terme de ce travail, qu'il me soit permis d'exprimer ici toute ma gratitude à DIEU TOUT PUISSANT grâce à sa bénédiction, sans quoi rien n'a pu être accompli. J'aimerais également adresser mes vifs remerciements à toutes les personnes qui d'une façon ou d'une autre, ont bien voulu apporter leur soutien pour la réalisation de ce mémoire. Ma reconnaissance va particulièrement à :

- ☞ *Monsieur RAMAMONJISOA Bruno Salomon, Professeur d'Enseignement Supérieur et de Recherche, Chef de département des Eaux et Forêts-ESSA, pour l'honneur qu'il a fait de présider le mémoire ;*
- ☞ *Monsieur RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrystostome, Professeur d'Enseignement Supérieur et de Recherche, Chef de l'Unité de Formation et de Recherche Eaux et Sols, qui, malgré ses nombreuses préoccupations, m'a donné le privilège d'être encadrée de manière exemplaire ;*
- ☞ *Monsieur RAZAFIMAMONJY Angelo, Superviseur de la restauration écologique au sein d'Ambatovy Minerals Société Anonyme, pour sa confiance en m'accueillant pour accomplir cet étude, pour son encadrement et ses contributions inestimables à la réalisation de la recherche et surtout d'avoir accepté de siéger parmi les membres de jury ;*
- ☞ *Madame RAJOELISON Gabrielle Lalairina, Professeur d'Enseignement Supérieur et de Recherche, Chef de l'Unité de Formation et de Recherche Sylviculture et Aménagement, pour ses conseils et suggestions dans la réalisation de ce mémoire et qui nous a fait l'honneur de siéger parmi les membres de jury ;*
- ☞ *Monsieur ANDRIANAIVOMAHÉFA Paul, Surintendant du département Environnement de la société Ambatovy, d'avoir donné son accord pour l'organisation des travaux de recherche ainsi que les descentes sur terrain y afférents;*
- ☞ *Madame RAZAFY Fara Lala, Enseignante au sein du Département des Eaux et Forêts, pour son appui ainsi que ses conseils dans la réalisation et l'organisation du stage avec la société Ambatovy ;*
- ☞ *Madame RAZAKAFONIAINA Minombolanoro, Directeur Général de l'ANAE (Association Nationale d'Actions Environnementales) et son équipe, pour leur collaboration durant l'accomplissement du stage ;*
- ☞ *Toute l'équipe du Département Environnement de la société Ambatovy, en particulier l'équipe Restauration Ecologique, pour leur disponibilité ainsi que leur renfort lors des travaux de terrain;*
- ☞ *Henry CHARLINE, doctorante de l'IRD à Ambatovy, pour ses conseils concernant la partie microbiologie ;*
- ☞ *Tous les enseignants au sein de l'ESSA qui ont forgé au cours de notre cursus de formation. Ces pages sont le fruit de tout ce qu'ils nous ont transmis et enseigné ;*
- ☞ *Responsables des laboratoires de recherche (FOFIFA et CNRF) pour leur collaboration, d'avoir accepté tout entretien et de m'avoir donné les documents et les explications nécessaires ;*
- ☞ *Ma famille pour son appui, son amour ainsi que sa confiance en moi ;*
- ☞ *Tous les amis et collègues, qui de près ou de loin, ont apporté leur soutien.*

Que Dieu vous bénisse !!!

☞ Ialy

PRESENTATION DU PARTENAIRE



Ambatovy est une exploitation minière de nickel et de cobalt de longue durée de vie et de grand volume de production, implantée à Madagascar. Avec un investissement total d'environ 6,3 milliards de dollars, Ambatovy constitue le plus grand investissement étranger jamais effectué dans le pays et l'un des plus grands en Afrique sub-saharienne et dans l'Océan Indien. Le démarrage des activités d'exploitation est lancé en 2012. Une fois pleinement opérationnel, il va produire 60.000 tonnes de nickel raffiné, 5.600 tonnes de cobalt, et 210.000 tonnes d'engrais de sulfate d'ammonium par an. Ambatovy est positionné pour être parmi les plus grandes mines de nickel latéritique au monde. Les opérations d'Ambatovy débutent à la Mine, près de la ville de Moramanga, qui se situe à 80 km vol d'oiseau à l'est d'Antananarivo, la capitale de Madagascar. La pulpe de minerai latéritique est acheminée par un Pipeline de 220 km de la Mine vers l'Usine de transformation près de Toamasina sur la côte Est de Madagascar.

La Mine d'Ambatovy est située au cœur de l'une des régions particulièrement riches en espèces, dans l'extrémité sud de ce qui reste du Corridor Forestier de l'Est. Ainsi, Ambatovy a élaboré des politiques socio-environnementales dont l'objectif est d'éviter toute perte nette, mais de préférence un gain net, pour la biodiversité tout en garantissant des bénéfices socio-économiques pour les populations locales.

En tant que compagnie minière responsable, Ambatovy s'est engagée à respecter des normes environnementales exigeantes dont les Principes de l'Équateur et les Normes de Performance de la Société Financière Internationale du Groupe de la Banque Mondiale. Dans le souci de remplir et dépasser ces exigences et ces engagements, Ambatovy a développé une approche globale de gestion de l'environnement qui permettra d'assurer l'application des normes en vigueur, la réduction des impacts résiduels, et l'atténuation des risques. Ambatovy assure simultanément, la mise en œuvre d'un programme pionnier et de classe internationale de compensation de la biodiversité. Il travaille en étroite collaboration avec l'organisme Malagasy de régulation, l'Office National pour l'Environnement (ONE), qui doit approuver tous les plans environnementaux préalablement à leur mise en œuvre.

Des mesures d'atténuation, ainsi que des systèmes de suivi rigoureux, garantissent des niveaux d'impact acceptables. Les zones exploitées par Ambatovy sont réhabilitées progressivement et verra une forêt de remplacement pour la restauration des écosystèmes. Le bruit, l'air, l'eau, la qualité des sols et la biodiversité sont continuellement évalués.

Résumé

Dans le cadre de son projet de réhabilitation, Ambatovy a besoin des indicateurs lui permettant d'évaluer la réussite des essais de réhabilitation qu'il entreprend. Ces indicateurs concernent surtout la végétation et le sol. Sur le plan pédologique, l'étude considère les trois (03) catégories de sites : le site miné servant d'état zéro, les sites réhabilités et la zone de conservation qui fait l'objet de l'objectif optimal à atteindre. Pour chaque site, les paramètres d'évolution étudiés sont les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols et les caractéristiques de la végétation. Concernant l'étude des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols, le procédé consiste à un examen du profil pédologique de chaque site dans une fosse pédologique de 1mx1mx1m, des analyses de sols en laboratoire et un inventaire de la pédofaune dans des minifosses de 25cmx25cmx30cm. En ce qui concerne l'étude des caractéristiques de la végétation, un inventaire floristique a été effectué dans des placettes de 10mx10m au niveau de chaque site d'étude. Pour les analyses des sols en laboratoire, l'analyse pédologique est faite auprès du laboratoire d'analyse de la FOFIFA; tandis que l'analyse microbiologique auprès de celui du CNRE. Six (06) répétitions ont été effectuées pour chaque site afin d'assurer la représentativité de l'échantillonnage. Pourtant en raison du coût élevé des analyses, les échantillons appartenant au même site qui sont destinés aux analyses en laboratoire sont mélangés afin d'en préparer un seul échantillon. Après la présentation des observations de terrain et de la démarche méthodologique, les résultats de chaque paramètre étudié sont comparés et discutés. Tous les sols des sites d'étude se caractérisent par une acidité élevée ($pH_{eau} < 5,5$), une faible teneur en bases échangeables et un rapport C/N satisfaisant à part la zone de conservation azonale. L'analyse des propriétés physico-chimiques a permis de classer les sols étudiés en trois (03) types : *sol ferrallitique rouge-jaunâtre* (oxisol) pour la zone de conservation zonale, *sol pisolitique* (intergrade ultisol-oxisol) pour la zone de conservation azonale et *sol ferrallitique rajeuni* (ultisol) pour les sites réhabilités ainsi que le site miné. La répartition de la pédofaune dans ces sites, tout comme la biomasse microbienne, est proportionnelle à l'état de la végétation qu'ils supportent. Du point de vue floristique, la zone de conservation est caractérisée par une forêt dense humide, les sites réhabilités par une plantation stratifiée alors que le site miné ne comporte aucune végétation. Il a été constaté que parmi les deux types de sites réhabilités, c'est le plus âgé (âge de réhabilitation égal à 3ans) qui possède les meilleures propriétés tant vis-à-vis des éléments hypogées que épigées. Par le biais de la présente étude, les résultats obtenus ont permis de déduire que les sols des sites réhabilités ont vraiment des bonnes propriétés physico-chimiques et biologiques par rapport à ceux des sites récemment exploités et qu'avec le temps, cette évolution tendrait vers l'état de référence naturel.

Mots-clés : sol, réhabilitation, Ambatovy, pédologie, pédofaune, microbiologie.

Abstract

As part of its rehabilitation project, Ambatovy needs indicators in order to assess the success of rehabilitation trials undertaken. These indicators relate mainly vegetation and soil. About soil, the study considers three (03) categories of sites: the mined sites, the rehabilitated sites and the conservation area which is the subject of the optimal goal to achieve. For each site, a physico-chemical analysis of soil, an inventory of soil fauna and analysis of soil samples in the laboratory are performed. The analysis of physical characteristics is performed by examining the soil profile at each site in a soil pit of 1mx1mx1m. For the inventory of soil fauna, we conducted a count of macrofauna and mesofauna. And for laboratory analysis, soil analysis is made to the analytical laboratory FOFIFA; but microbiological analysis with that of the CNRE. Six (06) repetitions were performed for each site to ensure the representativeness of the sample. Yet because of the rise in the cost of analysis, the samples belonging to the same site which is intended for laboratory analysis are mixed to prepare a single sample. After the presentation of field observations and the methodology, the results of the physical, chemical and biological analysis are compared and discussed for each site. All soil study sites are characterized by high acidity (pH <5.5), low in exchangeable bases and a C / N satisfying hand area azonal conservation report. Analysis of physico-chemical properties were classified in three soils studied (03) types ferralitic yellowish red soil (oxisol) for the zonal area conservation pisolithic soil (Ultisol-intergrade oxisol) for the conservation area azonal and rejuvenated ferralitic soil (ultisol) for rehabilitated sites and the mined site. The conservation area is characterized by dense rainforest, sites rehabilitated by planting a stratified while undermined website contains no vegetation. The distribution of soil fauna in these sites is proportional to the vegetation, as well as microbial biomass. It was found that among the two types of rehabilitated sites is the oldest (age rehabilitation equal to 3 years), which has the best as physico-chemical and biological properties. Through this study, the results could deduce that the soils of rehabilitated sites have really good physico-chemical and biological properties compared to those recently harvested sites and with time, this evolution would tend towards natural baseline.

Key words: soil, rehabilitation, Ambatovy, pedofauna, pedology, microbiology.

Famintinana

Ao anatin'ny tetikasa fanarenana kasainy hatao, ny orinasa Ambatovy dia mamantatra ireo tondromarika izay hahafahany manao tombana ny fahombiazan'ny andram-panarenana ataony. Ireo tondromarika ireo dia mahakasika indrindra ny zavamaniry sy ny tany. Eo amin'ny lafiny tany, sokajy toerana telo no ifantohan'ny fikarohana: ireo toerana voatrandraka, ireo toerana narenina ary ireo faritra arovana manokana izay raisina ho tanjona trararina. Ho an'ny sokajy toerana tsirairay, ny fikarohana dia nifantoka tamin'ny endrika ivelany sy anatin'ny tany: ny zavamaniry eo aminy, ny bibikely ao aminy ary ireo fandalinana manokana natao tany amin'ireo ivotoerana fanaovana fitiliana. Ny fanadihadiana ny kalitaon'ny tany amin'ny ivotoerana tsirairay dia natao tamina lavaka miendrika goba, mirefy iray metatra toratelo(1m³). Ny fanisana ny zavamaniry dia notanterahina tao amin'ny santionan-toerana maromaro mirefy 10mx10m. Ny fanisana ny bibikely kosa dia notanterahina tamina lavaka kely enina isaky ny sokajy toerana izay mirefy 25mx25mx30m isany. Ny fitiliana ireo santionan-tany dia natao tany amin'ny toeram-pitilian'ny FOFIFA sy ny CNRE. Mahakasika izany dia santionan-tany enina isaky ny sokajy toerana no nalaina mba hahazoana antoka ny fahamarinan'ny valim-pikarohana. Kanefa noho ny fahalafosan'ny vidim-pitiliana dia nafangaro ireo santionan-tany avy amin'ny sokajy toerana iray ary nandajàna santionan-tany iray monja tamin'ny efa voafangaro. Ireo valim-pikarohana isankarazany azo tamin'ny sokajy toerana telo dia nampitahaina ary novoaboasana. Hita araka izany fa ny sokajy toerana tsirairay dia samy manana tahanà asidra ambony avokoa, kely ny tahan'ireo singa mpamono asidra fa saingy amin'ny tokony ho izay kosa ny fifandanjan'ny karbona sy ny azota ao anaty tany (ankoatry ny toerana arovana mamatovato). Araka izany dia azo sokajiana ho telo ny karazan-tany nanaovana ny fikarohana dia ireo karazan-tany antsoina hoe: « *sol ferralitique rouge-jaunâtre* » (na « *oxisol* ») ho an'ny toerana arovana sokajy voalohany, « *sol pisolitique* » (manelanelana ny « *ultisol* » sy ny « *oxisol* ») ho an'ny toerana arovana sokajy faharoa ary « *sol ferralitique rajeuni* » (na « *ultisol* ») ho an'ireo toerana voatrandraka sy ireo toerana arenina. Ireo toerana arovana dia miavaka noho ny fisian'ny ala mikitroka eo aminy, ala novolena nampanarahina izany kosa no eo amin'ireo ny toerana arenina raha tsy ahitàna zavamaniry mihitsy ireo toerana voatrandraka. Voamarina koa fa mifandanja amin'ny ala eo amin'ny sokajy toerana tsirairay avy ny tahan'ny bibikely ao anatin'ny tany. Tsapa fa amin'ireo toerana arenina roa karazany dia ilay maharitra kokoa (narenina nanomboka tamin'ny telo taona lasa) no tsara kalitao kokoa amin'ny lafiny rehetra mihoatra amin'ilay narenina vao haingana (narenina nanomboka tamin'ny taona lasa). Tamin'ny alalan'ity fikarohana ity, ireo vokatra azo dia ahafahana milaza fa ny tany narenina dia mivoatra ary tsara kalitao mitaha amin'ny tany voatrandraka ary izany fivoarany izany dia mihatsara kokoa miaraka amin'ny fotoana ary mety hanantona ny tanjona trararina dia ny voajanahary.

Teny fototra: tany, fanarenana, Ambatovy, pedolojia, bibikely anaty tany, mikrobiolojia.

Table des matières

REMERCIEMENTS	i
PRESENTATION DU PARTENAIRE.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract	iv
Famintinana.....	v
Table des matières	vi
Liste des figures.....	ix
Liste des cartes.....	ix
Liste des tableaux.....	x
Liste des photos.....	x
Glossaire.....	xi
Acronymes.....	xiv
Partie 1. Introduction	1
Partie 2. Méthodologie	3
1 Présentation de la zone d'étude	3
1.1 Milieu physique	3
1.2 Milieu biologique.....	7
1.3 Milieu humain	8
1.4 Milieu d'étude proprement dit	10
2 Problématique et hypothèses.....	13
2.1 Contexte général	13
2.2 Objectifs principaux.....	15
2.3 Problématique.....	15
2.4 Hypothèses.....	16
3 Démarche globale	17
3.1 Phase préparatoire.....	17
3.2 Phase de collecte de données.....	17
3.3 Phase de traitement et d'analyse des données	18
3.4 Phase de synthèse et de rédaction	19
4 Démarche spécifique à chaque hypothèse	19
4.1 Hypothèse 1 : Les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols des sites réhabilités évoluent vers celles de la forêt naturelle.....	19

4.2	Hypothèse 2 : Les caractéristiques de la végétation sur sites réhabilités évoluent vers celles de la forêt naturelle.....	27
5	Cadre opératoire	29
6	Schéma récapitulatif de la méthodologie	31
7	Contraintes méthodologiques.....	32
7.1	Problème lié à la collecte des données	32
7.2	Problème lié à l'analyse et traitement des données.....	32
7.3	Problème lié à l'échelle spatio-temporelle	32
Partie 3. Résultats et interprétations.....		33
1	Evolution des propriétés du sol.....	33
1.1	Sur le plan physico-chimique	33
1.2	Selon l'activité biologique	38
1.3	Conclusion partielle.....	43
2	Evolution des caractéristiques de la végétation	44
2.1	Composition floristique	44
2.2	Structure totale	44
2.3	Structure verticale.....	45
2.4	Relation sol - végétation.....	46
2.5	Conclusion partielle.....	47
Partie 4. Discussions et recommandations		48
1	Discussions sur les résultats	48
1.1	Propriétés physico-chimiques et biologiques des sols.....	48
1.2	Particularité de la végétation	50
2	Discussions sur les hypothèses	51
3	Discussions sur la fiabilité de l'étude	52
3.1	Résultats des analyses en laboratoires : écarts-type non connus	52
3.2	Une recherche ponctuelle: insuffisante pour déterminer une information essentielle... ..	52
4	Recommandations et perspectives.....	52
4.1	Valorisation des acquis.....	52
4.2	Promotion des travaux de recherche complémentaires	53
Partie 5. Conclusion générale.....		55
Références.....		57
<i>Bibliographie</i>		57
<i>Webiographie</i>		59
<i>Autres sites internet</i>		60
<i>Cours professés</i>		60

ANNEXES	I
1 Schéma récapitulatif des résultats	I
2 Le traitement de réhabilitation T3+TS	II
3 Propriétés physiques des sites d'étude.....	III
3.1 ZC Zonale.....	III
3.2 ZC Azonale.....	IV
3.3 Zone rehab 3ans : Berano	V
3.4 Témoin nu 3ans.....	VI
3.5 Zone rehab 1an /PK5.....	VII
3.6 Site miné.....	VIII
4 Analyses physico-chimiques en laboratoire.....	VIII
4.1 Mode opératoire (FOFIFA, 2013)	VIII
4.2 Résultats des analyses.....	XVIII
5 Analyses microbiologiques.....	XIX
5.1 Méthodes d'analyses (CNRE, 2013)	XIX
5.2 Résultats des analyses.....	XXIII
6 Données floristiques	XXIV
6.1 Liste des espèces inventoriées par site d'étude.....	XXIV
6.2 Structure totale	XXVI
6.3 Structure verticale.....	XXVI
7 Traitement statistique sur la pédofaune.....	XXVI
7.1 Données d'inventaire	XXVI
7.2 Analyse de la variance.....	XXVIII
8 Classification taxonomique de la pédofaune	XXX
9 Clé de détermination de la pédofaune	XXXI
10 Rôle de la pédofaune (Courrier de l'environnement de l'INRA n°49, juin 2003)	XXXVII
11 Classification de la macrofaune suivant leur fonction trophique	XXXVIII
12 Chronogramme des activités	XXXVIII
13 Différentes cartes illustratives sur la zone d'étude.....	XXXIX

Liste des figures

Figure 1: Courbe ombrothermique d'Ambatovy.....	4
Figure 2: Processus de la pédogenèse	14
Figure 3: Prélèvement d'échantillons de sol pour l'extraction	24
Figure 4: Inventaire floristique par compartimentation	28
Figure 5: Schéma récapitulatif de la démarche méthodologique.....	31
Figure 6: Structure des horizons selon leur profondeur	33
Figure 7: Différence de profil entre site réhabilité et site non réhabilité	34
Figure 8: Granulométrie de chaque site	34
Figure 9: pH eau dans chaque site	35
Figure 10: Rapport C/N dans chaque site	35
Figure 11: Teneur en Phosphore assimilable dans chaque site d'étude.....	36
Figure 12: Teneur en bases échangeables des deux horizons	37
Figure 13: Répartition de la pédofaune selon les sites d'étude (pourcentage).....	38
Figure 14: Box plots de la densité selon les sites	39
Figure 15: Variation de la densité selon les strates	40
Figure 16: Moyennes des coefficients normalisés de la densité selon les Ordres.....	40
Figure 17: Moyennes des coefficients normalisés de l'effectif selon les classes de taille	41
Figure 18: Activité de la biomasse microbienne totale par site.....	42
Figure 19: Densité sporale moyenne de chaque site	43
Figure 20: Structures diamétriques selon les sites d'étude	44
Figure 21: Structure diamétrique spécifique de la zone de conservation	45
Figure 22: Structure verticale selon les sites d'étude	45
Figure 23: Relation propriétés du sol et végétation pour chaque site	46
Figure 24: Relation sol-végétation: contraste site réhabilité et site non réhabilité	47
Figure 25: Densité de pédofaune par site pour 0 à 30cm de profondeur	51
Figure 26: Schéma récapitulatif des résultats.....	l
Figure 27: Clé de détermination de la pédofaune	XXXI
Figure 28: Les principaux représentants de la macrofaune du sol	XXXVI

Liste des cartes

Carte 1: Localisation d'Ambatovy.....	3
Carte 2: Relation végétation-topographie-sol d'Ambatovy (<i>Source : Projet Ambatovy, 2006</i>)	XXXIX
Carte 3: Carte hydrologique d'Ambatovy	XXXVII
Carte 4: Classification des sols dans le site de la mine.....	XXXVIII
Carte 5: Présentation générale de la zone d'étude.....	XXXIX

Liste des tableaux

Tableau 1: Moyenne mensuelle de 2006 à 2012	4
Tableau 2: Données démographiques	8
Tableau 3: Sources de revenu de la population locale	9
Tableau 4: Les méthodes utilisées pour les analyses physico-chimiques en laboratoire	23
Tableau 5: Quantification des sites d'étude, des strates et des classes de taille	26
Tableau 6: Les ordres de pédofaune et leur classe de taille correspondante	26
Tableau 7: Méthodes d'analyses en laboratoire.....	27
Tableau 8: Calcul de la densité.....	28
Tableau 9: Classification des types de sol des sites d'étude	37
Tableau 10: Répartition de la pédofaune.....	38
Tableau 11: Taux en actinomycètes et en azotobacter de chaque site.....	42
Tableau 12: Liste des Familles dominantes dans chaque site.....	44
Tableau 13: Illustration de la Stratification horizontale par type de traitement.....	II
Tableau 14: Illustration de la stratification verticale par type de traitement.....	II
Tableau 15: Profil pédologique de la zona de conservation zonale.....	III
Tableau 16: Profil pédologique de la zone de conservation azonale.....	IV
Tableau 17: Profil pédologique de la zone réhabilité de 3ans	V
Tableau 18: Profil pédologique du témoin non réhabilité de 3ans	VI
Tableau 19: Profil pédologique de la zone réhabilité de 1an	VII
Tableau 20: Récapitulation de la physico-chimie des sites d'étude	XVIII
Tableau 21: Activité de la biomasse microbienne totale pour chaque site.....	XXIII
Tableau 22: Structure des communautés mycorhyziennes du sol	XXIII
Tableau 23: Densité moyenne selon les classes de diamètre	XXVI
Tableau 24: Densité moyenne selon les classes d'hauteur.....	XXVI

Liste des photos

Photo 1: Forêt zonale d'Ambatovy	10
Photo 2: Forêt azonale d'Ambatovy.....	10
Photo 3: Site décapé sans extraction de minerais	11
Photo 4: Fosse minière.....	11
Photo 5: Plateforme de réhabilitation pour 2015 (24ha)	11
Photo 6: Parcelle d'essai de réhabilitation de Berano (3ans)	12
Photo 7: Parcelle d'essai de réhabilitation du water-pomp Mangoro (1an)	12
Photo 8: Parcelle témoin à Analamay (3ans)	12
Photo 9: Extraction de la pédofaune par la méthode de Berlèse-Tullgren.....	25
Photo 10: Profil pédologique de la zone de conservation zonale.....	III
Photo 11: Profil pédologique de la zone de conservation azonale.....	IV
Photo 12: Profil pédologique de la zone réhabilitée de 3ans	V
Photo 13: Profil pédologique du témoin nu de 3ans	VI
Photo 14: Profil pédologique du site réhabilité de 1an	VII
Photo 15: Profil pédologique du site miné.....	VIII

Glossaire

Acidification : Diminution du potentiel de neutralisation de l'acide de l'eau ou de la saturation en bases du sol découlant de processus naturels ou anthropiques. L'acidification s'exprime par une réduction du pH, ce qui peut avoir une incidence néfaste sur la vie aquatique (EIE Ambatovy, 2006).

Alcalinité : Capacité d'un milieu aqueux de neutraliser un acide. Elle est fonction des concentrations de carbonates, bicarbonates et hydroxydes et, dans une moindre mesure, de borates, silicates, phosphates et matières organiques. L'alcalinité s'exprime en équivalent de carbonate de calcium. Le pH, la composition minérale, la température et la force ionique ont une incidence sur l'alcalinité. Cette dernière est toutefois normalement exprimée en termes de carbonates, de bicarbonates et d'hydroxydes. L'alcalinité totale est la somme des concentrations de ces trois substances (EIE Ambatovy, 2006).

Biomasse : c'est le poids frais d'une espèce donnée par m² de terre (CHAUSSOD., 2001).

Caractéristiques du sol : Ce sont des paramètres uniques observables ou mesurables sur le terrain ou au laboratoire, ou qui peuvent être analysés par microscopie. Ils comprennent des caractéristiques telles que la couleur, la texture et la structure du sol, les manifestations de l'activité biologique, la disposition des vides et des concentrations pédogéniques (taches, cutanes, nodules, ...) aussi bien que des déterminations analytiques (réaction du sol, distribution granulométrique, capacité d'échange cationique, cations échangeables, quantité et nature des sels solubles, ...) (FAO, ISRIC et AISS, 1999).

Climat : Mesure des moyennes climatiques à long terme, c'est-à-dire normales des principales variables météorologiques telles que la température, les précipitations et le vent (EIE Ambatovy, 2006).

Cuirasse ferrallitique : Conglomérat composé de sable et de gravier cimentés en une masse solide par des oxydes de fer produits par l'oxydation de solutions de sels de fer en percolation (EIE Ambatovy, 2006).

Diversité spécifique : nombre des espèces des organismes recensés par m² (CHOTTE et al, 2001).

Etat zéro/ site miné : la signification du terme « état-zéro » est diverse mais pour la présente étude, c'est l'état pris comme point de départ d'un processus de revégétalisation. Il s'agit du site récemment exploité qui n'a pas encore subi un procédé de restauration forestière et que la zone est encore dénudée.

Forêt de transition : Zone de transition entre la forêt azonale du site de la mine Ambatovy et la forêt zonale (typique) d'altitude moyenne des environs (EIE Ambatovy, 2006).

Horizons du sol : Ce sont des entités pédologiques tridimensionnelles plus ou moins parallèles à la surface du sol. Chaque horizon possède une ou plusieurs propriétés, présentes sur une certaine profondeur, qui le caractérisent et permettent de le reconnaître. L'épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs mètres; la plupart du temps elle est de quelques décimètres. Les limites supérieure et inférieure ('transitions') sont plus ou moins claires, plus ou moins progressives ou abruptes. Latéralement, l'extension d'un horizon de sol varie grandement, allant d'un mètre à plusieurs kilomètres. Cependant, un horizon de sol n'est jamais infini. Latéralement, il disparaît ou se transforme en un autre horizon (FAO, ISRIC et AISS, 1999).

Latérite : Sol formé d'un groupe de minéraux dérivés de l'altération d'un type de roche ultrabasique. Il comprend tout le profil du sol, de la surface à la roche mère non altérée et est subdivisé en trois zones distinctes, soit, de haut en bas, la cuirasse ferrallitique, la ferralite et la saprolite (EIE Ambatovy, 2006).

Litière : Inclut toute la biomasse morte de diamètre inférieur à un diamètre minimum choisi par le pays (10 cm, par exemple), à divers stades de décomposition, et située au-dessus du sol minéral ou organique. Ceci inclut la litière, les couches fumiennes et humiques. Les racines vivantes minces (inférieures au diamètre minimum suggéré pour la biomasse souterraine) sont incluses dans la litière lorsqu'on ne peut pas les distinguer empiriquement de la litière). (GIEC, 2003)

Matières organiques du sol : Inclut le carbone organique dans les sols minéraux et organiques (y compris la tourbe) à une profondeur spécifiée choisie par le pays et utilisée avec cohérence dans la série temporelle. Les racines vivantes minces (inférieures au diamètre suggéré pour la biomasse souterraine) sont incluses dans les matières organiques du sol lorsqu'on ne peut pas les distinguer empiriquement. (GIEC, 2003)

Microbiologie : c'est une sous-discipline de la biologie consacrée à l'étude des micro-organismes.

PCA : est un milieu utilisé pour le dénombrement des microorganismes aérobies revivifiables, aussi nommés FMAR (Norme AFNOR NF T 90-401 et 402). C'est un milieu nutritif sans inhibiteurs, dont l'intérêt est de favoriser le développement à 30 °C de tous les micro-organismes qu'on y a déposés. L'ensemble de tous les micro-organismes s'appelle la flore totale. (<http://fr.wikipedia.org>)

Propriétés du sol : Ce sont des combinaisons de caractéristiques de sol dont on sait qu'elles se rencontrent dans les sols et que l'on considère comme étant indicatives des processus de formation actuels ou anciens (par exemple, les propriétés vertiques, qui combinent une texture lourde, une minéralogie smectitique, des faces de glissement, une consistance dure à l'état sec, et collante à l'état humide, une rétraction à l'état sec et un gonflement à l'état humide) (FAO, ISRIC et AISS, 1999).

Réallocation (ou réaffectation) : Il s'agit d'un terme général décrivant les actions conduisant à assigner à un écosystème dégradé, une biodiversité, un fonctionnement et un usage nouveau sans

rapport écologique avec l'écosystème avant dégradation. Ces usages nouveaux englobent la transformation pour l'agriculture et la foresterie industrielle comprenant un objectif unique de production de bois. Il s'agit également, par exemple, de la création d'une zone humide dans une gravière abandonnée (WWF, 2004).

Restauration écologique : pour l'Union mondiale de la Nature (UICN) et la Society for Ecology Restoration (SER), " la restauration écologique est un procédé qui permet d'assister le rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit» (WWF, 2004). Elle désigne selon le National Research Council US (1992) "la remise dans un état initial défini, considéré comme "naturel", d'un système perturbé par l'activité humaine".

Restauration forestière : définie comme un processus à long terme comprenant des colonisations, interventions et extinctions. Elle vise à aider les processus naturels de rétablissement de la forêt en faisant en sorte que la composition spécifique, la structure du peuplement, la biodiversité, les fonctions et la dynamique de la forêt restaurée correspondent, dans toute la mesure du possible, à celles de la forêt originale (OIBT, 2003).

Restauration et gestion d'écosystème : bien que la restauration et la gestion d'écosystème forment un continuum et emploient souvent des types d'interventions similaires, la restauration écologique vise à assister ou à initier l'autoréparation, tandis que la gestion d'écosystème a pour but de garantir par la suite le bien-être continu de l'écosystème restauré (SER, 2004).

Réhabilitation : c'est une des formes de restauration écologique. Il s'agit de la création d'un écosystème alternatif écologiquement viable, éventuellement différent en terme de structure, composition et fonctionnement de l'écosystème avant dégradation, et présentant une certaine valeur d'usage et pour la biodiversité. Le passage par un état intermédiaire réhabilité est parfois nécessaire pour la restauration elle-même, compte tenu de l'échelle temporelle de reconstitution d'un écosystème très dégradé (WWF, 2004).

Sols : Ils sont définis par la combinaison verticale d'horizons présents endéans une profondeur définie, et par l'organisation latérale ('séquence') des horizons du sol, ou par leur absence, à une échelle à même de refléter le relief ou une unité paysagique (FAO, ISRIC et AISS, 1999).

Sol pisolithique : Sol composé de concrétions dont la granulométrie s'apparente à celle du gravier.

Topsoil : ce terme désigne la terre humifère provenant d'un décapage minier de surface. L'apport du topsoil en l'épandant sur les zones dénudées après exploitation est une méthode très efficace pour la préparation des substrats à revégétaliser.

Zone de conservation: c'est la zone de référence naturelle qui n'est pas touchée par l'exploitation et qui ne figure pas parmi les parcelles à exploiter dans le futur. Pour cette étude, c'est la zone prise comme état de référence naturel qui est l'état optimal auquel doit atteindre les sites réhabilités.

Acronymes

- ACP** : Analyse en Composantes Principales
- AFC** : Analyse Factorielle des Correspondances
- AISS** : Association Internationale de la Sécurité Sociale
- AMSA** : Ambatovy Mineral Société Anonyme
- ANAE** : Association Nationale d'Actions Environnementales
- ANOVA** : Analysis of Variance
- ANCOVA** : Analysis of Covariance
- C/N** : Rapport carbone sur azote du sol indiquant la minéralisation de la matière organique
- CIRAD** : Centre de Coopération Internationale en Recherches Agronomiques pour le Développement
- CITES** : Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction
- CNRE** : Centre National de Recherches sur l'Environnement
- D** : Diamètre de l'arbre mesuré à 1,30 m du sol
- DGM** : Direction Générale de la Météorologie
- DME** : Diamètre Minimale Exploitable
- EIE** : Etude d'Impact Environnementale
- ETP** : Evapotranspiration Potentielle
- ESSA** : Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
- ESSA/Forêts** : Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département des Eaux et Forêts
- FAO** : Food and Agriculture Organization (Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)
- FOFIFA** : Foibe Fikarohana ampiharina ho Fampandrosoana ny eny Ambanivohitra (Centre national de la recherche appliquée au développement rural)
- GPS** : Global Positioning System
- H** : Hauteur totale de l'arbre
- INRA** : Institut National de Recherche Agronomique
- IRD** : Institut de Recherche pour le Développement
- ISRIC** : International Soil Reference and Information Centre
- OIBT** : Organisation Internationale sur les Bois Tropicaux
- ONU** : Organisation des Nations Unies
- PCA** : Plate Count Agar (gélose pour dénombrement)
- PGPR** : Plant Growth Promoting Rhizobacteria
- pH** : potentiel Hydrogène
- PIB** : Produit Intérieur Brut
- PK** : Point Kilométrique
- T** : Traitement utilisé pour l'essai de réhabilitation à long terme
- TS** : Topsoil
- TVC** : teinte, valeur, chromaticité
- UICN** : Union Internationale pour la Conservation de la Nature
- USDA** : United States Department of Agriculture
- WWF** : World Wild Fondation
- ZC** : Zone de Conservation

Partie 1. Introduction

Tous les écosystèmes terrestres se composent d'éléments souterrains et épigés qui interagissent pour influencer la communauté et les processus aux différents niveaux qui les constituent (Wardle *et al.* 2004). Le sol constitue l'élément essentiel des biotopes propres aux écosystèmes terrestres (RAMADE F., 1984); un milieu particulièrement favorable à la vie, permettant le développement d'une grande diversité d'organismes (DIEHL, 1975).

Il constitue sans aucun doute le capital le plus précieux pour l'homme par sa richesse et aussi par le fait que de son état dépendent la disponibilité en eau, la production et par conséquent la qualité de l'environnement (L'Huiller L., Jaffré T. et Wulff A., 2010). Toutefois, afin de satisfaire à ses besoins immédiats et d'assurer le développement économique, l'homme est contraint de faire recours à l'exploitation. L'accroissement des activités humaines s'accompagnent de la dégradation des sols et de la couverture végétale, entraînant à l'échelon mondial des phénomènes d'érosion, la perturbation des régimes hydriques, la perte de fertilité des terres et la disparition de fractions importantes de la biodiversité. Face à cette situation, il est unanimement reconnu que des mesures urgentes de conservation des milieux naturels s'imposent. Mais bien souvent ces seules mesures ne suffisent pas pour maintenir les biens et les services offerts par les écosystèmes. Aussi la restauration de ces derniers est-elle devenue un complément essentiel afin de les réintégrer dans le paysage et de les réhabiliter dans leurs fonctions de régulation des facteurs environnementaux et de conservation de la biodiversité (L'Huiller L., Jaffré T. et Wulff A., 2010).

Madagascar est un pays dont la biodiversité témoigne d'une grande richesse et se caractérise par un taux élevé d'endémisme. La Mine d'Ambatovy est située au cœur de l'une des régions particulièrement riches en espèces, dans l'extrémité sud de ce qui reste du Corridor Forestier de l'Est. Les sols dans la région sont généralement connus comme des latérites, sols définis comme sols tropicaux fortement altérés et riches en fer (Young, 1976 in EIE Ambatovy, 2006). La réhabilitation de ces sols est souvent difficile parce qu'ils sont pauvres en nutriments, notamment en azote et en phosphore (Zonn, 1986). La réhabilitation étant une des formes de la restauration écologique. Il s'agit de la création d'un écosystème alternatif écologiquement viable, éventuellement différent en terme de structure, composition et fonctionnement de l'écosystème avant dégradation, et présentant une certaine valeur d'usage et pour la biodiversité. Le passage par un état intermédiaire réhabilité est parfois nécessaire pour la restauration elle-même, compte tenu de l'échelle temporelle de reconstitution d'un écosystème très dégradé (WWF, 2004).

Madagascar est également l'un des pays les plus pauvres de la planète et sa population est fortement dépendante des ressources naturelles dans sa subsistance quotidienne. De ce fait, l'existence de la société Ambatovy par son opération minière de grande envergure fait l'objet d'un défi important

pour le développement économique du pays. Cependant, la revégétalisation des sites d'exploitation est primordiale afin de parvenir à la conservation des terres végétales.

C'est pourquoi, Ambatovy fait entrer dans sa politique de mise en œuvre la réinstallation de forêt de remplacement d'autant plus que le projet doit assurer la réhabilitation des sites après exploitation minière. Sur ce, des parcelles d'essai en matière de revégétalisation effective et sur la conservation des terres végétales ont été installées à Analamay, à Berano et sur la piste water-pomp Mangoro.

Un suivi régulier de ces parcelles d'essai est important afin d'avancer dans l'étude écologique de succession naturelle. Pour cela, l'analyse de l'évolution pédologique et biologique des sites réhabilités est un des facteurs importants permettant d'évaluer la réussite ou non de la réhabilitation. Ainsi, il est intéressant d'étudier les phénomènes co-évolutifs entre sol, pédofaune et plante (Nehl et al. 1996). Tous ces facteurs se combinent et justifient l'importance de ce présent travail de recherche.

Exceptée cette partie introductive, cette étude comprendra quatre (04) parties :

- ☞ La méthodologie comprenant la présentation de la zone d'étude, la problématique, les hypothèses et les démarches méthodologiques ;
- ☞ Les résultats avec les interprétations y afférentes ;
- ☞ Les discussions suivies de quelques recommandations ;
- ☞ La conclusion générale.

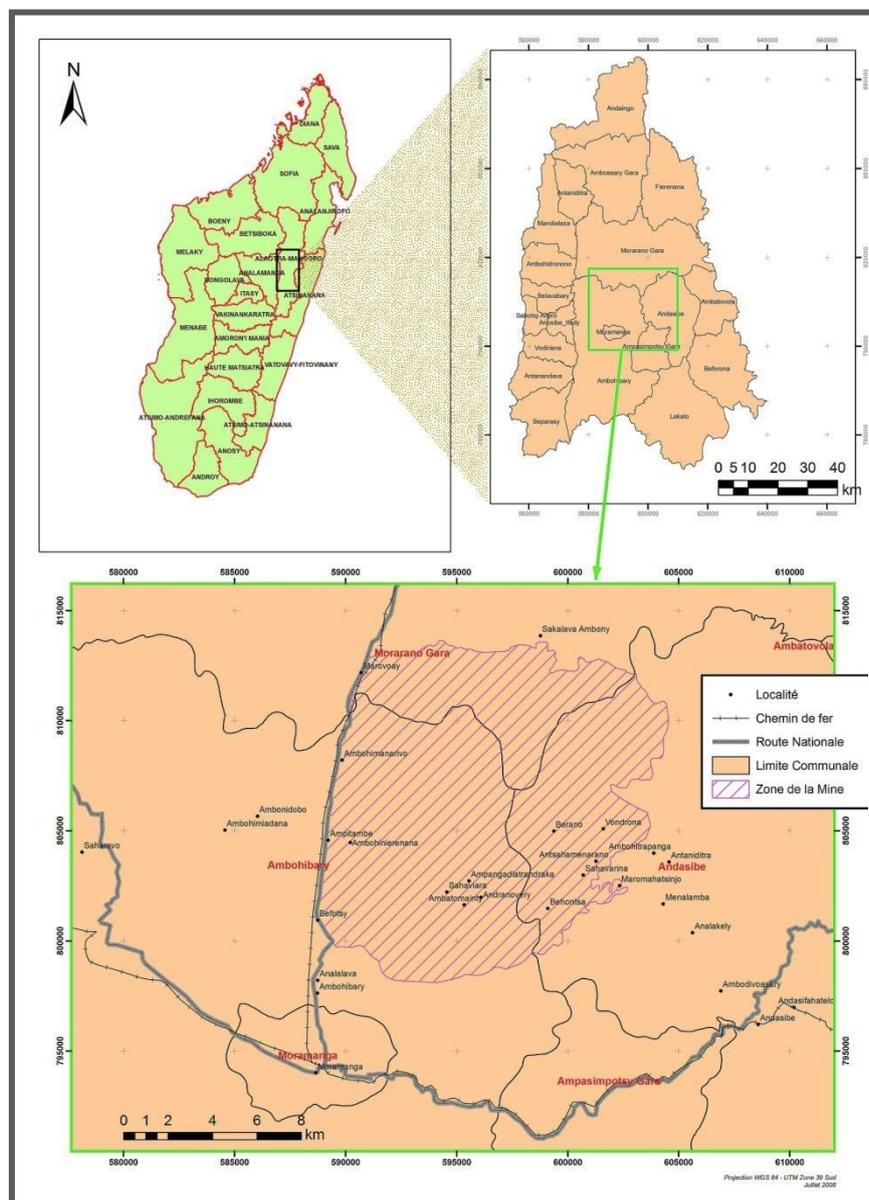
Partie 2. Méthodologie

1 Présentation de la zone d'étude

1.1 Milieu physique

1.1.1 Situation administrative et localisation géographique

La mine exploite deux secteurs de ressources : Ambatovy et Analamay. Ces derniers appartiennent à la commune rurale d'Ambohibary, district de Moramanga et région Alaotra Mangoro. Mais tel que montré sur la carte ci-après, le site embrasse trois communes à savoir : Morarano Gare, Ambohibary et Andasibe. Il est limité par 590 000 et 610 000 UTM longitude-Est et 800 000 et 810 000 latitude-Sud et se situe à environ 130km d'Antananarivo et 275km du port de Toamasina. (DYNATEC CORPORATION, 2006).



Carte 1: Localisation d'Ambatovy
Source: Projet Ambatovy, 2008

1.1.2 Climatologie descriptive

Deux (02) stations météorologiques ont été installées sur le site de la mine d'Ambatovy depuis l'année 2006 : la première a été mise en service de 2006 à 2009 ; et la deuxième de 2009 à 2012. Les données climatiques présentées dans cette partie sont donc les moyennes mensuelles des données de 7ans (de Janvier 2006 à Décembre 2012).

Tableau 1: Moyenne mensuelle de 2006 à 2012

	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin
Pmoy (mm)	77,7	62,9	46,5	59,4	82,3	118,1	268,8	309,8	186,0	94,8	59,1	57,6
Tmoy (°C)	14,2	14,5	15,6	17,6	19,3	20,6	20,6	20,6	20,2	19,0	17,5	15,4

Source : tiré des données climatiques d'Ambatovy, 2013

D'après les sources du volet Hydrologie du Département Environnement, la valeur de la précipitation moyenne annuelle est de 1422mm/an et que la température journalière varie de 14°C à 21°C. La direction du vent dominant est le WNW (Ouest-Nord/Ouest) avec une vitesse moyenne de 5km/h. Cette vitesse du vent dominant est jugée faible car elle est inférieure à 8 km/h (seuil adopté par la DGM¹ Ampandrianomby).

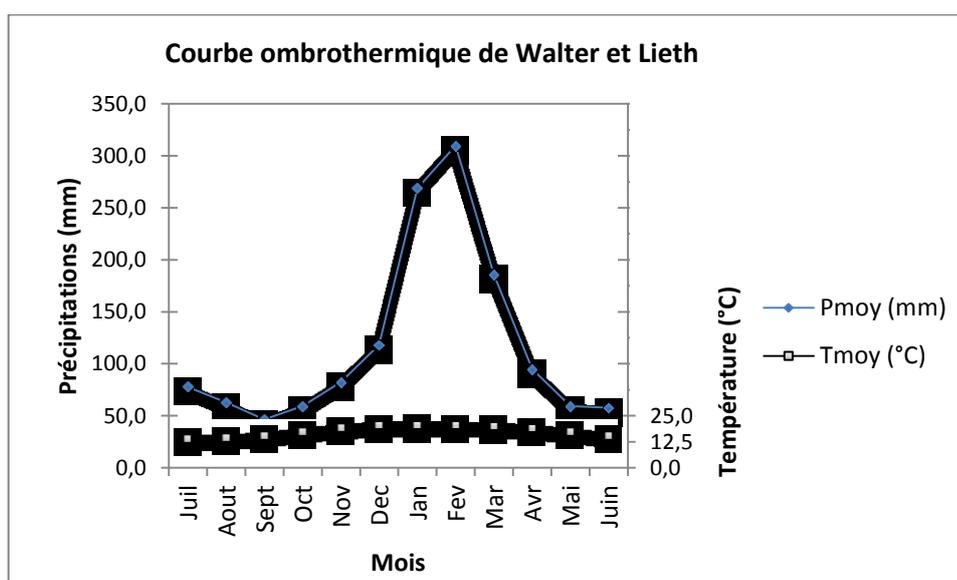


Figure 1: Courbe ombrothermique d'Ambatovy
Source : tiré des données climatiques d'Ambatovy 2006-2012

Les ordonnées droite et gauche sont caractérisées respectivement par les températures exprimées en °C et les précipitations en mm. L'échelle de la température est le double de celle des précipitations (Mémento du forestier). La saison pluviale débute en mois de Novembre et se termine en mois d'Avril. Ce sont les mois perhumides de la région d'Alaotra-Mangoro. Durant ces sept dernières années, la région n'a pas subi de manque d'eau puisque la pluie y est abondante et régulière.

¹ Direction Générale de la Météorologie

1.1.3 Hydrographie

La partie Ouest de la région de la mine se déverse dans le bassin versant de la rivière Mangoro, de longueur 135km. Le Mangoro prend ses sources au-delà de la Commune d'Andaingo et grossit en cours de route par les principaux affluents suivants : le Sahamadio (26km), le Sahamarirana (44 km) et le Manambolo (28 km). La rivière Sahamarirana et la rivière Antsahalava drainent le gisement d'Ambatovy au Sud et à l'Ouest, respectivement, alors que les rivières Ankaja et Sakalava drainent le gisement d'Analamay au nord.

La partie Est du secteur de la mine comprend des bassins versants des rivières Vohitra (45km) et Rianila. Les eaux de surface de la région de la mine qui s'écoulent vers l'Est atteignent le Sahatandra, l'affluent de la rivière Vohitra, et traversent la partie orientale du district de Moramanga sur une longueur de 70km) avant de rejoindre la rivière Vohitra. Cette dernière coule vers l'Est et se joint à la rivière Rianila près de la côte Est de Madagascar. La rivière Rianila se jette dans l'Océan Indien près de la ville d'Andevoranto; son bassin versant a une superficie totale de 7820km².

Les autres principaux cours d'eau sont le Sahatany (52km), l'Ihofika (43km), le Lakato (22km). La rivière Firikana à la sortie du marais de Torotorofotsy et le Manampotsy (24km) sont les autres affluents de la rivière de Lakato (Dynatec corporation, 2006).

Le Marais de Torotorofotsy, un des sites RAMSAR, et le marais de Mokaranana se trouvent aussi dans le district de Moramanga et non loin du site Ambatovy-Analamay.

1.1.4 Géomorphologie

Le secteur de la mine est composé de vestiges érodés appartenant à un plateau situé à une altitude d'environ 1100 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer. Ce plateau est bordé à l'ouest par la large plaine alluviale du Mangoro et à l'est par les Marais de Torotorofotsy et des collines couvertes de forêts.

La géomorphologie du secteur de la mine se caractérise par des pentes relativement abruptes, des collines et des vallées remplies d'alluvions. Les processus tectoniques (forces impliquées dans la déformation de l'écorce terrestre) sont responsables de la présence des failles, des fractures et des dykes. Ces caractéristiques créent des zones de faiblesse facilement érodées. La topographie s'adoucit et le fond des vallées s'élargit à l'ouest de la mine, le long de la prise d'eau proposée dans la rivière Mangoro.

Dans ce secteur, les reliefs ou modelés sont recouverts de latérites (sols ferrallitiques) pouvant subir le phénomène d'érosion. L'eau souterraine s'infiltré puis s'écoule le long de l'interface entre la roche mère et la latérite. Cet écoulement préférentiel est à l'origine de l'érosion sous forme de lavaka. Les lavaka contribuent à l'alignement linéaire des vallées le long de ces zones de faiblesse (DYNATEC CORPORATION, 2006).

1.1.5 Pédologie

Les sols dans la région sont généralement connus comme des latérites, sols définis comme sols tropicaux fortement altérés et riches en fer (Young 1976 in EIE, 2006). Les formations de latérite impliquent la redistribution et la concentration de sesquioxides dans le profil pédologique. Elles sont classifiées comme « ultisols » et « oxisols » dans le système de classification du département de l'agriculture américain (USDA²) (Whitmore, 1975 in EIE, 2006). Tel que décrit dans USDA (1975), le terme latérite est indicatif des propriétés pédologiques suivantes:

- ✓ matériaux riches en oxydes de fer et/ou d'aluminium
- ✓ une combinaison de phénomènes physiques et chimiques résultant de l'altération extrême de la roche formant le sol; séparation du Fe, Al, Mn et Ti dans les horizons et migration de la silice vers la base du pédon et formation des cuirasses, ou carapaces ferrallitiques, indurées
- ✓ teneur extrêmement faible de bases alcalines échangeables
- ✓ faible capacité d'échange cationique (16 méq/100 g de sol ou moins)
- ✓ rapports $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 2$
- ✓ argiles tachetées molles qui se changent de façon irréversible en carapaces ou cuirasses indurées sous exposition d'une alternance d'humidité et de sécheresse
- ✓ concrétions ou nodules dans une matrice de matériaux consolidés et non consolidés

Quatre types de sol majeurs résumés ci-après caractérisent la région :

- **Les sols à carapace ferrallitique** sur plateaux topographiques possédant une couche de surface indurée. Ces sols sont classifiés comme oxisols dans le système de classification USDA. Par endroits, on peut rencontrer des sols plus récents (les entisols de la classification USDA)
- **Les sols pisolithiques** à des positions topographiques plus basses que les premiers. Ce type peut contenir un éventail de concrétions et de cuirasses cassées, selon la position de pente et d'autres facteurs de formation du sol. Une couche d'argile enrichie peut souvent être observée sous l'horizon durci et ces sols ont généralement été classifiés comme oxisols dans le système de classification USDA.
- **Les sols ferrallitiques** rouges/jaunes sur bas des pentes. Ces sols ont moins de concrétions et ont été classifiés comme ultisols ou oxisols.
- **Les sols organiques** ont été repérés dans les dépressions. Ils se forment à partir d'une matière d'origine organique, sont acides et ont une faible saturation en bases. Ces sols sont classifiés comme histosols.

(DYNATEC CORPORATION, 2006)

²United States Department of Agriculture

1.2 Milieu biologique

1.2.1 Flore

Le secteur environnant le site de la mine comprend des forêts et des terrains broussailleux intacts et dégradés, des zones très herbacées, des plantations d'Eucalyptus, des terres boisées et des rizières dont la présence est associée aux conditions géographiques du secteur concerné. Certains types de végétation présentent un intérêt particulier du point de vue floristique et biologique. Elle contient trois types de formation dont :

- Formation de type zonale : composé de forêts denses humides de l'Est de moyenne altitude, sur des zones pédologiques argileuses où les espèces sont très variées avec des différentes strates. Les familles de LAURACEAE, MYRTACEAE, CUNNONIACEAE, CLUSIACEAE, EUPHORBIACEAE, MORACEAE, SARCOLENACEAE, FLACOURTIACEAE, RUBIACEAE, STERCULIACEAE, PANDANACEAE, CYATHEACEAE sont les plus nombreuses. (GERP, 2008)
- Formation de type azonale sur sol ferralitique, dominée par les végétations buissonnantes sclérophylles dont les familles les plus représentées sont : LAURACEAE, ERICACEAE, ASTERACEAE et SARCOLANENACEAE.
- Formation de transition entre les deux, sur les carapaces peu ferralitiques argilacées et dont les familles SARCOLENACEAE, ASTERACEAE, EUPHORBIACEAE, ET RUBIACEAE sont dominantes.

Ces formations couvrent une superficie totale de 22 893 ha (Dynatec EIE 2006). Des botanistes du Missouri Botanical Garden (MBG), basés à Madagascar ont fait l'étude de cette région en profondeur et ont identifié les espèces préoccupantes (Dynatec EIE, 2006). Jusqu'à maintenant, 127 espèces de flore sont considérées comme préoccupantes dont 53 figurent actuellement à une des annexes de la Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (CITES).

1.2.2 Faune

Les espèces de faune préoccupantes dans le secteur de la mine comprennent des espèces localement et régionalement endémiques, des espèces rares et des espèces interdites de commerce sous la convention CITES.

Soixante-sept (67) espèces d'*amphibiens* et soixante (60) espèces de *reptiles* ont été recensées durant les inventaires herpétologiques dont cinq (5) espèces régionalement endémiques et considérées préoccupantes au plan de la conservation. Plus de 98% de ces espèces sont endémiques de Madagascar (seulement deux espèces ne le sont pas: *Ptychadena mascareniensis* et *Pelusios subniger*). (DYNATEC CORPORATION, 2006)

L'espèce d'*oiseaux* la plus importante a été observée dans le marais de Torotorofotsy. Cette espèce est le râle de Waters (*Sarothrura watersii*), une espèce endémique à Madagascar qui fait face à

une sévère perte d'habitat. Quinze des espèces d'oiseaux observées dans le secteur de la mine figurent sur la liste de l'UICN et celle de CITES (DYNATEC CORPORATION, 2006).

Chez les *mammifères*, neuf espèces de Lémuriens ont été inventoriées dans le secteur de la mine. Tous les Lémuriens sont endémiques de Madagascar et sept des espèces observées sont sur la liste de l'UICN. Un petit mammifère, un tenrec appartenant au genre *Microgale*, pourrait s'avérer être une nouvelle espèce. Deux espèces de mammifères recensées sont sur la liste de l'UICN, mais aucune n'est sur la liste CITES. Six espèces et un genre de chauves-souris ont été observés au cours de l'inventaire des chauves-souris, dont une espèce de la liste de l'UICN, mais aucune de la liste CITES (DYNATEC CORPORATION, 2006).

Pour les *insectes*, une découverte importante fut l'observation de colonies de fourmis *Pilotrochus* à proximité d'Ambatovy. L'observation suggère que le genre *Pilotrochus* soit localement endémique. Une espèce de fourmi (*Pheidole oculata*) est inscrite comme vulnérable par l'UICN, mais aucune n'est sur la liste CITES. La détection du papillon *Hovala2* est l'observation la plus significative, étant donné sa rareté. Il existe moins de 10 spécimens connus de ce *Hovala* non décrit, qui semble confiné à la région d'Analamazaotra. Aucune espèce de lépidoptères ne figure sur la liste CITES. (DYNATEC CORPORATION, 2006)

1.3 Milieu humain

1.3.1 Population locale

Les terroirs (sub-villages) de Berano, Behontsa, Andranoverly et Ampangadiantandraka sont les plus proches du site. La population totale du secteur d'étude avoisine les 80 000 personnes en 2003, dont moins de la moitié de celle de la ville de Moramanga (DYNATEC CORPORATION, 2006). Le tableau suivant récapitule la répartition de la population suivant les cinq communes environnantes.

Tableau 2: Données démographiques

	MORARANO	AMBOHIBARY	MORAMANGA	AMPASIMPOTSY	ANDASIBE
Population (nombre)	10 136	14 664	37 955	5 662	7 884
<16	5 684	8 484	22 014	3 078	4 290
16 à 60	2 974	4 260	11 007	1 678	2 405
>60	1 478	1 920	4 934	908	1 189
Proportion homme/femme	99,1	—	95,0	—	97,4

Source: CRD, 2003 in DYNATEC CORPORATION, 2006

La population rurale, composé en majorité du groupe ethnique Bezanozano, est très jeune dont plus de la moitié à moins de 16 ans. Le nombre de ménages dirigés par des femmes varie entre 15 % et 20 %. Les infrastructures sont encore rares localement. Vu l'échelle de l'usine, les retombées économiques locales s'avèrent importantes: création d'emplois, contributions aux institutions d'enseignement et améliorations aux infrastructures. Actuellement, des écoles et des CSB2 (Centre de santé de base, niveau 2) sont en cours de construction dans quelques villages.

1.3.2 Activités économiques

L'économie y a un caractère à la fois rural et urbain. Dans l'ensemble, l'économie rurale se caractérise par de multiples sources de revenus dont l'agriculture, l'élevage, la production artisanale, et l'exploitation forestière. Le tableau suivant indique la place qu'occupe chaque activité dans les sources de revenu.

Tableau 3: Sources de revenu de la population locale

SOURCE DE REVENU	CONTRIBUTION AU REVENU TOTAL (%)
Riz	26
Elevage	4
Vannerie	10
Fabrication de charbon de bois	15
Exploitation forestière et coupe de bois	10
Emplois salariés	18
Commerce	8
Echange	4
Collecte des produits de la forêt	1
Autres	4
Total	100

Source : DYNATEC CORPORATION, 2006

L'agriculture est une culture de subsistance reposant largement sur la culture du riz et du manioc. A l'exclusion d'Andasibe où peu de ménages ont accès aux terres, quasiment toutes les communes pratiquent la riziculture (DYNATEC CORPORATION, 2006).

Concernant l'élevage, presque tous les ménages pratiquent l'aviculture tant pour l'autoconsommation que la vente. Il en est de même pour la pisciculture, trois nouveaux projets de pisciculture ont été démarrés à Andasibe et Marovoay. 10% des ménages d'Andasibe et 70 % de ceux de Menalamba pratiquent l'apiculture (DYNATEC CORPORATION, 2006).

L'activité artisanale primaire tourne autour de la vannerie. C'est une activité exclusivement féminine mais arrivant à couvrir les besoins des ménages. Les résultats du sondage lors de l'étude d'impact environnemental en 2006 montrent que 75 % des ménages ont recours à cette activité (DYNATEC CORPORATION, 2006).

L'exploitation forestière constitue un moyen de subsistance additionnel. Elle comprend la coupe de bois d'œuvre dans les forêts naturelles et celle de bois de service (fabrication de charbon de bois) dans les plantations d'*Eucalyptus*.

1.4 Milieu d'étude proprement dit

Le milieu d'étude proprement dit est catégorisé en trois (03) catégories de sites selon leur état : l'état de référence naturel (2 sites), l'état zéro (un site) et l'état réhabilité (2 sites). Un témoin laissé à l'état nu durant 3ans est également étudié. En tout, il existe six (06) sites d'intervention.

1.4.1 Sites d'état de référence naturelle

Il existe deux types d'état de référence naturelle qui doivent être considérées: la zone sous couverture forestière zonale et la zone sous couverture forestière azonale. L'étude des sites de référence naturelle doit donc se porter au niveau de ces deux zones afin d'évaluer laquelle des deux présente des caractéristiques pédologiques et biologiques plus proches à celles des sites réhabilités. Il est à noter que les sites d'état de référence naturelle étudiés sont ceux inclus dans la zone de conservation de l'empreinte minière afin de veiller au bon fonctionnement d'un suivi quelconque et de la continuité de l'étude.

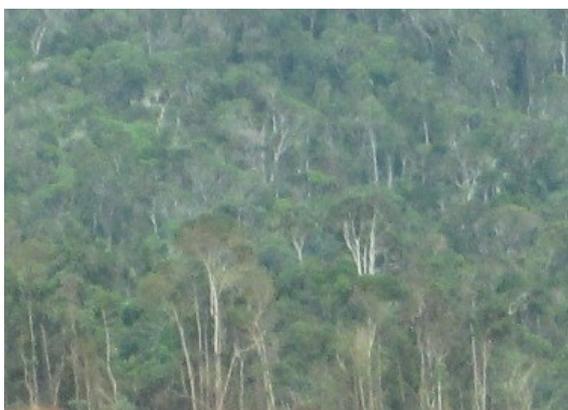


Photo 1: Forêt zonale d'Ambatovy
Source : cliché de l'auteur, 2013



Photo 2: Forêt azonale d'Ambatovy
Source : cliché de l'auteur, 2013

La zone sous couverture forestière zonale prise comme site d'étude est la forêt d'Ampangadiantrandraka. Tandis que pour la zone sous couverture forestière azonale, c'est la forêt d'Ampanatovana qui a été étudiée.

1.4.2 L'état zéro (sites de la mine)

Les sites de la mine d'Ambatovy sont regroupés en deux (02) catégories, à savoir :

- *Les sites qui ont subi un simple décapage* et qui sont destinés à la construction des infrastructures (routes, bâtiments, etc.). Ils ont subi un décapage à 50cm en dessous du sol.
- *Les sites minés* sur lesquels est effectuée l'extraction des minerais (Nickel, Cobalt). La fosse minière peut atteindre jusqu'à 60m de profondeur.



Photo 3: Site décapé sans extraction de minerais
Source : cliché de l'auteur, 2013



Photo 4: Fosse minière
Source : cliché de l'auteur, 2013

Toutefois, selon le planning de réhabilitation dans cinq (05) ans élaboré par Ambatovy, les sites de la mine (que ce soit avec ou sans fosse minière) seront conçus de telle sorte qu'ils forment des plateformes afin de faciliter la revégétalisation. Dans ces plateformes, la différenciation des horizons n'est plus marquée puisque les différentes couches du sol sont déjà mélangées (résidus d'extraction, déchets industriels, sols stériles, etc.).



Photo 5: Plateforme de réhabilitation pour 2015 (24ha)
Source : cliché de l'auteur, 2013

La plateforme prête à être réhabilitée en 2015 a une superficie de 24ha. C'est un site récemment exploité qui est le premier site préparé pour la réhabilitation. Il est composé de terres stériles, des résidus d'extraction et des déchets d'exploitation (cf. photo 5). Cette plateforme est choisie comme le *site de référence initial* ou *état-zéro* puisque c'est l'état auquel va ressembler chaque site à la fin d'exploitation et auquel il restera si on ne procède pas à la réhabilitation.

1.4.3 Essai de réhabilitation à long terme (ERLT)

L'essai de réhabilitation a été mise en œuvre en Juin 2010 ; les premiers sites réhabilités sont donc âgés de 33mois (soit 3ans environ) au moment de la présente étude. En Juin 2012, un deuxième essai a été effectué dans une parcelle située à la piste water-pomp de Mangoro. Ce dernier est alors âgé

de 9mois (soit 1an environ) au moment de la présente étude. Le protocole de réhabilitation appliqué tient compte de la trajectoire de la succession végétale naturelle d'Ambatovy. Les sites ont subi un décapage à une certaine profondeur pour imiter le contexte post minier.

Les parcelles d'essai de réhabilitation de Berano (33 mois) et celles du water-pomp de Mangoro (9mois) ont été mises en place en respectant le même contexte et en appliquant le même traitement de réhabilitation qui est le traitement dénommé T3+TS (traitement n°3 associé au topsoil) afin de pouvoir tester la réussite et l'évolution de l'effort de réhabilitation. Ce traitement consiste à déposer du topsoil de 25cm d'épaisseur sur le site pour ensuite y installer une plantation stratifiée composée de plusieurs familles (cf. annexe2). Ce sont ces deux parcelles qui sont prises comme dispositifs d'étude pour l'analyse d'évolution pédologique et biologique des sites réhabilités d'Ambatovy.



Photo 6: Parcelle d'essai de réhabilitation de Berano (3ans)

Source : cliché de l'auteur, 2013



Photo 7: Parcelle d'essai de réhabilitation du water-pomp Mangoro (1an)

Source : cliché de l'auteur, 2013

Lors de l'implantation du premier essai de réhabilitation en 2010, une parcelle a été laissée à l'état nu et aucun traitement n'y a été effectué afin qu'il puisse servir d'un témoin.



Photo 8: Parcelle témoin à Analamay (3ans)

Source : cliché de l'auteur, 2013

2 Problématique et hypothèses

2.1 Contexte général

2.1.1 Industrie minière : un défi pour le développement économique d'un pays

L'existence d'une industrie minière dans un pays peut contribuer à réduire la pauvreté de diverses manières, essentiellement par la génération de revenu et par la création d'opportunités de développement d'industries latérales ou secondaires (R. Kunanayagam et al., 2000). Pour le cas de Madagascar, Ambatovy contribue pour des dizaines de millions de dollars par an en impôts, redevances, droits et taxes aux recettes de l'Etat Malagasy (Projet Ambatovy, 2011).

Le Nickel devient l'un des premiers produits d'exportation à Madagascar. Il constitue ainsi une très importante source de devises étrangères et contribuera au développement du secteur industriel à Madagascar (Projet Ambatovy, 2011).

Ambatovy extrait le minerai et le transforme au pays même, générant ainsi d'importantes valeurs ajoutées économiques, en l'occurrence :

- La création d'emplois : plus de 6 000 emplois directs et bien plus encore d'emplois indirects ;
- Transfert de compétences et de technologie ;
- Développement de l'économie locale : investissement dans le développement de l'économie locale en assurant la formation, des services publics (éducation et services de santé) et des biens publics tels que : eau propre, transports, énergie et infrastructures ;
- Opportunités de marchés pour les entreprises Malagasy ;
- Opportunités de marchés pour les paysans qui vendent leurs produits au service-traiteur d'Ambatovy.

2.1.2 La pédogenèse : un processus trop lent

Le sol est un milieu qui évolue. Deux grands facteurs peuvent être retenus : les facteurs bioclimatiques généraux et les facteurs de la station. Ces derniers sont plus importants vu qu'ils déterminent la variation du sol sur de petites surfaces. Parmi ces facteurs, le relief tient une place importante. Dans les régions à topographie accidentée, l'effet de l'érosion est fort. Plus la pente est forte plus l'effet de l'érosion s'accroît. D'où la dominance des sols peu évolués. (Lavoisier, 1988)

La pédogenèse s'effectue dans des conditions assez uniformes, où règnent des températures élevées et des précipitations abondantes tout au long de l'année (Cadet, 1980).

La dégradation d'un sol correspond à un phénomène de rajeunissement du sol (Lavoisier, 1988). Au début de la formation d'un sol, la roche-mère est peu à peu colonisée par les microorganismes (bactéries, champignons microscopiques) puis par la végétation (algues, lichens et mousses, puis herbacées, suivies d'une strate d'arbustes et finalement forestière). Parallèlement se forme un premier horizon humifère (dit horizon A), puis des horizons minéraux sous-jacents (horizons B). Chaque étape successive est caractérisée par une certaine association sol/végétation et milieu.

Après un certain temps d'évolution du système sol-végétation, un état d'équilibre dynamique est atteint, dit «climacique».

Les cycles d'évolution naturelle des sols ont des durées très variables, entre un millénaire pour les sols à développement rapide (horizon A uniquement) à plus d'un million d'années pour les sols à développement lent. (Lavoisier, 1988)

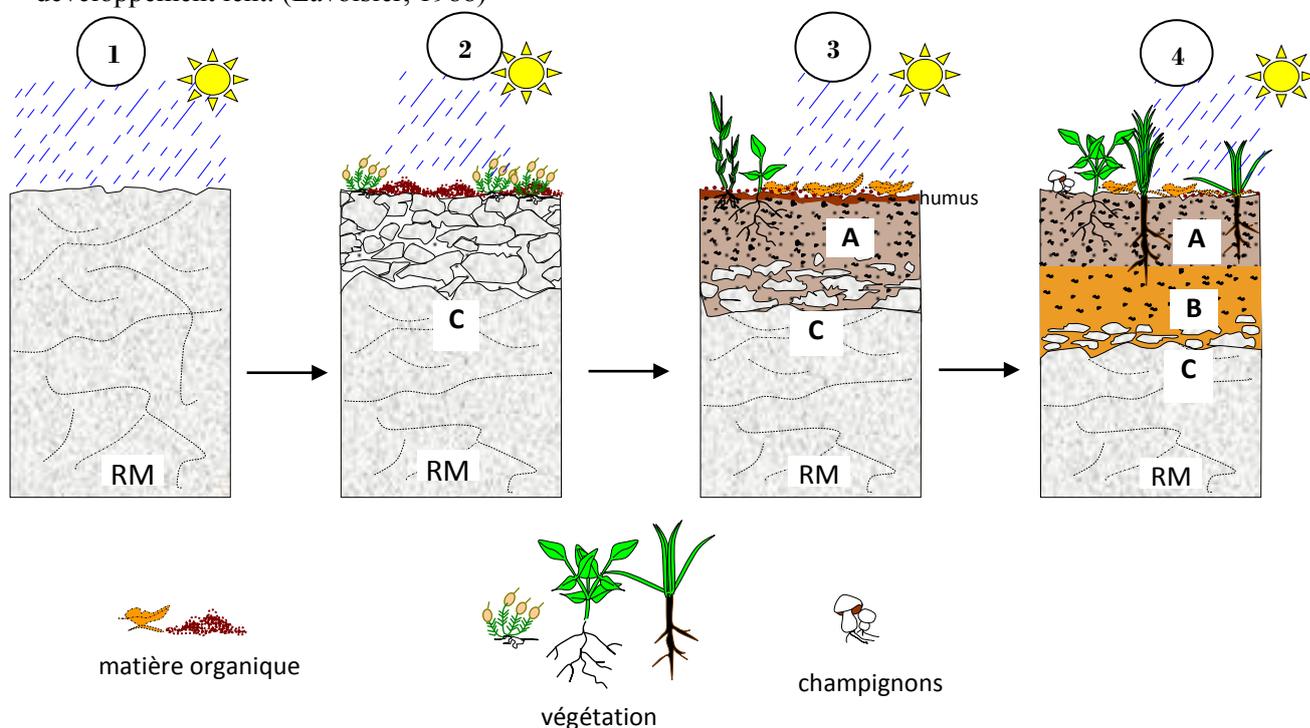


Figure 2: Processus de la pédogenèse

Source : tiré de Cadet, 1980 ; Lavoisier, 1988 ; <http://www.symbiose.ca>, 2013.

- ① : Roche mère non altérée
- ② : C= Roche mère ; altération physique, désagrégation
- ③ : C= Roche mère; A= roche mère désagrégée + apport de matière organique + humification
- ④ : C= Roche mère ; A= apport de matière organique + humification ; B = mélange d'humus, d'argiles, fer et fragments de roche mère, résulte d'une forte altération chimique de la roche mère et diffère de A par la structure.

La formation d'un sol résulte de la fragmentation des roches en particules de plus en plus fines et de l'incorporation de celles-ci à de la matière organique en cours de décomposition. L'eau, les racines et les alternances de gel et de dégel contribuent à la fragmentation des roches. La roche désagrégée constitue la roche mère, qui s'amenuise petit à petit. Les animaux et les végétaux participent à la formation des sols, en agissant sur la fragmentation des roches, et après leur mort, en fournissant de la matière organique fraîche. À mesure que le sol se développe, des couches appelées horizons s'individualisent. L'horizon A, proche de la surface, est en général riche en matière organique, tandis que l'horizon C est surtout minéral et possède une composition très voisine de la roche initiale. Un sol évolué est associé à un couvert végétal dense, qui l'entretient par recyclage de la matière organique. À ce stade, le sol comporte un horizon B, qui correspond à l'accumulation de minéraux lessivés (entraînés mécaniquement depuis la surface). (<http://www.symbiose.ca>)

2.2 Objectifs principaux

En tenant compte de la problématique énoncée précédemment, deux objectifs principaux sont alors retenus pour le présent travail de recherche:

- ☞ Evaluer la réussite ou l'échec du projet de réhabilitation effectuée par Ambatovy par l'analyse de l'évolution pédologique biologique des sites d'essai.
- ☞ Améliorer la qualité physique, chimique et biologique du sol pour la réussite de la réhabilitation forestière effectuée par Ambatovy.

2.3 Problématique

En plus des perturbations d'origine naturelle (cyclones) ou causées localement par l'exploitation forestière et l'agriculture itinérante sur brûlis, la présence même de l'exploitation minière est une pression entraînant la dégradation des sols à Ambatovy. En effet, l'empreinte minière d'Ambatovy est estimée à 1 700 ha et son exploitation va durer une trentaine d'années. Par ailleurs, la superficie de forêt à conserver aux alentours du site minier est de 4 900 ha. Des défrichements sont effectués dans des zones de sondage au sein de l'empreinte minière. L'extraction de Nickel et de Cobalt requiert la trouaison des fosses minières jusqu'à 60m de profondeur (Archives Département Mine, 2012). Une fois l'exploitation dans une fosse terminée, la zone est conçue sous forme d'une plateforme et les couches pédologiques ne sont plus différenciées. Le remblai est composé par des terres stériles et des blocs de pierres. Ne comportant plus de couverture végétale et comblé par les résidus d'extraction, le site devient sensible à l'érosion, défavorable à l'activité biologique et menacé par des risques de toxicité. Par contre, le processus de la pédogenèse est trop lent et dure jusqu'à plus d'un million d'années (tiré de Lavoisier, 1988). La réhabilitation des sites miniers dégradés est, alors, devenue une préoccupation importante des acteurs de l'industrie minière (IRD, 2013 in <http://www.biodiversite.nc>).

Ainsi, dans le cadre de la restauration de l'empreinte minière laquelle figure dans son engagement environnemental, Ambatovy a mis en place une vitrine de revégétalisation sur un espace couvrant 4ha dans l'empreinte de la mine. Il s'agit de parcelles de démonstration et d'expérimentation qui refléteront l'image à laquelle ressembleront dans le futur, la réhabilitation et la restauration écologique conduites par Ambatovy. Des travaux de génie civil, effectués pour remodeler la mine, contrôler l'écoulement des eaux et stabiliser les décharges, précèdent le dépôt du topsoil et la revégétalisation. On y installe ensuite une nouvelle couverture végétale, constituée d'espèces issues de cet écosystème notamment pour lutter contre l'érosion (Ambatovy, 2013). Cette vitrine est garnie de 16500 plantules de 34 espèces issues des pépinières du projet et de pépinières paysannes. L'aire de réhabilitation abrite bon nombre de populations d'espèces endémiques de la faune et de la flore locales. (Midi Madagasikara, 2011)

Le plus souvent, lors d'un suivi ou d'une évaluation de réussite de restauration écologique, l'étude effectuée se rapporte toujours sur la végétation, l'étude du sol est peu effectuée. Toutefois, le

développement de la végétation dépend de la qualité du sol qui la supporte. Le rétablissement d'un couvert végétal sur sol minier se bute cependant à plusieurs difficultés liées principalement au faible pouvoir agronomique de ces sols (Laroche O., 2012). La qualité du sol est étroitement liée à trois composantes: physique, chimique et biologique. De ce fait, le fonctionnement du sol fait donc intervenir trois types de paramètres interactifs: les paramètres chimiques, physiques et biologiques. Ainsi, l'interaction entre le profil pédologique, la composition chimique et l'activité biologique du sol constituent les paramètres permettant d'évaluer sa qualité et par conséquent la réussite de la revégétalisation effectuée qui se caractérise par la plantation en dessus.

A Ambatovy, les études menées sur la réhabilitation ont été toujours focalisées sur la végétation. Peu d'études sur le sol ont été effectuées. De plus, elles ne sont pas assez suffisantes pour pouvoir évaluer son évolution. Bon nombre de questions peuvent être posées, en l'occurrence :

- Quelles sont les impacts de l'extraction minière effectuée par Ambatovy sur le sol ainsi que sur la biodiversité du site?
- Comment se présente l'état de référence sur le plan pédologique et biologique des sites réhabilités à Ambatovy?
- Quelles ont été les activités qui ont été mises en œuvre et quel en est le bilan (performance)?
- Quels sont les avantages du dépôt de topsoil?
- Quelles sont les études qui ont été déjà effectuées ?
- Comment se présente l'état pédologique et biologique des sites avant exploitation, après exploitation et après réhabilitation?
- En bref, la réhabilitation des sols des sites réhabilités évoluent-ils positivement dans le temps et quels sont les facteurs qui régissent cette évolution ?

De ces questions découle la problématique suivante : **Comment évolue l'état pédologique et biologique des sites réhabilités à Ambatovy et quels sont les indicateurs de succès à retenir?**

2.4 Hypothèses

Deux grandes hypothèses sont émises suite à la problématique et l'objectif global :

Hypothèse 1 : Les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols des sites réhabilités évoluent vers celles de la forêt naturelle

S/H 11 : Cette évolution est observée sur les propriétés physico-chimiques du sol de chaque site

S/H 12 : Cette évolution est observée sur l'activité biologique dans le sol de chaque site

Hypothèse 2 : Les caractéristiques de la végétation sur sites réhabilités évoluent vers celles de la forêt naturelle

3 Démarche globale

3.1 Phase préparatoire

Afin de mener à bien le travail de recherche, des investigations bibliographiques sur le thème de recherche ont été menées avant même la descente sur terrain à la Mine d'Ambatovy. Cette étape de travail consiste à effectuer :

- la compilation des acquis expérimentaux et documentaires de la réhabilitation notamment sur les avantages du topsoil ;
- l'analyse des documents présentant le processus d'essai de réhabilitation à long terme adopté par Ambatovy ;
- l'élaboration du protocole de recherche contenant la démarche méthodologique à suivre ainsi que le calendrier d'exécution des travaux ;
- la confrontation des données déjà existantes suite aux travaux de recherche précédents en procédant par la saisie puis l'épuration des données et cela est suivi d'une analyse de ces données.

Deux types d'état de référence sont considérés : le premier est le sol sous végétation se trouvant dans une parcelle qui n'a pas encore été exploitée et qui ne le sera non plus c'est-à-dire la zone de conservation, elle fait l'objet de l'état optimal qui constitue la *référence naturelle* ; le deuxième est le sol récemment exploité. Les caractéristiques étudiées sont liées aux différents paramètres physico-chimiques et biologiques du sol et à la végétation en-dessus.

3.2 Phase de collecte de données

3.2.1 Activités principales

Il s'agit des travaux effectués lors de la descente sur terrain ainsi que l'analyse des échantillons de sols au laboratoire. Certaines conditions pouvant être respectées dès la collecte des données sur terrain sont prises en compte pour assurer la fiabilité des résultats et aussi puisqu'il s'agit d'une comparaison des résultats obtenus. La considération de ces conditions permet d'éviter l'erreur qui pourra biaiser les résultats et également de réduire les facteurs d'influence. Les conditions de comparabilité adoptées concernent : la pente, l'altitude et l'exposition.

Comme il s'agit d'une étude de l'évolution des sites réhabilités, ce sont donc les sites de référence possédant les mêmes caractéristiques que les sites réhabilités étudiés qui sont retenus. Les sites réhabilités sont installés sur des terrains en pente, les sites de référence choisis aussi sont ceux situés sur des terrains en pente : la forêt d'Ampangadiantrandraka pour la référence naturelle zonale, la forêt d'Ampanatovana pour la référence naturel azonale et le site de réhabilitation pour 2015 pour l'état-zéro. Etant donné que les sites réhabilités se situent au moyen versant dans un intervalle d'altitude de 800 à 1200m avec une exposition à l'Ouest, les sites d'état de référence pris sont ceux

appartenant dans cet intervalle d'altitude et qui sont exposés à l'Ouest. Le matériel utilisé pour la détermination de l'altitude étant le GPS.

Les principales tâches relatives à la collecte des données sont :

- Catégorisation/classification des sites d'étude : classifiés en trois zones
- Levé des coordonnées GPS
- Observation du profil pédologique de chaque site d'étude
- Prélèvement de la température et du pH du sol
- Etude de la pédofaune présente
- Inventaire floristique (essence, $d_{1,30}$ et h) du site en cas de présence de végétation
- Prélèvement d'échantillons de sol
- Analyse en laboratoire

L'analyse physico-chimique du sol en laboratoire est la plus idéale car les résultats obtenus sont plus précis (RAMANANTSARA, 2008). Elle consiste à prélever quelques échantillons du sol et à les analyser ensuite au laboratoire.

Les laboratoires d'analyse des échantillons prélevés seront FOFIFA-Tsimbazaza pour les analyses pédologiques et CNRE-Tsimbazaza pour les analyses microbiologiques.

3.2.2 Echantillonnage

La technique d'échantillonnage utilisée est l'échantillonnage aléatoire simple. Chaque individu de l'échantillon a la même probabilité d'être tiré puisque la constitution de l'échantillon est faite par hasard. L'échantillonnage aléatoire simple est la méthode la plus valable statistiquement car il possède la plus grande probabilité de représentativité. Par contre, des problèmes peuvent être rencontrés quant à sa réalisation notamment au niveau de la localisation des unités d'échantillonnage et à la perte de temps qu'elle occasionne.

Six (06) répétitions ont été effectuées pour chaque site d'étude afin d'assurer la représentativité de l'échantillonnage. Pour l'extraction de la pédofaune, tous les échantillons prélevés sont retenus pour l'expérimentation. Pourtant en raison du coût élevé des analyses en laboratoire, les échantillons de sol appartenant au même site sont mélangés pour n'en sortir qu'un seul échantillon mélangé à analyser.

3.3 Phase de traitement et d'analyse des données

Cette étape regroupe trois sous-étapes :

- le recouplement des données collectées (données pédologiques, données d'analyse au laboratoire, inventaire floristique et inventaire de la pédofaune) : cette étape est réalisée au moment des travaux de terrain. Il s'agit de vérifier et d'arranger toutes les données collectées afin de faciliter leur transcription et leur traitement ;

- la transcription sur tableur Excel ;
- et le traitement et l'analyse de ces données, en faisant ressortir les paramètres descriptifs et de comparaison des phases de succession à travers l'utilisation des formules mathématiques préétablies, ainsi que des logiciels statistiques notamment XLStat et R.

Cette troisième sous-étape (traitement et analyse des données) varie selon le type de travail effectué.

3.4 Phase de synthèse et de rédaction

Après avoir interprété les données traitées, nous avons procédé à la sélection des résultats importants qui méritent d'être présentés dans l'ouvrage et qui doivent être bien expliqués. Nous avons choisi la présentation thématique des résultats afin de faciliter la comparaison des sites selon les paramètres. La structure et le format du document sont conçus de manière à respecter les critères énoncés dans le Livre Blanc – Master 2 de l'ESSA-Forêts.

4 Démarche spécifique à chaque hypothèse

La démarche spécifique à chaque hypothèse réside sur les méthodes utilisées pour les travaux sur terrain ainsi que le traitement des données y afférentes.

4.1 Hypothèse 1 : Les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols des sites réhabilités évoluent vers celles de la forêt naturelle

4.1.1 Etude des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols

4.1.1.1 Examen de fosse pédologique

L'observation des profils du sol sur terrain apporte des informations précieuses sur les aptitudes du sol. L'étude du sol peut être ainsi procédée de manière très simple à plus complexe en partant d'une observation superficielle du sol vers une installation et un examen d'une fosse pédologique et peut aller jusqu'à l'analyse physico-chimique en laboratoire (RANDRIAMBOAVONJY, 1997).

Avec l'observation superficielle, c'est la couleur qui tient une place importante. La couleur permet déjà de tirer beaucoup de renseignement sur la classification et la composition du sol notamment lorsque le sol est étudié sur place. La couleur permet également d'apprécier la fertilité du sol. Les fosses pédologiques doivent permettre d'observer toutes les variations du sol dans les trois (03) dimensions. L'idéal est d'arriver aux horizons d'altération voire la roche mère (RANDRIAMBOAVONJY, 1997).

Pour chaque site d'étude, un examen de fosse pédologique est effectué. La dimension de la fosse pédologique est de 1mx1mx1m (Cours de pédologie ESSA-Forêts, 2011). Avec une fosse pédologique, la description du profil horizon par horizon est possible en relevant quelques paramètres

dont les plus importants sont la couleur du sol, l'épaisseur des couches, la texture, la structure, la porosité et la perméabilité, les systèmes d'enracinement (densité, dimension, orientation), la transition d'un niveau à l'autre, l'intensité de l'activité biologique, la cohésion et la consistance.

L'horizon A est la partie supérieure présentant un taux élevé de matière organique mais faible en argile, fer, alumine. L'horizon B est celui se trouvant au-dessous de A et caractérisé par des teneurs élevés en argile, fer et alumine. Entre A et B se trouve un horizon de transition dénommé AB (RAMANANTSARA, 2008).

Remarque :

L'étude de fosse pédologique dans le site miné³ n'a pas été effectuée puisque la différenciation des horizons n'est plus marquée. En effet, les différentes couches du sol sont déjà mélangées entre elles ainsi qu'avec les résidus d'extraction.

a) La couleur

Elle est déterminée par le Code Munsell par lequel on détermine le chroma et l'intensité. La couleur a une signification due essentiellement à la matière organique, au fer et au type d'argile (Cours de pédologie appliquée/ESSA-Forêts, 2011). Le système TVC⁴ de Munsell est un espace de couleur tridimensionnel, dont :

- **La teinte (hue)** représente une nuance de couleur.
- **La valeur (value)** représente la luminosité/clarté perçue.
- **La chromaticité (chroma)** représente la pureté d'une couleur basée sur la perception visuelle d'où le nom "chromaticité" et non "saturation" qui représente la saturation réelle.

b) La texture

Encore appelée « granulométrie », la texture est une indication de la composition granulométrique (sable-limon-argile). Elle correspond à la répartition des minéraux par catégorie de grosseur et ce indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux et dépend de la nature des fragments de roche-mère (RAMADE F., 1984). Son intérêt pratique concerne les propriétés fonctionnelles du sol (rapport sol-eau, aération, complexe absorbant, ...). Pour la présente étude, elle est observée sur terrain mais vérifiée après par l'analyse pédologique au laboratoire de la FOFIFA.

c) La structure

La structure désigne l'arrangement des particules granulométriques pour constituer des agrégats. Comme la texture, elle joue un rôle sur l'aération du sol et sur la rétention en eau. En effet, la structure intervient sur l'existence des pores pour qu'il y ait de l'eau et de l'air. La structure peut être *particulière*, lorsque les éléments constitutifs du sol restent indépendants et que la classification est

³ La plateforme de 24ha de superficie qui est prête à être réhabilitée en 2015.

⁴ Teinte, Valeur et Chromaticité

basée sur la granulométrie, ou *massive* lorsque le sol forme une masse continue et qu'il n'y a pas d'individualisation d'agrégats, ou *fragmentaire* lorsque les éléments du sol sont assemblés sous forme d'agrégats de différentes formes. Suivant les formes géométriques des agrégats, ce dernier type de structure peut encore être classé en différents sous-types : grenue et grumeleuse (arrondie), prismatique, polyédrique, cubique, lamellaire, nuciforme⁵, en plaquette, squameuse⁶, colonnaire.

d) La porosité

Elle désigne l'ensemble des espaces vides qui sont occupés par l'air et par l'eau dans le sol. Les observations relatives à la porosité portent sur les jugements sur les vides entre les agrégats et également sur les pores. Les jugements faits sur terrain portent sur les macropores tubulaires, le degré de structuration⁷, la taille des agrégats et également sur le développement racinaire. Par exemple, un horizon bien exploré par les racines est un horizon poreux.

e) La taille des agrégats

La taille des agrégats joue un rôle important vis-à-vis des propriétés physiques. Plus les agrégats sont de petites tailles, plus il y a d'espaces vides et meilleures sont les propriétés physiques du sol. La taille peut varier de quelques mm (grenue) à plusieurs dm (cubique) (Cours de pédologie appliquée/ESSA-Forêts, 2011).

f) La consistance des agrégats

Elle détermine la résistance des agrégats vis-à-vis des phénomènes de désagrégation. Pour cela, on brise les agrégats en les comprimant entre le pouce et l'index ou dans la paume de la main. Plus les agrégats ont une faible consistance, plus ils sont sensibles à l'érosion.

g) La température

La température n'agit pas directement sur les besoins de la plante mais elle intervient sur le pédoclimat et par conséquent sur la vitesse de croissance des végétaux. La température optimale pour le développement de la microfaune au-dessous d'un peuplement est de 22 à 25°C (Cours de pédologie appliquée/ESSA-Forêts, 2011). La température du sol est mesurée à -0,5m et à -1m à l'aide d'un thermomètre pour sol afin de respecter la *profondeur utile*⁸.

h) 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

⁵ Subangulaire ou émoussée

⁶ Sous-forme d'écailles

⁷ Le degré de structuration est l'intensité d'agrégation, qui exprime la plus ou moins grande cohésion d'assemblage des particules à l'intérieur des grumeaux et l'adhérence entre les grumeaux dans les agrégats

⁸ Profondeur utile : espace disponible pour le développement du système racinaire.

végétaux propres à tel ou tel écosystème terrestre ainsi que dans ceux de la microflore et de la faune édaphique (RAMADE F., 1984). Sur terrain, le pH du sol est mesuré par un pH-mètre à électrode pour sol. La mesure du pH est effectuée à 0,5m et à 1m au-dessous du sol. Les arbres forestiers supportent des pH acides (Randriamboavonjy, 1997). Les résultats du pH prélevés sur terrain sont vérifiés ensuite par les résultats d'analyse pédologique au laboratoire.

4.1.1.2 Prélèvement d'échantillons pour les analyses en laboratoire

Les opérations de prélèvement d'échantillons à effectuer sont les mêmes pour tous les sites d'étude : le site récemment exploité, le site réhabilité âgé de 1an, le site réhabilité âgé de 3ans, le site de référence naturel azonal et le site de référence naturel zonal. L'analyse en laboratoire permettra ensuite de déterminer les éléments chimiques majeurs présents.

Dans le but d'assurer la représentativité des échantillons prélevés, le prélèvement par zone ne se limitera pas en un seul point. Dans chaque zone, 6 points sont choisis au hasard afin d'implanter des minifosses dont la profondeur doit atteindre 50cm. Dans les 6 minifosses, prélever une même quantité de sol de l'horizon humifère (environ de 0-25cm de profondeur) et une autre de l'horizon structural (environ de 25 à 50cm de profondeur⁹). Mettre ensuite les six échantillons de sol prélevés dans l'horizon humifère dans un sceau et les six autres de l'horizon structural dans un autre sceau. Bien mélanger le contenu de chaque sceau et après peser une quantité mélangée de 1kg pour chacun et la mettre dans un sachet plastique incolore portant référence. Effectuer ces opérations au niveau des six (06) sites d'étude. Finalement, il y a donc deux (02) échantillons de sol à analyser pour chaque site d'étude.

Ce sont les éléments chimiques présents dans le sol qui sont déterminés par l'analyse auprès du laboratoire de la FOFIFA à Tsimbazaza-Antananarivo. Toutefois, en raison du coût de l'analyse, ce sont les éléments majeurs qui sont considérés, en l'occurrence :

- pH eau
- Azote Kjeldhal
- Matière organique¹⁰ (C, Walkley Black)
- Phosphore assimilable (Bray II)
- Bases échangeables
- Granulométrie

⁹ La profondeur de 0-50cm est choisie puisqu'en général, l'enracinement des plantes se joue dans cette partie.

¹⁰ La matière organique ou litière intervient dans la fonction physique et trophique du sol mais c'est son apport énergétique qui a le rôle très particulier puisque c'est le point de départ de la chaîne alimentaire complète pour la faune.

Tableau 4: Les méthodes utilisées pour les analyses physico-chimiques en laboratoire

Paramètre analysé	Méthode utilisée
pH	Détermination de la différence de potentiel créée entre une électrode de verre et une électrode de référence
Phosphore assimilable	Réduction par une solution de chlorure stanneux
Granulométrie	Dispersion des particules par une solution diluée de métaphosphate de sodium Détermination de la proportion des sables, des limons et des argiles en se basant sur la vitesse des particules mises en suspension dans un liquide
Bases échangeables	Extraction et détermination des bases échangeables Détermination de la capacité d'échange cationique
Carbone organique	Oxydation des carbones organiques par un excès d'une solution de bichromate de potassium, en milieu acide. L'excès sera ensuite déterminé à l'aide d'une solution de sulfate ferreux
Acidité d'échange	Extraction des cations acides échangeables (Al^{3+} et H^+) dans le sol par une solution normale de KCl à pH neutre
Azote Kjeldahl	Chauffage de la substance avec de l'acide sulfurique concentré qui, à l'ébullition, détruit les matières organiques azotées. Le carbone et l'hydrogène se dégagent à l'état de CO_2 et H_2O , l'azote transformé en ammoniaque est fixé par l'acide sulfurique à l'état de $(NH_4)_2SO_4$

Source : FOFIFA, 2013

4.1.1.3 Traitement et analyse des données

La première étape effectuée est la différenciation puis la détermination des différents horizons observés jusqu'à 1m de profondeur. Les profils sont ensuite comparés et les données y afférentes sont interprétées, particulièrement les paramètres significatifs, tels que : la pente, la couleur, la structure, la granulométrie, le pH et l'enracinement. Les éléments physiques observés sur terrain sont compilés avec les propriétés chimiques résultant des analyses en laboratoire. Enfin, la dernière étape consiste en la classification des types de sols observés.

4.1.2 Etude de l'activité biologique dans les sols

4.1.2.1 Pédofaune

a) Extraction de la pédofaune

Cette étude comprend une observation des activités micro-organiques et un comptage des espèces observées en déterminant son nom vernaculaire, son nom scientifique et sa densité. Pour cela, deux catégories de pédofaune sont considérées: la macrofaune (taille > 4mm) et la mésofaune (taille entre 0,2 à 4mm). (PESSON., 1971)

La mésofaune comprend les invertébrés entre 0,2 et 4 mm qui peuvent être des acariens, des collemboles, des pseudoscorpions, des myriapodes, etc. Tandis que la macrofaune constitue les animaux entre 4 et 80 mm dont : les lombrics, les larves d'insectes, les cloportes, les limaces et escargots, les araignées et les insectes divers.

L'inventaire de la pédofaune est effectué dans chaque site d'intervention, au niveau de 06 minifosses de 25x25x30cm (CHOTTE., 2001) situées autour de la fosse centrale¹¹. Le mode de prélèvement de l'échantillon de sol pour l'inventaire se fait par tranche de 10cm de profondeur d'où trois tranches de sol : la première tranche est de 0 à -10cm, la deuxième de -10cm à -20cm et la troisième de -20cm à -30cm (Raphaël Métral et al., 2007).

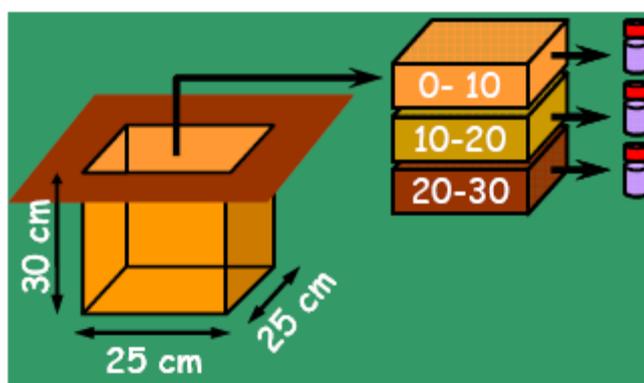


Figure 3: Prélèvement d'échantillons de sol pour l'extraction

L'instrument d'inventaire utilisé est l'appareil de Berlèse¹². Il permet l'extraction de la mésofaune et la macrofaune contenues dans un échantillon de sol. L'échantillon de sol est placé dans un entonnoir au fond duquel se trouve une grille métallique. En plaçant une lampe pendant 3 ou 4 jours au-dessus de l'échantillon de sol, les êtres vivants vont fuir cette source de chaleur et se diriger vers le fond de l'entonnoir et tombe dans le récipient de récupération. Il suffit de placer un bécher contenant de l'alcool pour les récupérer. Les êtres vivants pourront être observés à l'œil nu ou à la loupe binoculaire.

¹¹ La fosse centrale est la fosse pédologique de dimension 1mx1mx1m.

¹²L'appareil de Berlèse a été inventé en 1905 par un entomologiste italien du même nom.



Photo 9: Extraction de la pédofaune par la méthode de Berlèse-Tullgren
Source : cliché de l'auteur, 2013

Remarque :

Afin d'obtenir des meilleurs résultats, nous étions obligés de modifier les caractéristiques du dispositif de Berlèse-Tullgren après avoir effectué trois (03) essais successifs. La puissance des ampoules utilisées est fixée pour 75watts et la durée d'extraction pour 48h soit trois (03) jours. En effet, en utilisant des ampoules de 75watts, au bout de trois (03) jours le sol perd son humidité et la pédofaune présente fuit vers le fond. Les animaux édaphiques sont récupérés par un sceau plastique, l'alcool étant remplacé par de l'eau. En effet, la vapeur d'alcool tue rapidement la mésofaune et certaine macrofaune avant qu'elles ne puissent sortir de l'échantillon de sol et restent désintégrés dans le sol. Après l'extraction par le dispositif conçu, une vérification manuelle en fouillant dans l'échantillon de sol est faite afin de récupérer les animaux qui n'ont pas pu sortir.

b) Traitement statistique

Le paramètre calculé pour la pédofaune est l'abondance qui représente le facteur quantitatif et exprimé par les différents effectifs obtenus (nombre moyen d'individus collectés) et les densités (nombre moyen d'individus par unité de surface).

Comme l'inventaire est effectué par strate de 10cm de profondeur, la densité calculée est exprimée par le nombre moyen d'individus par unité de volume de strate.

$$d \text{ (ind/m}^3\text{)} = \frac{n}{0,00625}$$

Avec n : nombre d'individu présent dans une strate pour une répétition

0,00625 : volume d'une strate (0,25mx0,25mx0,1m)

Pour chaque site d'étude, la normalité a été préalablement vérifiée au moyen du test de Wilk-Shapiro ($n \leq 30$) au seuil significatif de 0,05. Une analyse multivariée a été effectuée en utilisant l'ANOVA. La densité moyenne des populations dans les différentes parcelles au niveau des différents sites d'étude a été comparée en utilisant le test non paramétrique de Kruskal-Wallis/Friedman (comparaison de k échantillons avec $k = 6$) au seuil significatif de 0,05 : ce test sert à vérifier la

significativité des différences en supposant que les échantillons ne suivent pas la loi normale. Ces analyses statistiques ont été réalisées avec XLSTAT 2008 et R 2012. Afin de faciliter le traitement statistique, les données qualitatives ont été quantifiées.

Tableau 5: Quantification des sites d'étude, des strates et des classes de taille

Données qualitatives		Code
Site d'étude	Zonale	1
	Azonale	2
	Rehab 3ans	3
	Témoin 3ans	4
	Rehab 1an	5
	Mine	6
Strate	0 à 10	1
	10 à 20	2
	20 à 30	3
Classe taille	Mésafaune	1
	Macrofaune	2
	macro-mégafaune	3

Tableau 6: Les ordres de pédofaune et leur classe de taille correspondante

Ordre	Code	Classe taille correspondante
Collemboles	1	1
Lombrics	2	2
Scolopendres	3	2
Coléoptères (larves)	4	2
Hyménoptères	5	1
Annélides	6	3
Iulidés	7	2
Oribates	8	1
Coléoptères (adultes)	9	2
Araignées	10	2
Isopètes	11	2
Cloportes	12	2

4.1.2.2 Communauté microbologique

a) Prélèvement d'échantillons

Il sert à déterminer la biomasse microbienne de l'échantillon ainsi qu'à indiquer la présence de mycorhizes et de spores.

Dans chaque site d'étude, trouser six (06) minifosses. Dans chaque minifosse, le prélèvement d'échantillon de sol est effectué sur l'intervalle de profondeur de 0 à 15cm en dessous du sol. La quantité d'échantillon prélevé dans chaque minifosse est la même pour les 06 minifosses. Ces échantillons sont ensuite mis dans un même sceau. Après avoir effectué le mélange, peser une quantité de 500g et l'emballer dans un sachet plastique transparent portant référence. Ainsi, l'échantillon est prêt pour l'analyse en laboratoire. L'analyse en laboratoire au CNRE consiste à déterminer les éléments suivants :

- Communauté mycorhizienne
- Biomasse microbienne totale
- Actinomycètes
- Azotobacter

Tableau 7: Méthodes d'analyses en laboratoire

Paramètre analysé	Méthode d'analyse
Dénombrement des groupes des microorganismes spécifiques	Dénombrement par la méthode des suspensions-dilutions des groupes microbiens : Actinomycète, Azotobacter
Dénombrement des spores de champignons endomycorhiziens	Méthode de Sieverding (1991) : extraction des spores à partir des échantillons de sol (100 g) par des séries de tamisage (200 µm, 100 µm, 80 µm et 50 µm) sous un jet d'eau
Analyses enzymatiques	Protocole de la fluorescéine diacetate (tampon : potassium phosphate au pH 7,6)

Source : CNRE, 2013

b) Traitement et analyse des données

Nous n'avons pas pu effectuer de traitement statistique puisque les échantillons de sol appartenant au même site sont mélangées afin d'obtenir un (01) seul¹³. Et c'est ce dernier qui a été analysé aux laboratoires. Pourtant, nous avons procédé par la comparaison des moyennes des paramètres analysés pour la comparaison des sites d'étude. On peut dire que les échantillons sont représentatifs grâce aux six (06) répétitions. Par ailleurs, on ne peut pas en déduire l'existence de différence significative entre les sites d'étude puisque les écart-types ne sont pas connus.

4.2 Hypothèse 2 : Les caractéristiques de la végétation sur sites réhabilités évoluent vers celles de la forêt naturelle

4.2.1.1 Inventaire floristique

L'inventaire floristique est effectué dans une placette carrée de 10mx10m ayant comme centre la fosse pédologique. L'objectif étant d'évoquer la relation sol-végétation, pour chaque fosse correspond une placette d'inventaire floristique. La méthode d'inventaire par compartimentation est choisie pour pouvoir apprécier la structure dans tous les étages (inspirée de RAJOELISON, 1997).

Pour cela, il sera important de bien préciser lorsqu'il s'agit d'une espèce indicatrice de fertilité du sol et/ou d'une espèce indicatrice de présence d'eau. La technique d'inventaire utilisée est l'inventaire par compartimentation. Pour cela, dans la placette d'inventaire (A) ayant une dimension de 10mx10m, on inventorie les grands arbres de diamètre supérieur à 10cm, ceux de diamètre compris entre 5cm et 10cm seront inventoriés dans une placette moyenne (B) de 5mx5m et pour la régénération, elle sera inventoriée dans une petite placette (C) de 2mx2m.

¹³ La minimisation du nombre d'échantillons à analyser est due au fait que le coût des analyses en laboratoire est très élevé.

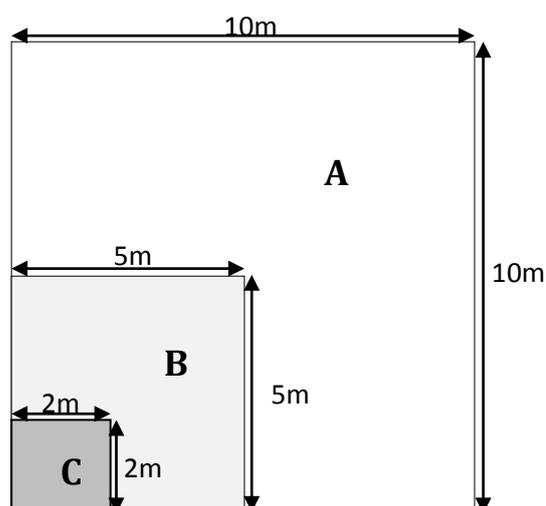


Figure 4: Inventaire floristique par compartimentation

Remarque : Aucun inventaire floristique n'a été effectué dans le site miné servant d'état zéro puisqu'il n'y existe pas de végétation. La parcelle témoin est envahie par des savanes herbeuses dont la liste des espèces a été relevée.

4.2.1.2 Traitement et analyse des données

Les paramètres à ressortir sont : la composition floristique, la densité, la structure totale et la structure verticale.

- Pour la composition floristique, nous avons ressorti la liste des familles existantes sur chaque site d'étude afin de comparer leur présence/absence.
- La connaissance de l'intervalle de diamètre et de l'intervalle de hauteur des plantes permet de comparer la capacité de chaque site en termes de croissance de la végétation.
- La densité : comme l'inventaire floristique a été effectué sur des placettes ayant chacune une superficie de 100m^2 équivaut à 1are. Le nombre d'arbres comptés est ensuite rapporté à l'hectare (Fiche technique de mesures en sylviculture n°56).

Tableau 8: Calcul de la densité

Compartiment	Dimension	Surface (m^2)	Densité
A	10mx10m	100	$N_i \times 100$
B	5mx5m	25	$N_i \times 400$
C	2mx2m	4	$N_i \times 2500$

Avec : N_i = nombre d'individus
 $1\text{ha} = 10000\text{m}^2$

5 Cadre opératoire

<p>Objectif global : Evaluer la réussite ou l'échec de l'essai de réhabilitation effectuée par Ambatovy par l'analyse de l'évolution pédologique et biologique des sites d'essai d'âges différents.</p>				
<p>Problématique : Comment évolue l'état pédologique et biologique des sites réhabilités à Ambatovy et quels sont les indicateurs permettant d'améliorer l'efficacité des activités de restauration en se référant à ces paramètres?</p>				
Hypothèses	Methodologie	Paramètres à observer	Dispositif de collecte de données	Résultats attendus
<p>H1 : Les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols des sites réhabilités évoluent vers celles de la forêt naturelle</p>				
<p><i>S/H 11 : Cette évolution est observée sur les propriétés physico-chimiques du sol de chaque site</i></p>	<p>Effectuer un examen de fosse pédologique dans chaque site</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Profil pédologique : texture, structure, porosité, couleur du sol - Consistance des agrégats - Enracinement - pH 	<ul style="list-style-type: none"> - une fosse pédologique de 1mx1m et de profondeur variable (RANDRIAMBOAVONJY) 	<p>Le profil et la structure pédologique des sols des sites réhabilités, du sol décapé récemment exploité et de la référence naturelle sont comparés.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> - Déterminer la composition chimique des sols de chaque site. - Comparer les résultats d'analyse. 	<ul style="list-style-type: none"> - Azote Kjeldhal - Matière organique (C, Walkley Black) - Phosphore assimilable (Bray II) - Bases échangeables - Granulométrie 	<ul style="list-style-type: none"> - 6 minifosses de dimension favorable mais de 50cm de profondeur dans chaque site d'étude - Prélèvement d'échantillons dans l'horizon humifère (environ à 0-25cm de profondeur) - Prélèvement d'échantillons dans l'horizon structural (environ à 25-50cm de profondeur) - Analyse en laboratoire (FOFIFA) des échantillons (1kg/échantillon). 	<p>L'évolution de la composition chimique des sols des sites réhabilités est déterminée puis comparée à celle des deux autres zones.</p>

<p><i>S/H 12 : Cette évolution est observée sur l'activité biologique dans le sol de chaque site</i></p>	<p>Inventorier la macrofaune et la mésofaune de chaque site d'étude pour ensuite comparer les résultats d'inventaire.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Activité pédofaunique - Espèce - Taille - Densité - Macrofaune (>4mm) - Mésofaune (taille entre 0,2 à 4mm) (PESSON., 1971) 	<ul style="list-style-type: none"> - 06 minifosses de 25x25x30cm (CHOTTE., 2001) situées autour de la fosse centrale et incluses dans la placette d'inventaire. - prélèvement d'échantillons de sol par tranche de 10cm de profondeur: la première tranche est de 0 à -10cm, la deuxième de -10cm à -20cm et la troisième de -20cm à -30cm. - technique d'inventaire de Berlèse : entonnoir, lampe, béccher, loupe 	<p>La présence de pédofaune après réhabilitation des sites est observée puis comparée avec celle d'avant exploitation et celle d'après exploitation.</p>
	<p>Déterminer la communauté mycorhizienne et la biomasse microbienne dans les sols de chaque site</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Biomasse microbienne - Communauté mycorhizienne - Spores - Actinomycètes - Azotobacter 	<ul style="list-style-type: none"> - 06 minifosses de 25x25x30cm autour de la fosse centrale (CHOTTE., 2001) - prélèvement d'échantillon de sol sur l'intervalle de profondeur de 0 à 15cm en dessous du sol - prélèvement au niveau des cinq (05) sites d'étude - 06 échantillons de sol (500g/échantillon) emballés, prêts à être analysés au laboratoire du CNRE. 	<p>L'évolution microbiologique au niveau des sites réhabilités est évaluée puis comparée aux deux autres zones.</p>
<p><i>Hypothèse 2 : Les caractéristiques de la végétation sur sites réhabilités évoluent vers celles de la forêt naturelle</i></p>				
<p><i>Les caractéristiques de la végétation sur sites réhabilités évoluent vers celles de la forêt naturelle</i></p>	<p>Effectuer un inventaire floristique.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Composition floristique - Diamètre des arbres - Hauteur des arbres - Densité 	<ul style="list-style-type: none"> - une placette carrée de 10mx10m ayant comme centre la fosse pédologique pour l'inventaire floristique. Pour chaque fosse correspond une placette. (Cours de pédologie générale, 2011) 	<p>Les caractéristiques de la végétation sur chaque site d'étude sont comparés.</p>

6 Schéma récapitulatif de la méthodologie

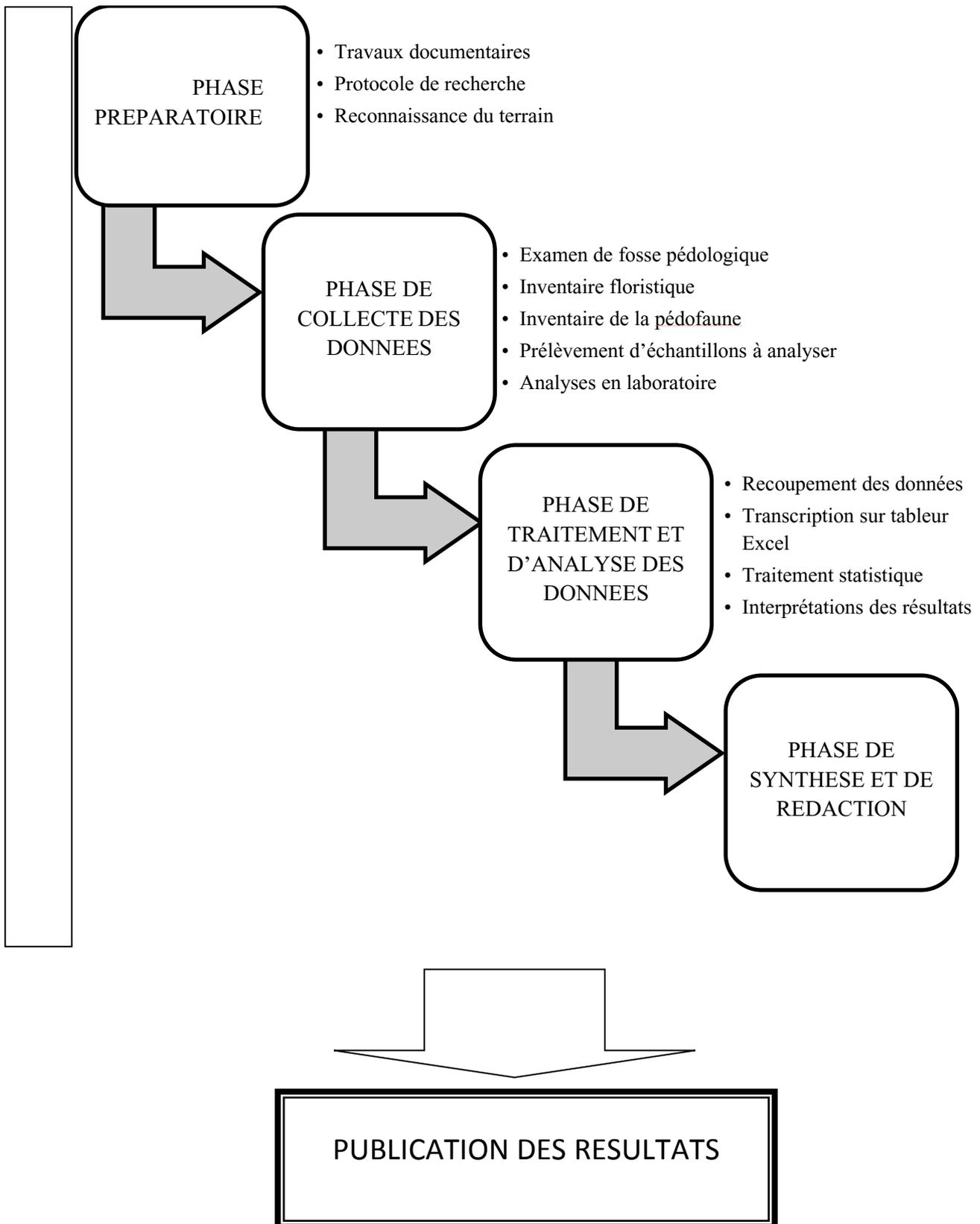


Figure 5: Schéma récapitulatif de la démarche méthodologique

7 Contraintes méthodologiques

7.1 Problème lié à la collecte des données

C'est surtout au niveau de l'inventaire de la pédofaune que nous avons rencontré des difficultés sur la collecte de données.

En effet, après avoir effectués trois essais successifs, nous avons dû modifier l'appareil de Berlèse afin de l'adapter aux conditions locales. Nous avons subi également une difficulté sur la détermination des espèces puisque la clé de détermination s'arrête au niveau de l'Ordre. Cela résulte du fait que les recherches sur la pédofaune sont encore très peu effectuées à Madagascar. Enfin, nous n'avons pas pu relever le poids des individus (macrofaune et mésofaune) faute de matériel.

Toutefois, ces contraintes ont été surmontées et n'affectent pas la fiabilité des résultats.

7.2 Problème lié à l'analyse et traitement des données

Pour les caractéristiques physico-chimiques du sol, dont les paramètres analysées en laboratoires, le traitement statistique des résultats n'est pas possible puisque les échantillons de sol appartenant au même site sont mélangées afin d'obtenir un (01) seul. Et c'est ce dernier qui a été analysé aux laboratoires. Pourtant, nous avons procédé par la comparaison des moyennes des paramètres analysés pour la comparaison des sites d'étude. On peut dire que les échantillons sont représentatifs grâce aux six (06) répétitions. Par ailleurs, on ne peut pas en déduire l'existence de différence significative entre les sites d'étude puisque les écart-types ne sont pas connus ; autrement dit, on peut comparer les moyennes mais on ne peut pas évaluer l'importance de leurs différences.

7.3 Problème lié à l'échelle spatio-temporelle

L'objet de l'étude porte sur l'évolution pédologique des sites réhabilités. Autrement dit, elle requiert des suivis s'étalant sur des décennies ou des millénaires. Ne disposant que des données de trois ans, expliquer des changements de l'état du sol, phénomènes à long terme, par des études à court terme, pourra entraîner des confusions et des risques de mauvaises interprétations.

Partie 3. Résultats et interprétations

1 Evolution des propriétés du sol

1.1 Sur le plan physico-chimique

1.1.1 Propriétés physiques

1.1.1.1 Profil pédologique des sites d'étude

Dans la zone de conservation, un horizon A₀ épais (20cm d'épaisseur) à structure grumeleuse est présent. Cet horizon est marqué par une forte activité biologique avec une densité très forte de l'enracinement, à acheminement vertical et oblique. Pour le type zonal, des couches A grumeleuse et B polyédrique caractérisent le profil. Tandis que pour le type azonale, l'observation des horizons intermédiaires AB polyédrique et BC polyédrique indique le rajeunissement du sol.

La présence de la couche de topsoil servant d'horizon superficiel pour les sites réhabilités les rend favorables à la végétation. La structure de l'horizon BC est semblable à celle de la zone de conservation (structure polyédrique). Cette dernière est très épaisse pour le site réhabilité de 3ans mais devient massive non cohérente en profondeur pour celui de 1an. Alors qu'un horizon à structure massive est difficilement pénétrable par les racines.

Pour le site miné, le profil pédologique est compliqué puisque les différents horizons ne sont pas différenciés et il est impossible de les déterminer.

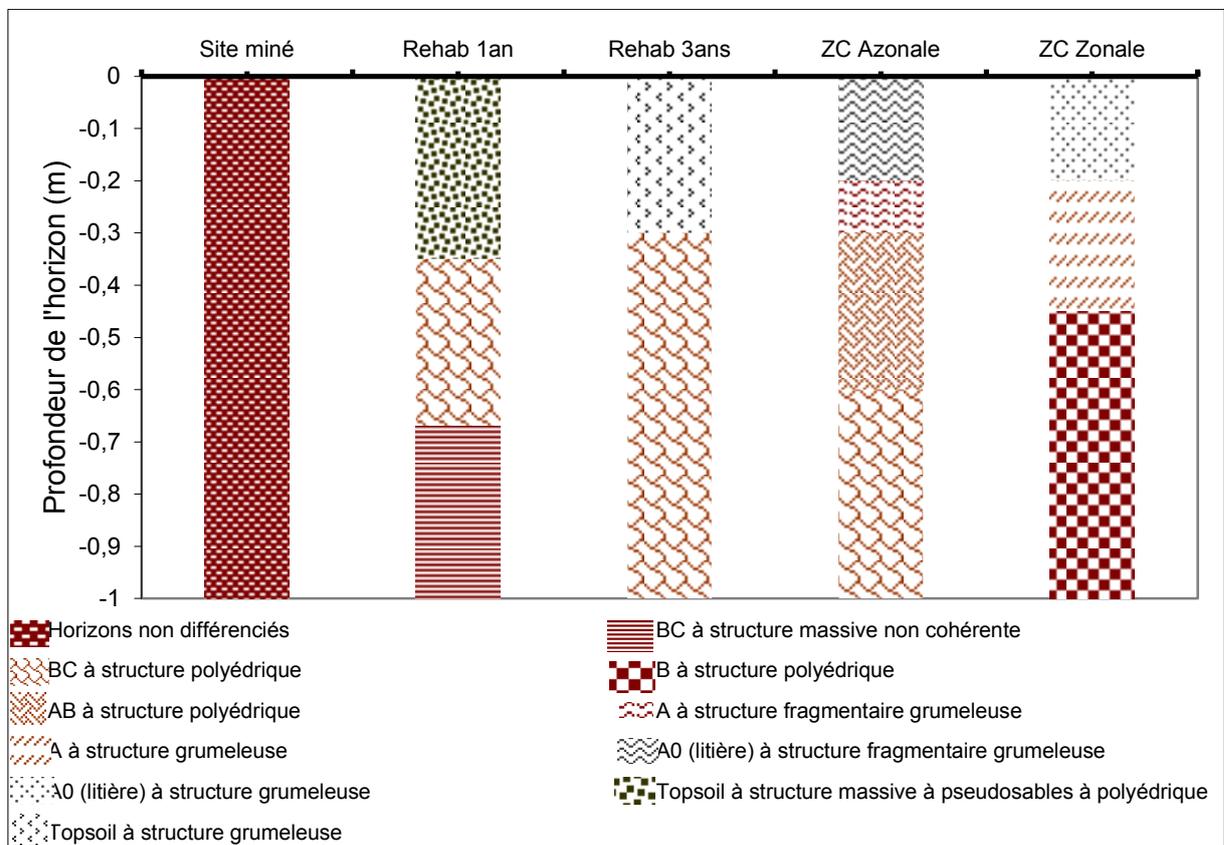


Figure 6: Structure des horizons selon leur profondeur

Après trois ans de traitement de revégétalisation, le site réhabilité a un horizon BC polyédrique succédant le topsoil : les agrégats polyédriques fins constituent un indice favorable vis-à-vis des propriétés physiques (Cours de Pédologie appliquée, 2011). Tandis que la structure particulaire caractérise le profil du site non réhabilité: les éléments constitutifs du sol restent indépendants. Le rajeunissement du sol est très marqué au niveau du site non réhabilité et la différenciation des horizons est très difficile. La faible consistance des agrégats marque la sensibilité du sol à l'érosion.

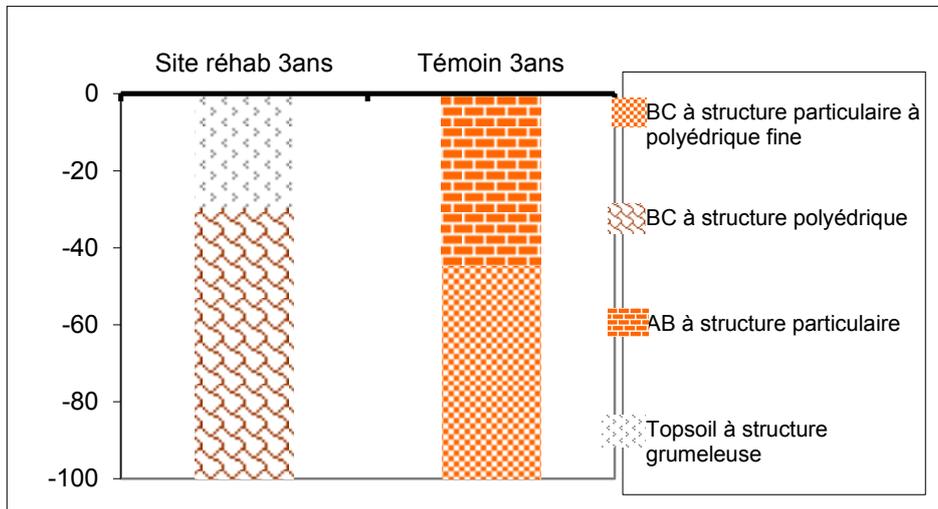


Figure 7: Différence de profil entre site réhabilité et site non réhabilité

1.1.1.2 Granulométrie

Au niveau des deux horizons superficiels, la texture des sites réhabilités est semblable à celle de la zone de conservation zonale (limon argilo-sableux). Par ailleurs, la texture des sites non réhabilités (site miné, témoin nu) et de la zone de conservation azonale est marquée par une faible proportion de l'argile (limono-sableux) d'où une faible capacité de rétention d'eau et des éléments chimiques.

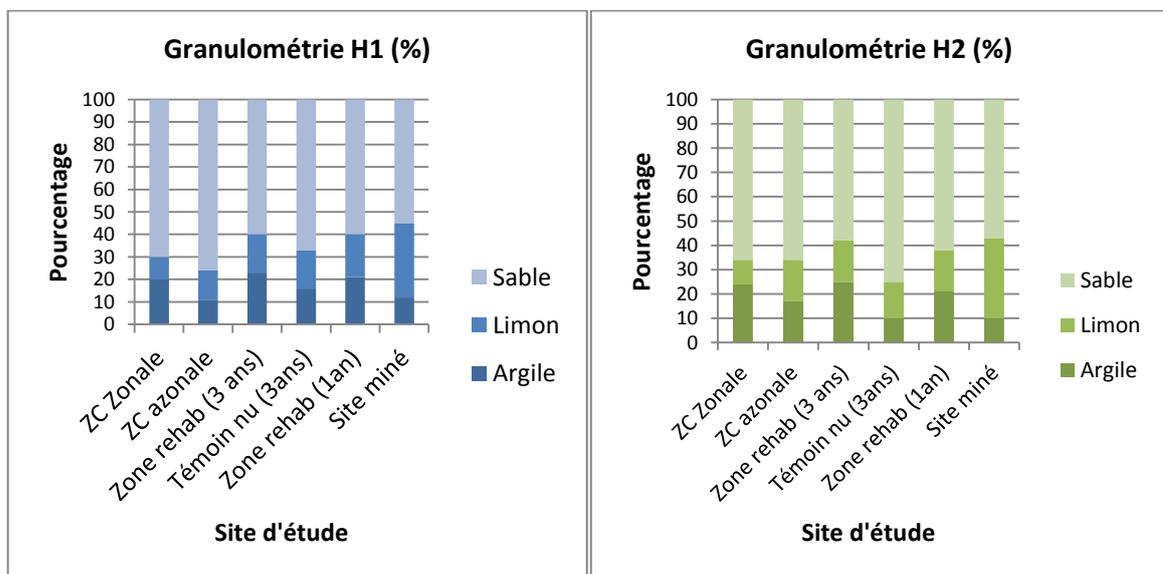


Figure 8: Granulométrie de chaque site

1.1.2 Propriétés chimiques

1.1.2.1 pH eau

La fertilité du sol est conditionnée par le pH. Pour une bonne croissance des plantes le pH du sol doit être moyennement acide, sa valeur doit situer entre 5,5 à la neutralité (Cours de Pédologie appliquée, 2011). Par ailleurs, les sites étudiés sont à acidité élevée excepté le site miné. Seules les plantes appartenant à la famille des ERICACEAE peuvent supporter ce taux d'acidité.

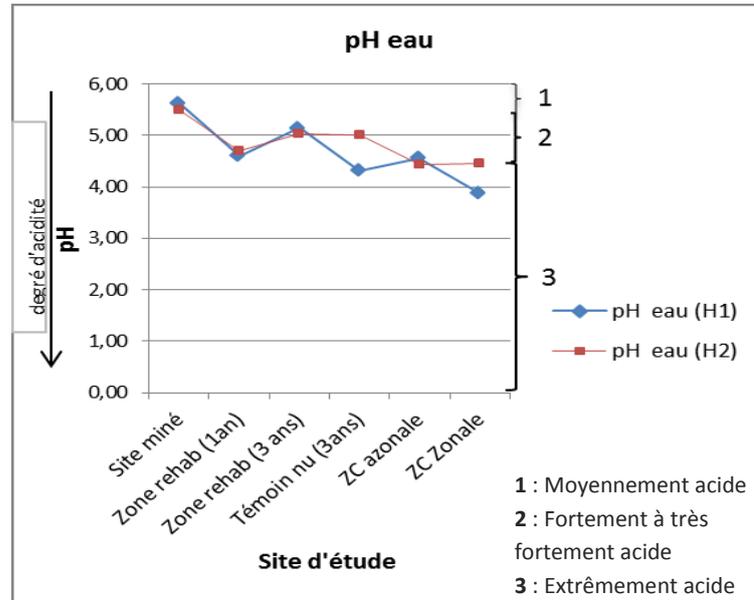


Figure 9: pH eau dans chaque site

1.1.2.2 Rapport C/N

Le rapport C/N est satisfaisant (valeur comprise entre 10 et 20) indiquant une bonne minéralisation de la matière organique dans les sols des sites d'étude sauf pour la zone de conservation azonale et le témoin nu de 3ans où ce rapport est trop fort ($C/N \geq 20$). Cette valeur élevée de C/N pour les deux sites permet de déduire que l'activité biologique y est très peu (tiré du Cours de Pédologie appliquée, 2011).

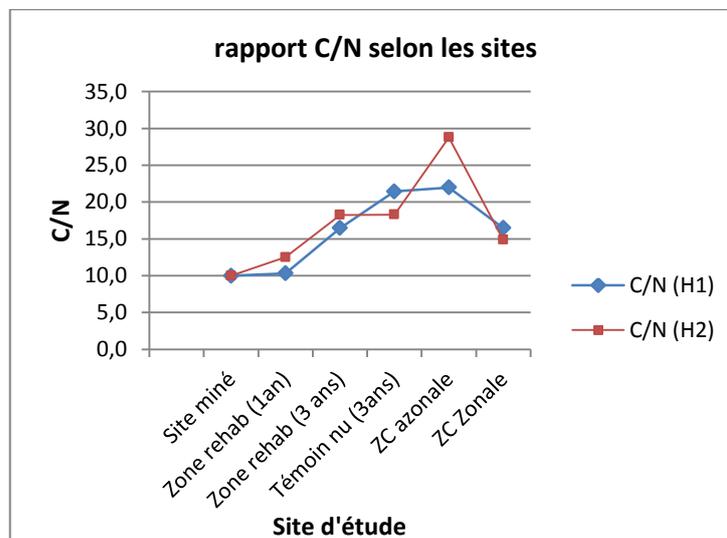


Figure 10: Rapport C/N dans chaque site

1.1.2.3 Phosphore assimilable

Les sites d'étude sont pauvres (teneur ≤ 5 ppm) voire très pauvre (teneur $< 2,5$ ppm) en Phosphore assimilable, sauf l'horizon superficiel de la zone de conservation zonale. Or, le Phosphore joue un rôle particulier dans le transport d'énergie pour les plantes, le développement des racinelles, la floraison et la fructification.

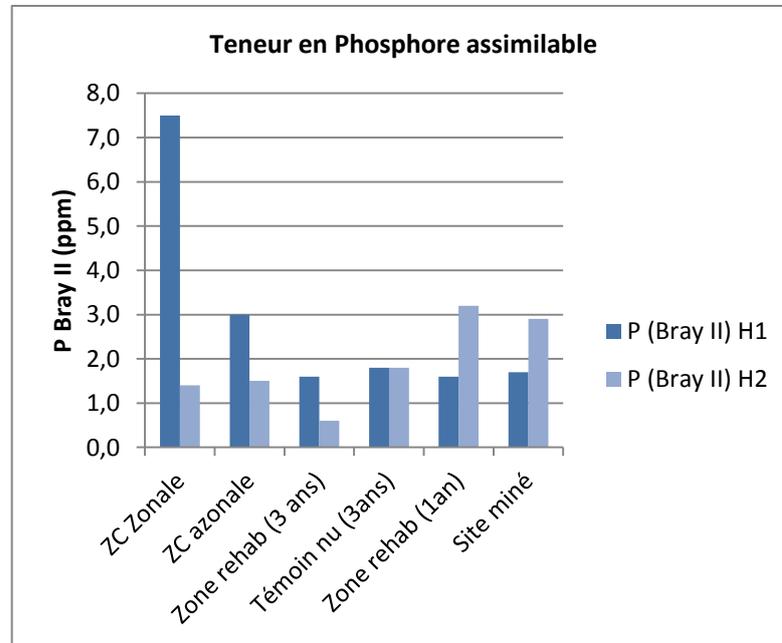


Figure 11: Teneur en Phosphore assimilable dans chaque site d'étude

1.1.2.4 Bases échangeables

Pour le calcium, la teneur normale requise est de 3,5 à 7még/100g. Les sols de tous les sites sont donc très pauvres en calcium puisque leur teneur en calcium est inférieur à 2még/100g. La pauvreté en calcium dans tous les sites est liée avec l'acidité élevée du sol. En effet, le calcium a la propriété de neutraliser l'acide du sol.

Pour le magnésium, la teneur normale requise est de 3 à 8még/100g. Les sols de tous les sites sont donc très pauvres en magnésium puisque leur teneur en calcium est inférieur à 1még/100g. Ce qui est évident puisque dans le sol, la richesse en magnésium s'accompagne de celle du calcium. Par ailleurs, le magnésium est un constituant de la chlorophylle activant les enzymes.

Pour le potassium, la teneur normale requise est de 0,4 à 0,8még/100g. Les sols de tous les sites sont donc très pauvres en potassium puisque leur teneur en cet élément est inférieur à 0,2még/100g. Le potassium assure la résistance aux maladies des plantes.

Pour le sodium, la teneur normale requise est de 0,7 à 2még/100g. Les sols de tous les sites sont donc pauvres en sodium puisque leur teneur en cet élément est inférieur à 0,3még/100g.

Bref, la faible teneur en bases échangeables est pour tous les sites un important inconvénient provoquant la déstabilisation du pH et par conséquent, diminuant la fertilité du sol. En effet, le pH conditionne l'assimilabilité des éléments minéraux.

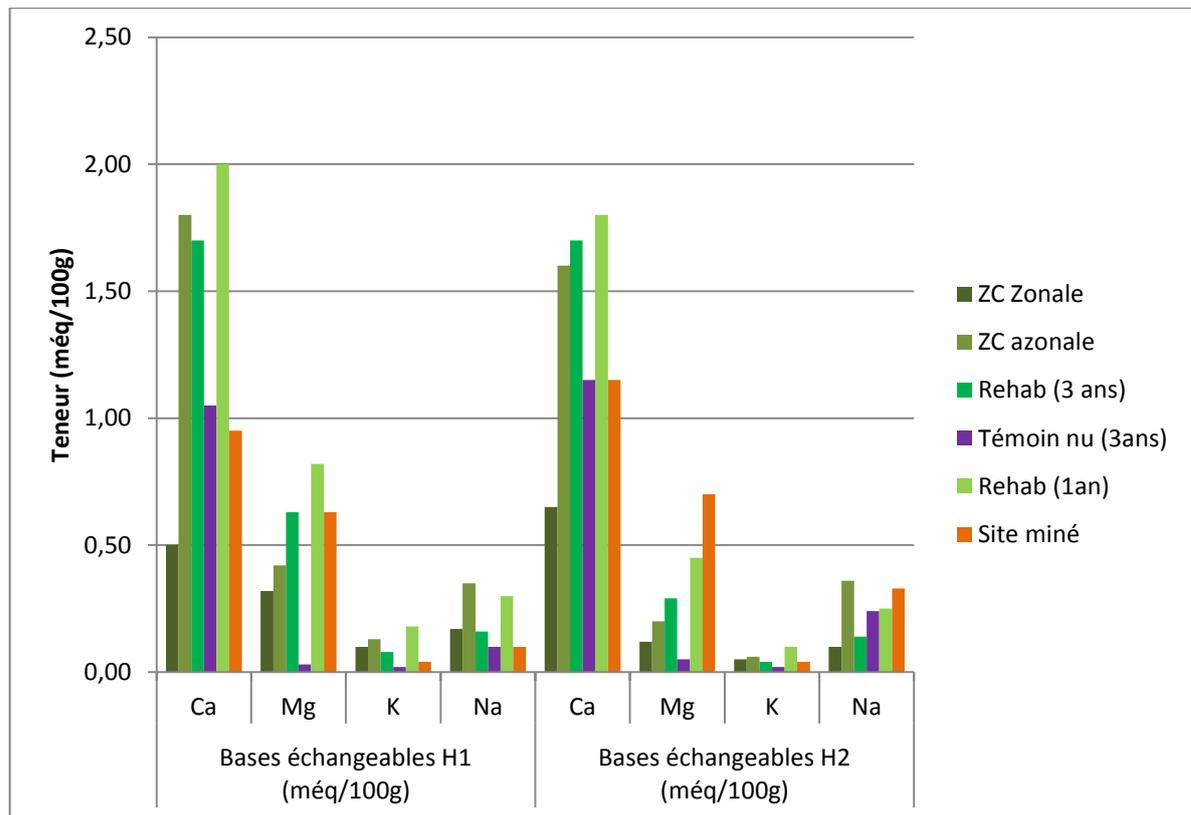


Figure 12: Teneur en bases échangeables des deux horizons

1.1.3 Classification des types de sol

L'analyse des propriétés physico-chimiques a permis de déduire que les sols des sites d'étude appartiennent à trois (03) types :

Tableau 9: Classification des types de sol des sites d'étude

Site	Classification française CPCS ¹⁴	Classification USDA
Zone de conservation zonale	Sol ferrallitique rouge-jaunâtre	Oxisol
Zone de conservation azonale	Sol pisolithique	Intergrade Ultisol-Oxisol
Site réhabilité de 3ans	Sol ferrallitique rajeuni	Ultisol
Témoin de 3ans		
Site réhabilité de 1an		
Site miné		

Le sol *ferrallitique rouge-jaunâtre* ou *sol ferrallitique à structure polyédrique* de la zone de conservation zonale résulte du fait que le site étudié se situe dans la partie basse du mi-versant c'est-à-dire près du bas de pente. Selon la classification USDA, ce sol appartient au type « oxisol » (sol ancien). La zone de conservation azonale est le seul site concrétionné (pisolite) d'où la classification en *sol pisolithique*. Selon la classification USDA, ce type de sol se place en « intergrade ultisol-oxisol ». Les sols des sites réhabilités ainsi que du site miné appartiennent à un même type de sol qui est le *sol ferrallitique rajeuni*, « ultisol » dans la classification USDA.

¹⁴Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols, 1967

1.2 Selon l'activité biologique

1.2.1 Pédofaune

1.2.1.1 Répartition selon les sites

L'effectif total des individus inventoriés est de 2037, répartis dans les six (06) sites différents. La zone de conservation de type zonale étant la plus riche et le site miné ainsi que le témoin les plus pauvres.

Tableau 10: Répartition de la pédofaune

Site	Localisation	Effectif pédofaune inventoriée	Densité (N _i /m ³)
ZC Zonale	Ampangadiantrandraka	1225	32667
ZC Azonale	Ampanatovana	563	15013
Zone Rehab (3ans)	Berano	148	3893
Zone Rehab (1an)	Piste WP Mangoro	101	2693
Témoin nu (3ans)	Analamay	0	0
Site miné	Zone de la mine	0	0
Total		2037	

La présence des cuirasses dans la zone de conservation de type azonal réduit la surface de l'habitat occupé par la pédofaune dans cette zone. Par conséquent, la densité de la pédofaune y est moindre par rapport à celle de la zone de conservation de type zonale.

NB : La valeur de la densité sur le tableau est celle trouvée dans l'ensemble des trois strates.

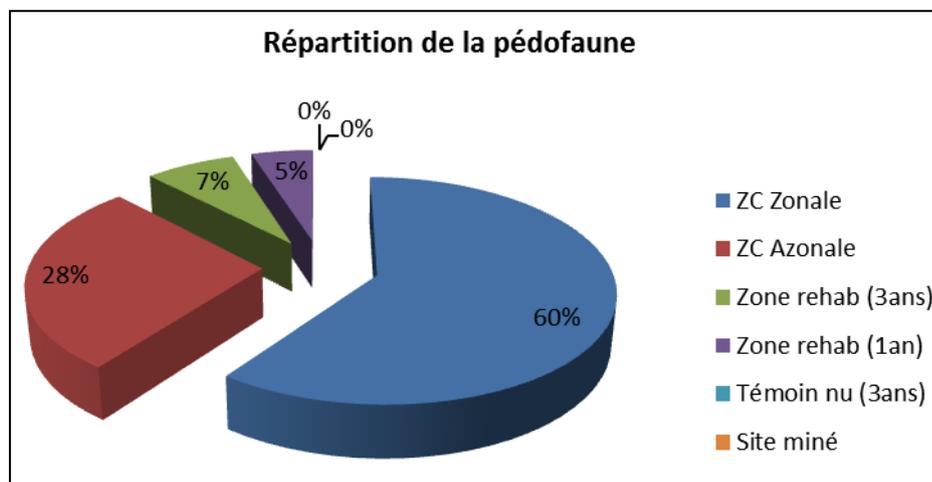


Figure 13: Répartition de la pédofaune selon les sites d'étude (pourcentage)

On déduit qu'après extraction minière, aucune activité biologique n'est observée dans le sol. Sans réhabilitation, en le laissant se reconstituer naturellement durant trois (03) ans, il n'y a encore pas de trace de pédofaune dans le sol. Par ailleurs, en intervenant par l'apport du topsoil et l'implantation de la plantation stratifiée, l'évolution est déjà observée après 1an. Cette évolution est d'autant plus marquée après 3ans.

1.2.1.2 Différence significative des sites d'étude

Les hypothèses adoptées pour ce test de différence sont :

H0 : Les six échantillons ne sont pas significativement différents.

Ha : Les six échantillons proviennent de populations différentes.

Résultat du test de Kruskal-Wallis:

K (Valeur observée)	4756,842
K (Valeur critique)	49,802
DDL	35
p-value (bilatérale)	< 0,0001
Alpha	0,05

Interprétation du test :

Etant donné que la p-value ¹⁵calculée est inférieure au niveau de signification alpha=0,05, on doit rejeter l'hypothèse nulle H0, et retenir l'hypothèse alternative Ha. Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est inférieur à 0,01%. Autrement dit, les six (06) sites d'étude sont significativement différents du point de vue pédofaune.

1.2.1.3 Analyse multivariée

a) Variation de la densité de la pédofaune en fonction des sites

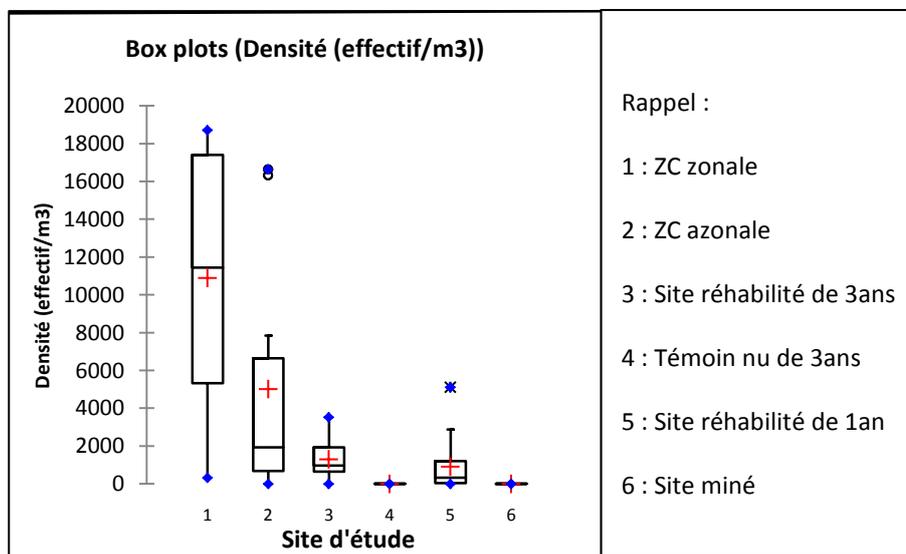


Figure 14: Box plots de la densité selon les sites

Sur cette graphique, il apparaît clairement que la variable « densité » est différente en fonction des sites d'étude. Suivant la densité décroissante de pédofaune : la zone de conservation a la densité de pédofaune la plus élevée, avec le site 1 (zone de conservation zonale) en premier rang, le site réhabilité de 3ans (site 3) les succède avec une densité moyenne qui est plus élevée par rapport à celle du site 1 (site réhabilité de 1an). Les sites 4 (témoin de 3ans) et 6 (site récemment miné) ont une densité nulle.

¹⁵ p-value correspond au degré de signification et alpha au seuil de signification

b) Densité de la pédofaune en fonction de la profondeur des sols

Ce sont les deux strates superficielles (0 à -10cm et -10cm à -20cm) qui abritent le plus de pédofaune au niveau de tous les sites. La troisième strate (-20cm à -30cm) en est la plus pauvre.

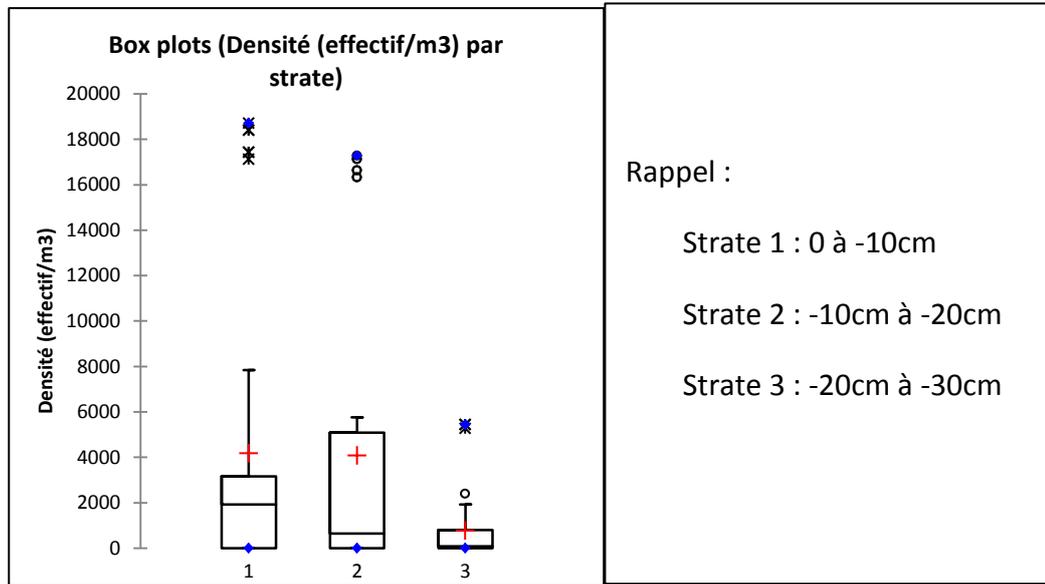


Figure 15: Variation de la densité selon les strates

c) Variation de la densité de la pédofaune en fonction des Ordres

Les Ordres les plus rencontrés sont les ordres 5 et 2 correspondant régulièrement aux Ordres des Hyménoptères et des Lombrics.

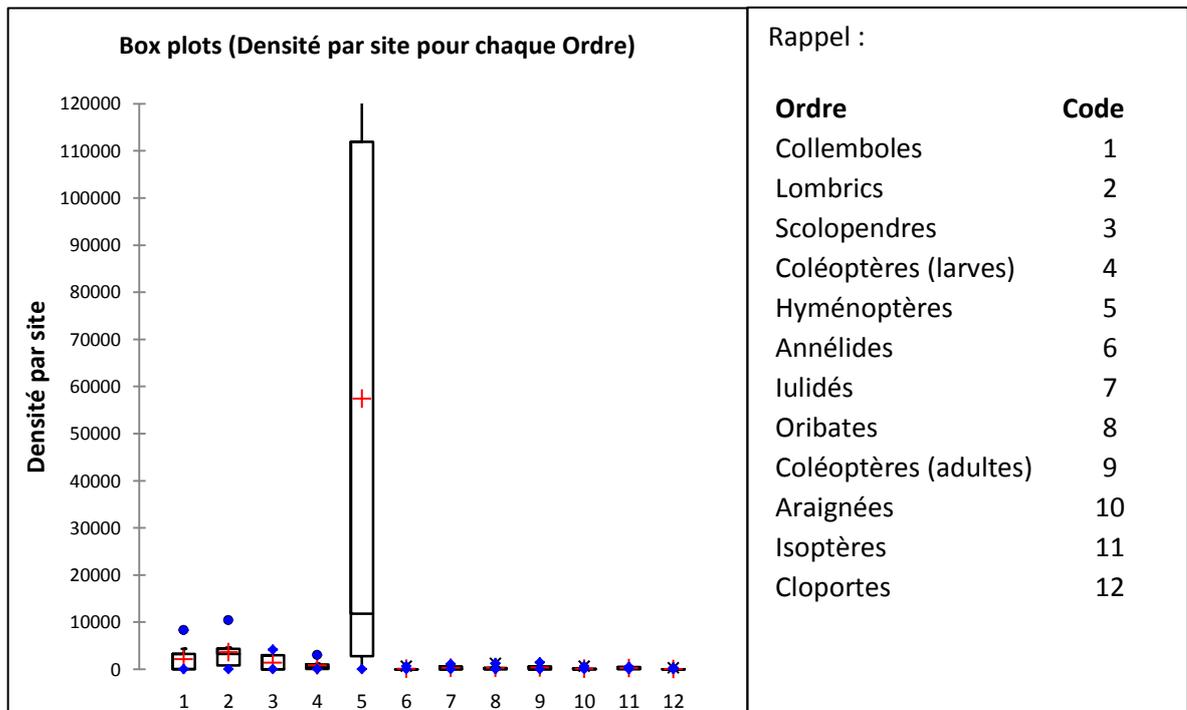


Figure 16: Moyennes des coefficients normalisés de la densité selon les Ordres

Les hyménoptères et les vers de terre ne se contentent pas de répartir les matières organiques dans le profil d'un sol. Parce que le calcium est indispensable à leur métabolisme, les vers de terre font circuler aussi cet élément. On estime que ces animaux, en remontant cet élément vers les couches supérieures, s'opposent au lessivage et par voie de conséquence, à la décalcification des sols.

Leurs déjections sont très riches en potassium, en ammoniacque, en phosphore et en magnésium. Ces éléments sont surtout mieux échangeables et mieux assimilables quand ils ont transité par leur tube digestif que lorsqu'ils sont adsorbés sur les colloïdes argilo-humiques. La faune du sol joue un rôle fondamental d'intermédiaire entre le sol et la plante.

d) *Variation de la densité en fonction des classes de taille*

Dans tous les sites d'étude, la classe de taille dominante est celle n°1 correspondant à la mésofaune. La classe de taille n°3 (macro-mégafaune) est moins abondante et ne se rencontre que dans les forêts naturelles avec une seule espèce appelée localement « hakanjoroko » qui peut atteindre jusqu'à plus de 1m de hauteur.

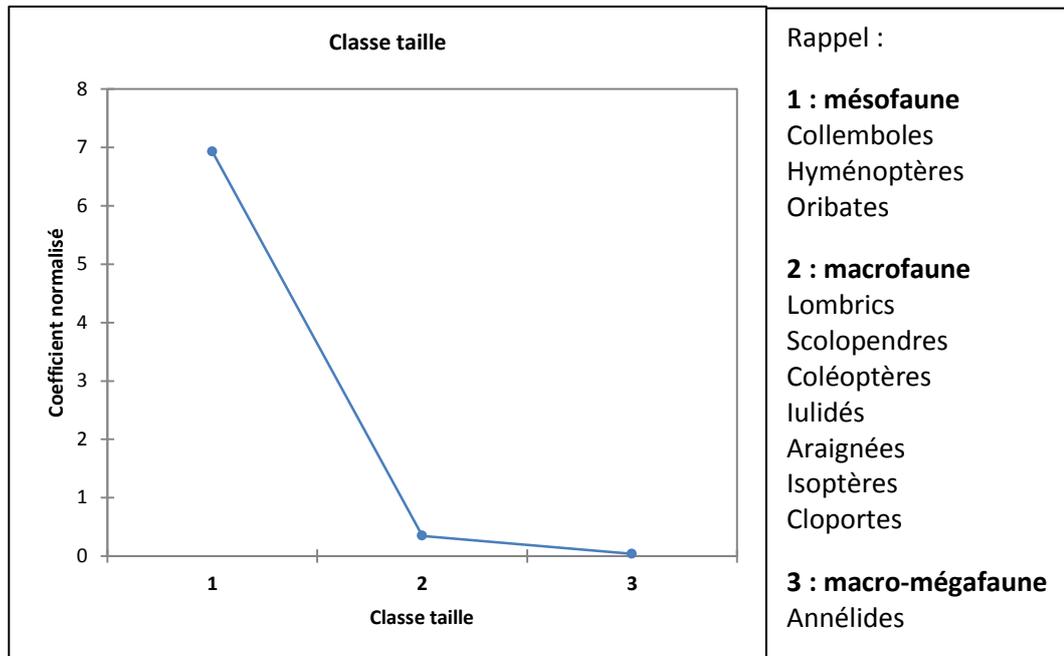


Figure 17: Moyennes des coefficients normalisés de l'effectif selon les classes de taille

1.2.2 Microbiologie

1.2.2.1 Biomasse microbienne

Conformément aux résultats précédents, l'allure de la courbe suivante permet de déduire que l'activité de la biomasse microbienne totale est très faible au niveau du site miné, mais augmente avec le temps sous l'effet de la réhabilitation. La zone de conservation présente la plus forte activité mais l'avantage du type zonal est toujours marqué.

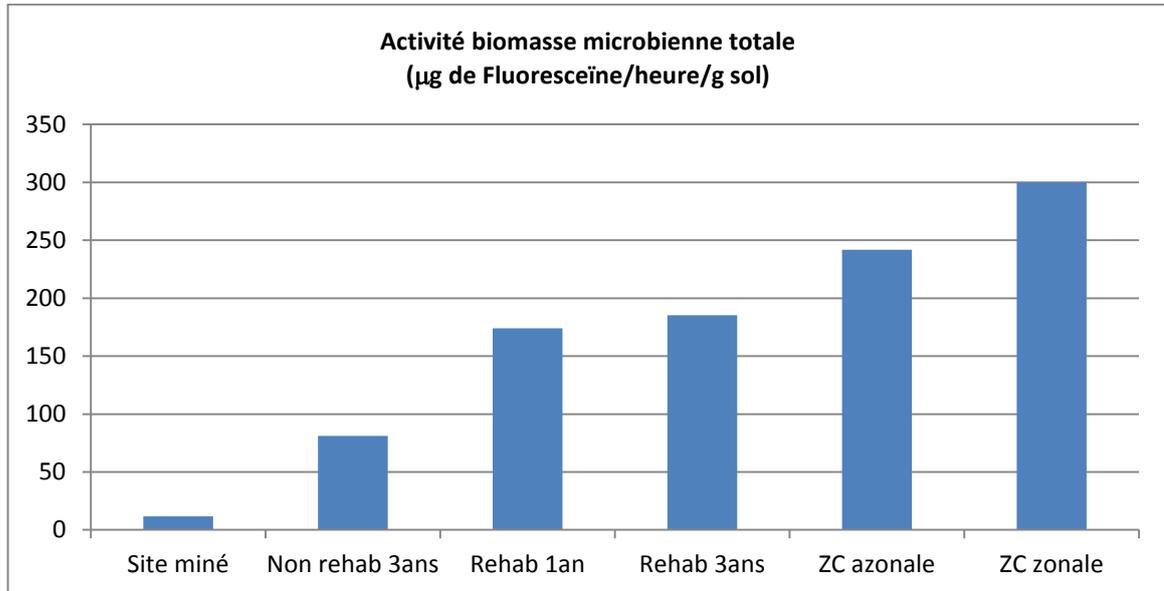


Figure 18: Activité de la biomasse microbienne totale par site

1.2.2.2 Actinomycètes et azotobacter

Tableau 11: Taux en actinomycètes et en azotobacter de chaque site

Site	Actinomycètes (UCF/5g de sol)	Azotobacter (UCF/5g de sol)
Site miné	2667	0
Rehab 1an	5667	4667
Rehab 3ans	1667	10667
Non rehab 3ans	4667	0
ZC azonale	359000	10667
ZC zonale	29667	11667

Le rôle principal des actinomycètes est la décomposition des substances organiques dans les différents écosystèmes dans lesquelles elles se trouvent. Son taux est très élevé dans la zone de conservation surtout au niveau du type azonal. Pourtant, on remarque que celui-ci est très faible au niveau du site réhabilité de 3ans alors que les sites non réhabilités en sont riches.

Les azotobacter sont des bactéries fixatrices d'azote. Elles ne sont pas présentes dans les sites non réhabilités mais se rencontrent dans ceux réhabilités et dans la référence naturelle. Le taux au niveau du site réhabilité de 3ans est supérieur à celui de 1an et est égal à celui de la zone de conservation de type azonal. Cela doit être dû à l'abondance des cuirasses dans ce dernier.

1.2.2.3 Structure des communautés mycorhiziennes du sol

L'une des fonctions majeures des mycorhizes est de permettre aux plantes de s'ajuster aux conditions locales de sol et de s'acclimater (Johnson et al. 2003). Dans le cas de la présente étude, les spores sont rencontrées dans tous les sites. La densité sporale est élevée au niveau de la zone de conservation mais on remarque l'avantage du type azonale. Il est déduit que malgré la présence des cuirasses dans ce type de sol, les plantes peuvent s'y adapter grâce aux spores. Par ailleurs, la densité sporale du site réhabilité de 3ans est inférieure que celle de 1an.

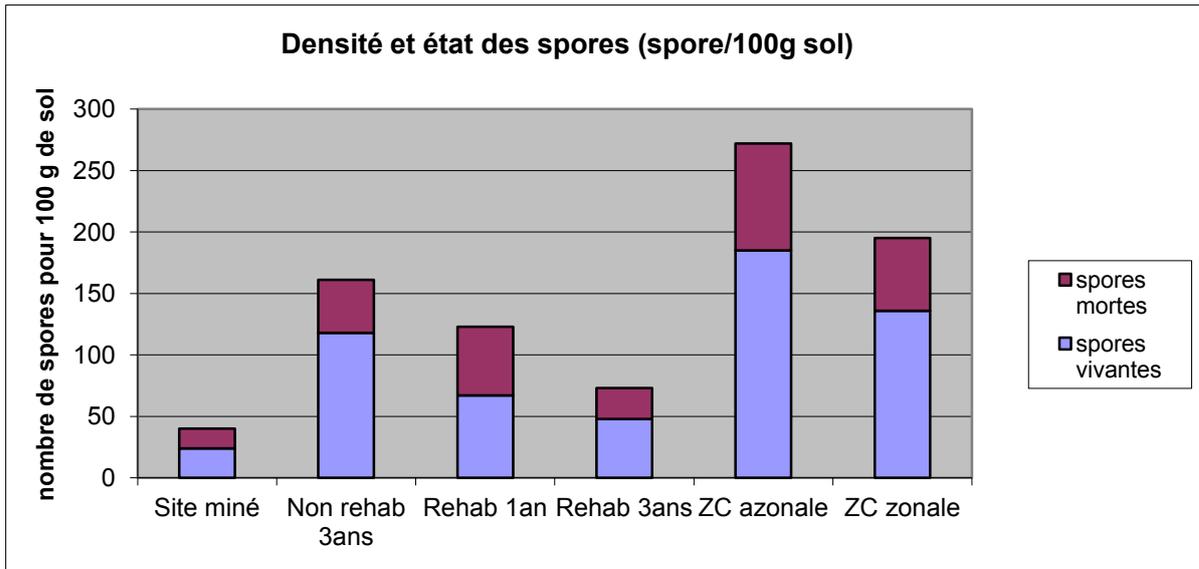


Figure 19: Densité sporale moyenne de chaque site

Les spores des sites d'étude peuvent être regroupées en quatre couleurs : le noir, le marron, le brun et le jaune. Au niveau de la rhizosphère, chaque plante choisit la couleur de spore auquel elle peut s'adapter et ce phénomène est réversible (selon CNRE, 2013). Les spores vivantes sont de couleur brune, jaune ou marron. Les spores mortes sont de couleur noire. Elles représentent presque la moitié de la totalité des spores dans le sol réhabilité de 1an. Pour le sol réhabilité de 3ans ainsi que la zone de conservation, elles représentent le tiers des spores totales.

1.3 Conclusion partielle

Sur le plan physico-chimique, les sols des sites réhabilités sont caractérisés par des horizons de transition succédant la couche de topsoil. Ils sont classés en sols ferrallitiques rajeunis. A partir de 60cm de profondeur, la structure des sols du site réhabilité de 1an est difficilement pénétrable par les racines. Par ailleurs, les sites d'étude ont tous un pH inférieur à 5,5 (acidité élevée), sont pauvres en Phosphore assimilable et en bases échangeables mais le rapport C/N est satisfaisant (varie de 10 à 20).

Selon l'activité biologique dans les sols, la zone de conservation est la plus riche en pédofaune et en biomasse microbienne. Le site réhabilité de 3ans est plus riche par rapport à celui de 1an. La même interprétation est retenue pour le taux en azotobacter mais ne l'est pas pour les actinomycètes ainsi que la structure des communautés mycorhiziennes.

2 Evolution des caractéristiques de la végétation

2.1 Composition floristique

Tableau 12: Liste des Familles dominantes dans chaque site

	Site d'étude					
	ZC zonale	ZC azonale	Rehab 3ans	Témoin 3ans	Rehab 1an	Site miné
Familles dominantes	EUPHORBIACEAE	EUPHORBIACEAE	EUPHORBIACEAE	POACEAE	EUPHORBIACEAE	Aucune
	LAURACEAE	RUBIACEAE	ANACARDIACEAE	ERICACEAE	LILIACEAE	
	MYRSINACEAE	FLACOURTIACEAE	HYPERICACEAE	ASTERACEAE	RUBIACEAE	
	RUBIACEAE	RUBIACEAE	RHAMNACEAE		ASTERACEAE	
	CLUSIACEAE	LAURACEAE	ASTERACEAE		HYPERICACEAE	

Cette liste présente les Familles ayant au moins 10% de représentants dans un site. On remarque que dans les sites réhabilités, comme dans les sites d'état de référence naturel, la Famille des EUPHORBIACEAE domine avec l'abondance des espèces suivantes : *Tannodia perrieri* (hazondomoina), *Thecacoris perrieri* (ranga) et *Suregada boiviniana* (hazomboangy).

Les sites réhabilités ainsi que les forêts naturelles sont composées en majeure partie par des espèces ligneuses arborées (plantation stratifiée). Par ailleurs, n'ayant subi aucun traitement de réhabilitation, la parcelle témoin est envahie par des savanes herbeuses appartenant aux Familles des POACEAE et ERICACEAE. Pourtant, des espèces arbustives de la Famille des ASTERACEAE sont également rencontrées dans ce site : *Psiadia altissima* (dingadingana), *Vernonia garnieriana* (ramanjavona) et *Helichrysum gymnocephalum* (rambiazina).

2.2 Structure totale

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 (Rajoelison, 1997).

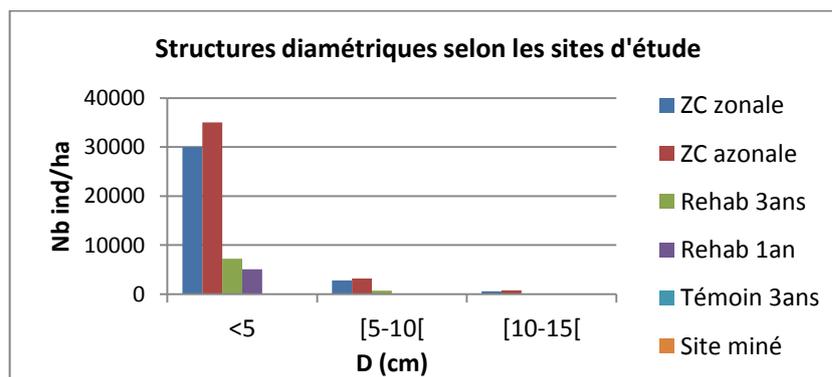


Figure 20: Structures diamétriques selon les sites d'étude

En analysant les structures diamétriques, deux (02) conclusions peuvent être tirées, à savoir :

- il n'y a pas de problème de régénération pour les forêts de référence naturelle
- la croissance en diamètre en fonction de l'âge du peuplement est marquée pour les sites réhabilités

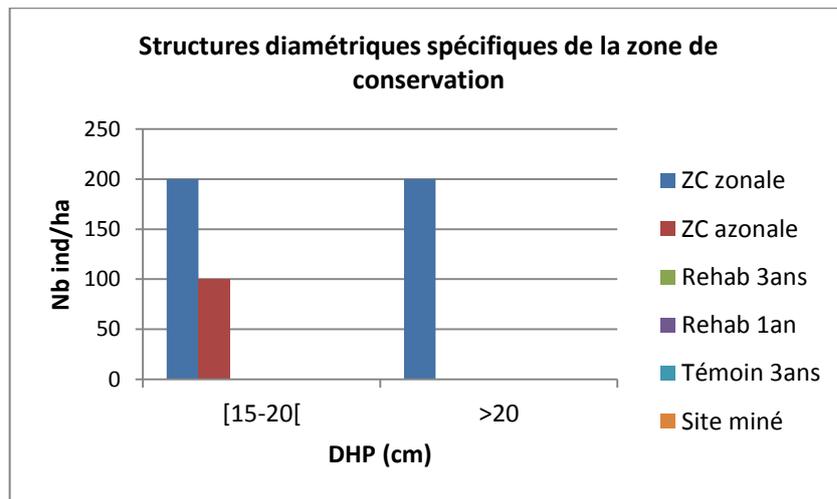


Figure 21: Structure diamétrique spécifique de la zone de conservation

Seule la zone de conservation renferme des arbres de diamètre supérieur à 15 cm. Parmi les deux catégories de zone de conservation, la forêt zonale a la densité plus élevée avec une valeur égale de 200 individus/ha que ce soit pour les arbres ayant un diamètre compris entre 15 et 20cm, soit pour les arbres de diamètre supérieur à 20cm. Tandis que pour la forêt azonale, les arbres n’atteignent pas 20cm de diamètre et la densité des arbres de diamètre compris entre 15 et 20cm est égale à la moitié de celle de la forêt zonale.

2.3 Structure verticale

La structure verticale montre les différentes stratifications qu’il y a au niveau d’une forêt. L’analyse de la structure verticale des sites d’étude a permis de déduire que la hauteur des arbres des sites réhabilités ne dépasse pas encore de 5m. La densité des arbres entre 1et 5m de hauteur dans le site réhabilité de 3ans (1700ind/ha) est élevée par rapport à celle du site réhabilité de 1an (200ind/ha) mais faible par rapport à la zone de conservation azonale (10000ind/ha) et zonale (10000ind/ha).

Pour les deux (02) catégories de zone de conservation, la densité pour chaque classe de hauteur est à peu près semblable sauf pour les arbres de hauteur supérieure à 15m qui ne se rencontrent que dans la forêt zonale (600ind/ha). Concernant la régénération, c’est la forêt azonale qui possède la densité la plus élevée.

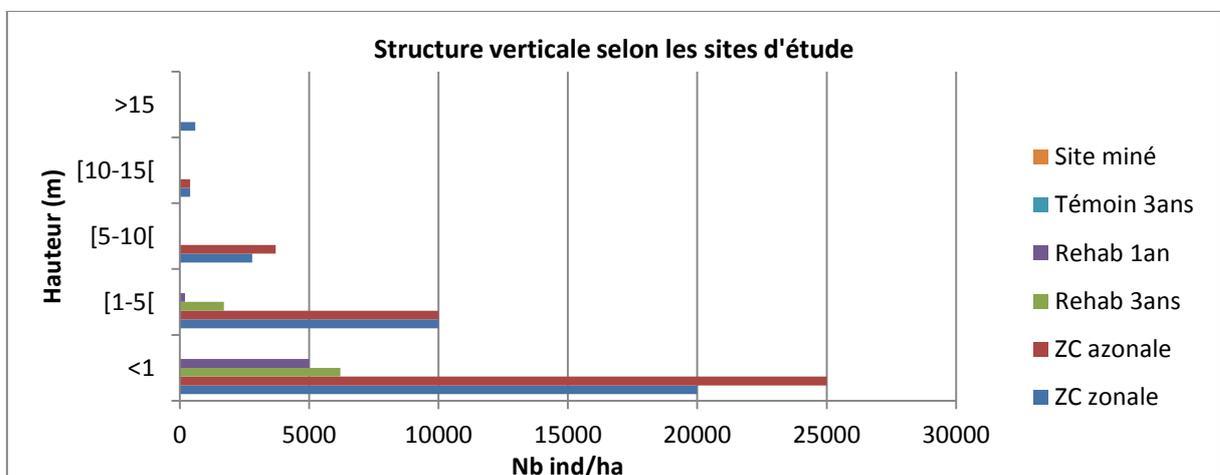


Figure 22: Structure verticale selon les sites d’étude

2.4 Relation sol - végétation

Les sols sous forêts naturelles sont riches en matière organique, les horizons ont une bonne structure facilitant ainsi la pénétration des racines mais la présence des cuirasses dans la forêt azonale affecte la végétation sur les trois structures (floristique, diamétrique et verticale).

La structure verticale permet de comparer facilement les sites d'étude. Ayant un type de sol ferrallitique rajeuni, le site miné ne comporte aucune végétation; alors qu'avec le même type de sol, les sites réhabilités sont caractérisés par la plantation stratifiée dont les arbres sont de hauteur plus élevée pour celui de 3ans (dont la hauteur maximale des arbres est de 1,5m pour celui d'1an mais atteint 2,14m pour celui de 3ans). Sur sol pisolithique, les arbres de la forêt azonale atteignent 15m de hauteur, alors que ceux de la forêt zonale atteignent jusqu'à 20m sur sol ferrallitique rouge-jaunâtre.

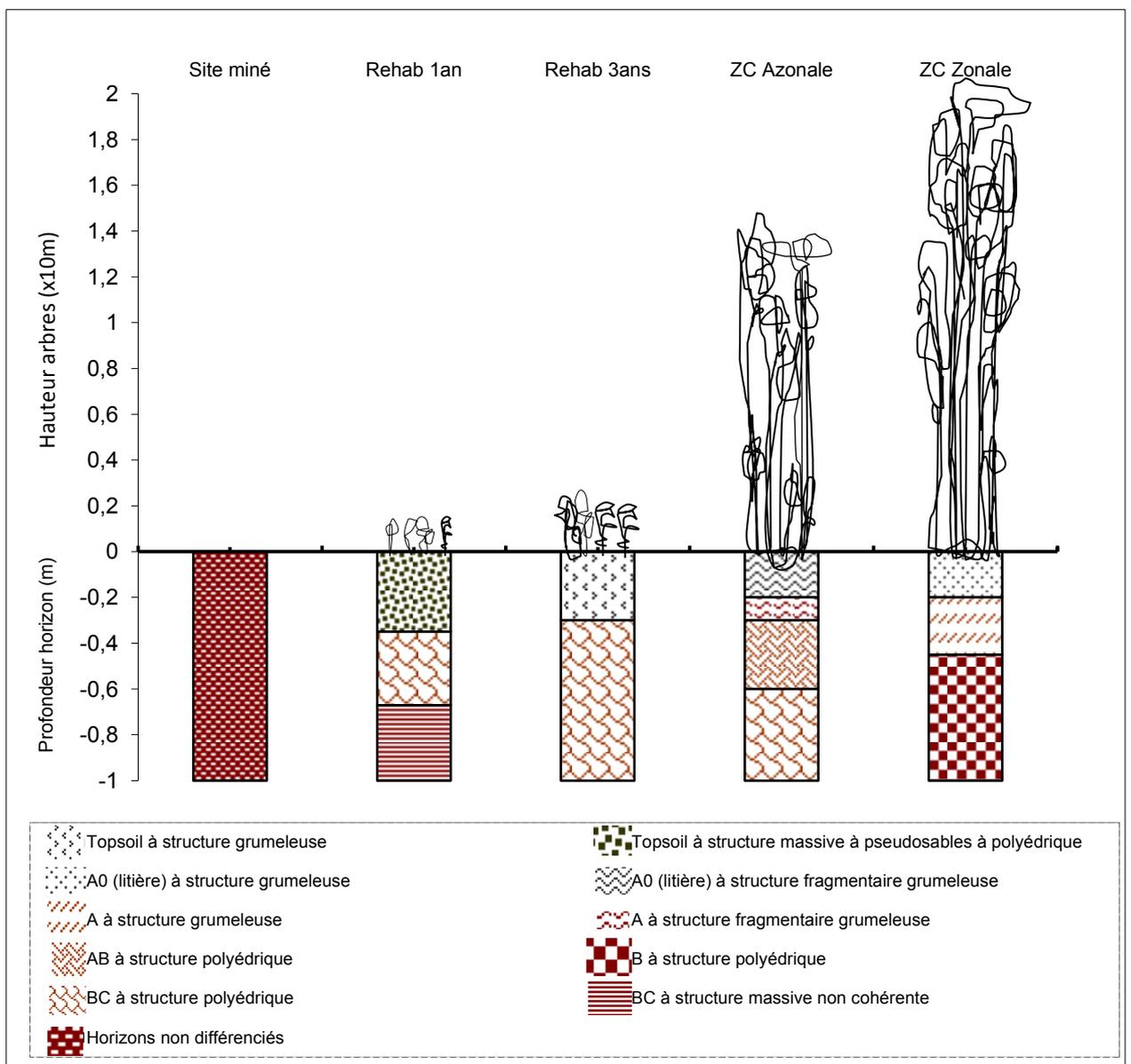


Figure 23: Relation propriétés du sol et végétation pour chaque site

Si le site réhabilité est couvert de plantation stratifiée avec un taux de recouvrement de 43% (archives RestEco, 2012), le témoin nu est envahi par des savanes herbeuses des Familles des POACEAE et ERICACEAE à 5% de taux de recouvrement.

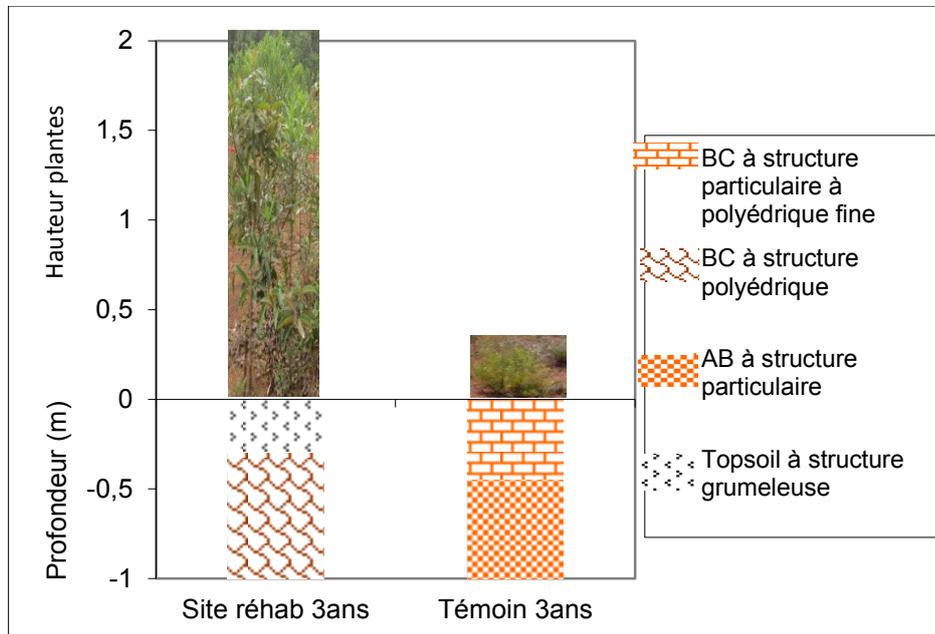


Figure 24: Relation sol-végétation: contraste site réhabilité et site non réhabilité

2.5 Conclusion partielle

Dans les sites réhabilités, comme dans les sites de référence naturelle, la Famille des EUPHORBIACEAE domine. Possédant un type de sol ferrallitique rajeuni, le site miné ne comporte pas de végétation; alors qu'avec le même type de sol, les sites réhabilités sont caractérisés par la plantation stratifiée dont les arbres sont de hauteur plus élevée pour celui de 3ans. Sur sol pisolitique, les arbres de la forêt azonale atteignent 15m de hauteur. Ceux de la forêt zonale atteignent jusqu'à 20m de hauteur sur sol ferrallitique rouge-jaunâtre. Dans les sites réhabilités, le diamètre des arbres est fonction de l'âge du peuplement. Seule la zone de conservation renferme des arbres de diamètre supérieur à 15 cm mais rares sont les arbres qui atteignent le diamètre minimal exploitable.

Partie 4. Discussions et recommandations

1 Discussions sur les résultats

1.1 Propriétés physico-chimiques et biologiques des sols

1.1.1 Physico-chimie

1.1.1.1 Sols d'Ambatovy : à caractéristiques similaires avec celles des autres sites miniers

Le rajeunissement des sols est marqué par la dominance des horizons de transition. Les massifs miniers peuvent être des sols ferrallitiques rajeunis par érosion ou ferrallitiques cuirassés (Laroche O., 2012). Le premier est principalement retrouvé sur les crêtes et les pentes et représente des sols très érodés et donc peu profonds (L'Huillier et *al.*, 2010). Quant au deuxième type de sols, il est principalement retrouvé en position de plateau. Celui-ci est caractérisé par une forte désaturation en éléments échangeables comme K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ (L'Huillier et *al.*, 2010) impliquant une croissance difficile des plantes (Hopkins, 2003). Les sols des sites réhabilités d'Ambatovy sont à acidité élevée, pauvres en éléments échangeables et présentent des cuirasses.

La faible présence d'argile minéralogique fait aussi en sorte que les sols des massifs miniers présentent un faible pouvoir tampon et donc, possèdent un équilibre chimique très instable (Latham, 1981). Dans notre cas, cela est très marqué au niveau du site miné et du témoin non réhabilité. Leur capacité de rétention hydrique est également faible du fait de la grande porosité du sol. Son point de flétrissement relativement faible rend difficile la revégétalisation (Jaffré, 1974).

1.1.1.2 Risques de toxicité

La teneur de quelques métaux tels que le nickel, le manganèse, le chrome et le cobalt dans le sol d'un site minier peut être suffisamment importante pour devenir toxique (L'Huillier et *al.*, 2010). Cependant, cette toxicité dépend de leur phytodisponibilité, elle-même dépendante de nombreux facteurs tels que l'équilibre ionique de la solution aqueuse du milieu, du pH, de la teneur en manganèse, des sécrétions racinaires et des micro-organismes (populations bactériennes, mycorhizes, etc.) (Ross, 1994; Proctor and Gowan, 1976).

1.1.2 Activité biologique

1.1.2.1 Pédofaune

a) Un important bioindicateur se trouvant dans l'horizon superficiel

La biodiversité dans le sol joue un rôle important dans le fonctionnement écologique des écosystèmes terrestres (Seastedt 1984, Lavelle & Spain 1991). Aussi plusieurs auteurs s'accordent pour affirmer le rôle des organismes du sol en tant que bioindicateur de l'état de santé des différents écosystèmes qu'ils soutiennent (Lebrun et van Straalen, 1996 ; van Straalen, 1998 ; Paoletti, 1999,

Parisi et al. 2005 ; Tondoh et al. 2007). Cependant pour plusieurs raisons les connaissances sur les différentes formes de vie dans le sol sont loin d'être maîtrisées. L'une des causes les plus évidentes est le manque de données taxonomiques permettant leur description (André et al, 2002). L'analyse par strates (0-10, 10-20, 20-30cm) a mis en évidence une plus forte présence des organismes dans les premiers centimètres du sol. Les 10 premiers centimètres du sol forestier abritent des effectifs supérieurs pour les collemboles, les hyménoptères et les vers de terre (tous stades confondus) (André et al, 2002). Dans le cas des sites réhabilités d'Ambatovy, ces derniers sont présents en grand nombre dans les 20 premiers centimètres des sols.

b) Interface substrat-plante-pédofaune

Selon Merciris & Imbert (2007) le type de sol et le type d'espèces d'arbres influencent l'abondance et la diversité en pédofaune du sol. Pour le site réhabilité âgé de 1an situé à la piste water-pomp de Mangoro, les minifosses n°5 et n°6 n'abritent presque pas de pédofaune. Nous avons remarqué que ces minifosses ont été installées dans les zones à compost mais pas à topsoil. La pédofaune y est très rare puisque le compost utilisé est de mauvaise qualité (des débris de végétaux pas encore décomposés). Ainsi, la pédofaune est également un indicateur du topsoil.

c) Technique de Berlèse : résultats incertains

Pour l'extraction de la macrofaune et de la mésofaune, le système le plus couramment utilisé est le dispositif de Berlèse-Tullgren. Son faible taux du rendement est admis par plusieurs auteurs (Forsslund 1948 : 26% ; André et al. 2002 : 7%), même si cette méthode paraît plus pratique pour les sols tropicaux (L'Huillier et al., 2010). En se contentant de la dite technique, la fiabilité des résultats de notre étude pourrait être incertaine. C'est pourquoi, après leur passage à l'extracteur de Berlèse, les échantillons de sol ont été fouillés afin de vérifier s'il y a encore de la pédofaune qui y reste.

d) Ordre des Cloportes : particularité de la forêt azonale

L'Ordre 12 qui est l'Ordre des Cloportes n'est rencontré qu'au niveau du site 2 (zone de conservation azonale), dans les zones fortement cuirassées. Ce qui permet de remettre en question si la survie des animaux appartenant à cet Ordre dépend de la présence des cuirasses.

1.1.2.2 Communauté microbiologique

a) Des densités de spores dans le sol conformes aux résultats d'autres études

La densité des spores de champignons mycorrhiziens déterminée dans les différentes expériences disponibles dans la littérature est très variable. Certains ont rapportés des valeurs comprises entre 100 et 500 spores par 100grammes de sol forestier, ou entre 900 et 8900 spores par 100grammes de sol sur un site d'agriculture (Smith & Read, 2008). Duponnois et al. (2001), quant à eux, ont trouvé entre 116 et 418 spores par 100grammes de sol dans des jachères de différents âges au

Sénégal. Guadarama et *al.* (2008) ont obtenu des résultats similaires avec de 40 à 421 spores par 100grammes de sol sec sur des jachères de différents âges en climat tropical sec au Mexique.

Pour notre cas, les moyennes par site de nombre de spores trouvées se situent dans ces larges gammes de valeurs puisqu'elles sont comprises entre 40 et 272 spores par 100grammes de sol sec. La variabilité entre les sites peut s'expliquer par les différences des caractéristiques de leurs sols.

b) Les microorganismes du sol : rôles importants sur la plante

Les microorganismes du sol sont actuellement considérés comme des agents très prometteurs pour assurer une protection phytosanitaire performante (Boussaber et *al.*, 2012). Dans le sol, les bactéries fixatrices d'azote (azotobacter) sont présentes en quantité importante au niveau de la rhizosphère, à proximité des racines des plantes (Beijerinck, 1901). Les actinomycètes, ont été identifiées comme ayant un potentiel d'utilisation dans la lutte biologique des champignons phytopathogènes (Boussaber et *al.*, 2012). Lors de la présente étude, les sols des sites réhabilités sont riches en microorganismes. Cela constitue un avantage qui permet d'assurer la protection sanitaire de la plantation en dessus.

1.2 Particularité de la végétation

1.2.1 Faible potentialité d'exploitation de la forêt naturelle

L'inventaire floristique réalisé dans la zone de conservation, que ce soit dans la forêt zonale soit dans la forêt azonale, a donné des résultats remarquables. En termes de diamètre, le pourcentage des arbres atteignant le DME¹⁶ (35 à 40cm pour les espèces ligneuses malgaches qui sont destinés pour les bois d'œuvre) est très faible : inférieur à 5%. La raison principale peut être l'écrémage effectué par la population riveraine avant même le début de l'exploitation par Ambatovy.

1.2.2 Avantage de la plantation stratifiée sur les sites réhabilités

Des études récentes (RICHARDS, 1996 in RAJOELISON, 2005) ont montré que toutes les forêts tropicales humides ont une structure de base similaire mais qu'il y a des variations considérables entre elles. Ces variations sont partiellement causées par les différences entre les phases de développement, mais la structure de la forêt dépend également de la composition des espèces : une forêt monospécifique où une espèce constitue un large pourcentage du peuplement, diffère en structure d'une forêt constituée par une large gamme d'espèces. Le terme 'strate' peut être défini comme une couche de couronnes d'arbres entre certaines limites de hauteur (ou de mi-hauteur de couronne) (RICHARDS, 1996 in RAJOELISON, 2005). Les forêts tropicales humides sempervirentes qui constituent la plus large part des forêts denses humides de basse altitude comprennent généralement trois strates. La pratique de la plantation stratifiée sur les sites réhabilités à Ambatovy permet, alors, à la population végétale d'imiter la trajectoire de la forêt naturelle.

¹⁶ Diamètre minimale exploitable : 35 à 40cm pour les espèces ligneuses malgaches (il s'agit des bois d'œuvre) d'après le cours de Sylviculture de base ESSA-Forêts, 2010

2 Discussions sur les hypothèses

2.1 Hypothèse 1 : Les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols des sites réhabilités évoluent vers celles de la forêt naturelle

2.1.1 S/H 11 : Cette évolution est observée sur les propriétés physico-chimiques du sol de chaque site

En général, les sols des sites réhabilités ont de bonnes propriétés physico-chimiques par rapport aux sols des sites minés même s'ils sont classés en un même type de sol : sol ferrallitique rajeuni ou ultisol. La première sous-hypothèse est donc vérifiée. Ainsi, l'examen régulier du profil pédologique des sites réhabilités est un facteur permettant de suivre leur évolution.

2.1.2 S/H 12 : Cette évolution est observée sur l'activité biologique dans le sol de chaque site

2.1.2.1 Pédofaune

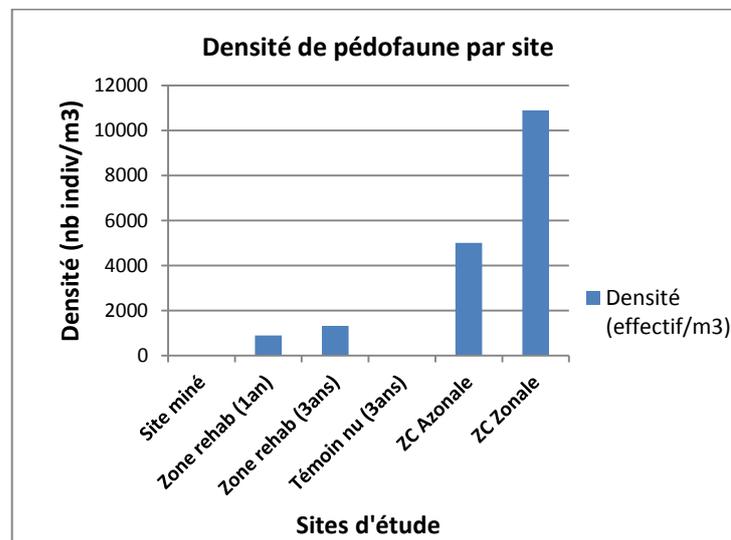


Figure 25: Densité de pédofaune par site pour 0 à 30cm de profondeur

Plus l'âge de réhabilitation augmente, plus l'activité biologique dans le sol augmente. Cette dernière est plus forte dans la zone de conservation. La deuxième sous-hypothèse est donc vérifiée du point de vue pédofaune. Par conséquent, la pédofaune constitue l'un des indicateurs de l'évolution biologique des sites réhabilités à Ambatovy. Un inventaire annuel est ainsi nécessaire.

2.1.2.2 Microbiologie

Selon l'activité de la biomasse microbienne totale ainsi que le taux en azotobacter, on peut citer dans l'ordre croissant : le site miné, le témoin nu, le site réhabilité de 1an, le site réhabilité de 3ans et la zone de conservation. Les courbes des autres paramètres ne suivent pas cette allure : cela peut être dû aux conditions du milieu. La deuxième sous-hypothèse est donc partiellement vérifiée du point de vue microbiologie. Par conséquent, ce sont ces deux paramètres suscités qui représentent les indicateurs d'évolution biologique des sites réhabilités sur le plan microbiologique.

2.2 Hypothèse 2 : Les caractéristiques de la végétation sur sites réhabilités évoluent vers celles de la forêt naturelle

Les courbes de la densité, de la structure totale et de la structure verticale de la végétation ont tous donné une allure croissante qui tend vers la référence naturelle. L'évolution est marquée puisque l'avantage du site réhabilité de 3ans s'observe sur ces trois paramètres. Ainsi, la deuxième hypothèse est confirmée. Par conséquent, afin de suivre l'évolution des caractéristiques de la végétation sur sites réhabilités, l'inventaire floristique régulier effectué doit considérer les éléments suivants : la densité spécifique, le diamètre au collet, la hauteur totale et la liste des espèces indicatrices de fertilité.

3 Discussions sur la fiabilité de l'étude

3.1 Résultats des analyses en laboratoires : écarts-type non connus

Les résultats concernant les analyses en laboratoires ne sont vrais que pour notre cas. En effet, des répétitions sont nécessaires afin de déterminer si la différence observée peut être expliquée par le facteur en question. Malheureusement, nous n'avons pas pu faire de répétitions car les échantillons de sol sont mélangés afin qu'un seul échantillon mélangé représente chaque site en raison du coût élevé des analyses. Ainsi, la comparaison des moyennes des données sont possibles mais les écarts-type ne sont pas connus.

3.2 Une recherche ponctuelle: insuffisante pour déterminer une information essentielle

Le fait que la présente étude soit une recherche ponctuelle ne permet pas d'affirmer la fiabilité des résultats obtenus. En effet, il est impossible de faire une simulation des résultats, qui nécessite des données de plusieurs années qui ont été récoltées en respectant les mêmes conditions.

L'espace spatio-temporelle de la présente étude est très courte et les résultats obtenus ne peuvent pas encore donner des réponses exactes à certaines questions. En effet, une évolution positive a été observée par le biais de plusieurs indicateurs mais cela n'affirme pas que cette évolution continuera toujours au cours du temps ; De plus, même cette évolution est très marquée, il se pourra que sa vitesse va ralentir dans les années à venir.

4 Recommandations et perspectives

4.1 Valorisation des acquis

Les acquis par la présente étude peuvent contribuer à l'amélioration du protocole de réhabilitation en se référant aux indicateurs de réussite trouvés.

4.1.1 Amélioration de la qualité physique, chimique et biologique du sol

4.1.1.1 Utilisation du topsoil que du compost

Il s'avère intéressant d'utiliser du topsoil que du compost pour une meilleure activité biologique. En effet, le sol à topsoil est beaucoup plus riche biologiquement que celui à compost. De plus, la biomasse associée au topsoil permet une bonne fertilisation du terrain minier.

4.1.1.2 Correction du pH

Etant donné que les sites étudiés à part le site miné ont un pH inférieur à 5,5 (seuil minimal d'acidité supporté par les plantes), le taux d'acide dans le sol est très élevé. Cela affecte sur la qualité physique du sol et pourra être néfaste pour la végétation qu'il supporte. Pour y remédier, l'apport de biomasse ne peut résoudre que partiellement le problème : en effet, la matière organique présente pourra produire une autre réaction en se transformant en acide organique. La méthode la plus simple et efficace pour corriger le pH est donc l'apport de dolomie.

4.1.1.3 Archives de détermination de la pédofaune

Pour faciliter les études futures sur la pédofaune, les espèces inventoriées doivent être déterminées, puis chaque représentante doit être conservée dans un récipient étiqueté contenant du formol. Chaque étiquette doit comporter le nom commun, le nom scientifique et la Famille.

4.1.1.4 Suivi régulier de l'état pédologique et biologique des sites réhabilités

En vue d'évaluer l'efficacité des résultats obtenus lors de l'analyse d'évolution effectuée, le suivi régulier des sites d'étude est important. Le suivi effectué doit garder la même procédure d'analyse et utiliser les mêmes techniques afin de pouvoir mener une comparaison. Et l'échelle spatio-temporelle doit être respectée dans le but de pouvoir effectuer une simulation. Pour cela, un suivi annuel sera recommandé.

4.1.2 Continuation de la plantation stratifiée et inventaire floristique régulier

L'évolution des sites réhabilités est très marquée sur les caractéristiques de la végétation. Ainsi, la mise en place de la plantation stratifiée sur les sites réhabilités est une méthode de revégétalisation efficace qui mérite d'être appliquée. En effet, sa composition floristique est similaire à celle de la forêt naturelle de référence et la croissance en hauteur et en diamètre est très marquée. De plus, dans le cas où la réserve en topsoil ne suffit pas, les biomasses peuvent améliorer la qualité du sol. Toutefois, un inventaire floristique régulier (au moins une fois dans l'année) dans les sites réhabilités est indispensable afin de suivre la croissance des plantes.

4.2 Promotion des travaux de recherche complémentaires

4.2.1 Identification des plantes neutralisantes d'acide

Voulant éviter le recours à la solution chimique, la détermination des espèces végétales pouvant rendre basique le sol pour ensuite les utiliser en réhabilitation sera une solution efficace pour la correction du pH. Ces plantes à propriété basique joueront ainsi le rôle de neutraliser les acides en formant des sels et de l'eau. Cette technique est déjà appliquée pour la réhabilitation des sites miniers en Nouvelle-Calédonie.

4.2.2 Etude de la vitesse de recyclage des matières

La connaissance de la vitesse de renouvellement de la litière au sein des sites réhabilités est également un des clés principales de l'amélioration des efforts de réhabilitation des terrains miniers. De ce fait, elle pourra constituer un facteur permettant l'accélération des travaux déjà entretenus et facilitant ainsi la revégétalisation des roches ultramafiques. Cette étude a une importance particulière puisque de ses résultats va dépendre le choix des essences végétales à retenir pour la réhabilitation. Le résultat global attendu par cette étude est, donc, de savoir dans combien de mois se renouvelle la litière des espèces de différents stades de végétation au sein des parcelles d'essai dans les sites réhabilités.

4.2.3 Etude de la durée optimale pour le stockage du topsoil

Le recours à un apport de terre sur les zones dénudées peut se révéler plus efficace lorsque celle-ci provient d'un décapage minier de surface dont le topsoil (L'Huillier L., Jaffré T. et Wulff A., 2010). Son prélèvement doit être le plus superficiel possible sur une faible épaisseur (moins de 2m), les premiers centimètres étant les plus riches. Bon nombre de scientifiques remettent en cause que le stockage à une longue durée de topsoil réduit sa qualité et entraîne sa stérilité, mais cela n'est pas prouvé scientifiquement. Pelletier & Esterle en 1995, Ruiz en 2006 et L'Huillier en 2007, ont tous mentionné que le topsoil doit faire l'objet d'un transfert direct ou après un stockage n'excédant pas quelques jours après son prélèvement et qu'un stockage plus long est toujours néfaste. Toutefois, le topsoil utilisé par Ambatovy est souvent stocké pendant une longue durée avant son épandage sur les zones dénudées mais les résultats obtenus ne sont pas décevants. Ainsi, il s'avère indispensable de remettre en question la durée optimale pour le stockage du topsoil après son prélèvement.

4.2.4 Essai d'inoculation contrôlée avec des bactéries symbiotiques ou rhizosphériques, appliquée à la restauration écologique des terrains miniers

Pour cela, il est intéressant d'utiliser des bactéries rhizosphériques stimulatrices de la croissance des plantes qui sont souvent qualifiées de PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*). Il s'agit de bactéries qui se développent dans le volume du sol situé au voisinage immédiat des racines des plantes, volume caractérisé par la présence d'exsudats des racines. Les bactéries PGPR colonisent la rhizosphère en utilisant les exsudats des racines comme substrats nutritifs, mais à la différence des autres bactéries rhizosphériques, elles ont, en retour, un effet bénéfique sur la plante. Cet effet bénéfique peut être direct, lorsque la bactérie stimule la croissance des racines, ou indirect, lorsqu'elle contrôle des organismes phytopathogènes par exemple. Ces bactéries PGPR ont un impact majeur sur le fonctionnement biologique de la rhizosphère, et donc, sur les conditions de croissance et de développement de la plante. Ces particularités ouvrent des possibilités pour améliorer le fonctionnement de la rhizosphère et par là même des perspectives intéressantes pour la revégétalisation des sites miniers (L'Huillier et al., 2010). L'inoculation contrôlée requiert l'utilisation des espèces végétales possédant des symbiotes bactériens qui ont la propriété d'enrichir le sol en azote, élément souvent rare dans les milieux miniers.

Partie 5. Conclusion générale

Les efforts de réhabilitation effectués par Ambatovy donnent des résultats beaucoup plus efficaces face aux grands projets d'extraction minière dans le monde. Par le biais de cette étude, il est constaté que la structure et la texture du sol déterminent la disponibilité en eau et en nutriments dans le sol. De leur tour, ces derniers conditionnent le développement de la végétation naturelle ou implantée. La végétation influence sur la richesse en pédofaune et sur le sol par sa composition et par la biomasse de sa litière apportée au sol (HUARD J., 2010). C'est pourquoi, dans le site miné et dans le témoin non réhabilité, le résultat de l'inventaire de la pédofaune est nul tandis que la densité est très élevée dans les sols sous forêts naturelles. Il a également été déduit que l'apport des terres végétales (topsoil) avant l'implantation de la plantation stratifiée est un moyen très efficace pour enrichir le sol sur site récemment exploité permettant ainsi de faciliter le processus de revégétalisation.

Même si les deux types de sites réhabilités ont le même type de sol dont le sol ferrallitique rajeuni, le site réhabilité de 3ans présente les meilleures propriétés physiques et biologiques. L'étude du profil pédologique sur le premier mètre superficiel du sol a permis de déterminer son évolution vers la référence naturelle par sa structure, sa texture ainsi que sa densité en pédofaune et en biomasse microbienne. Les propriétés chimiques sont presque semblables pour tous les sites d'études du fait qu'ils en soient pauvres. Cela peut être dû à la nature même des sols d'Ambatovy qui se caractérise par le taux d'acidité élevée et la faible teneur en bases échangeables. Ainsi, la forte acidité des sols d'Ambatovy est un problème majeur affectant les propriétés de celui-ci. Ce problème ne se rencontre non seulement dans les sites réhabilités mais également dans la zone de conservation, alors que l'assimilation de tous les éléments minéraux est conditionnée par le taux d'acidité du sol. La correction du pH est, donc, une priorité qui mérite d'être effectuée dans l'immédiat car d'elle dépend la fertilité du sol.

Imitant les caractéristiques de la forêt naturelle en termes de composition floristique et de densité spécifique, la plantation stratifiée sur sites réhabilités a également permis d'évaluer l'évolution positive des sols par l'analyse de ses caractéristiques. La hauteur maximale des arbres est de 1,5m pour le site réhabilité de 1an mais plus élevée (2,14m) pour celui de 3ans. Sur sol pisolitique, les arbres de la forêt azonale atteignent 15m de hauteur alors que ceux de la forêt zonale atteignent jusqu'à 20m de hauteur sur sol ferrallitique rouge-jaunâtre. Dans les sites réhabilités, le diamètre des arbres est fonction de l'âge du peuplement. Seule la zone de conservation renferme des arbres de diamètre supérieur à 15 cm mais rares sont les arbres qui atteignent le diamètre minimal exploitable.

En termes de perspective, il s'avère nécessaire d'avancer à l'acquisition de connaissances nouvelles pour la compréhension du fonctionnement pédologique et biologique des sols miniers et notamment de l'interface sol-plante. Ces travaux permettront de comprendre, de façon plus générale, les rôles des éléments de la plante, en particulier de la biomasse, sur l'amélioration des propriétés du

sol, mais aussi fourniront des pistes de travail pour réussir la revégétalisation des sites miniers dégradés. En effet, la détermination des plantes stabilisatrices de pH, la connaissance de la vitesse de recyclage de la matière et de la durée optimale de stockage du topsoil peuvent être un préalable incontournable à la réussite de la remise en place d'un couvert végétal.

Bien que ne représentant qu'une toute petite parcelle du travail encore à accomplir dans le domaine de la restauration écologique, les données obtenues dans cette étude constituent un point de départ non négligeable pour d'autres études. Etant donné que les sols des sites réhabilités évoluent pédologiquement et biologiquement avec le temps, la limite de notre étude, qui mérite d'être soulevée dans le futur, est de ne pas pouvoir répondre à la question : A quel pas de la réussite se situe l'état pédologique et biologique actuel des sites réhabilités et combien d'années faut-il pour que les sols de ces sites atteignent les propriétés des sols sous forêt naturelle ?

Références

Bibliographie

1. Ambatovy, 2012. Base de données du Département Environnement.
2. Boussaber et al., 2012. Isolement des souches d'actinomycètes productrices de substances antifongique. ScienceLib Editions Mersenne : Vol.4, N ° 120801, 14p.
3. Charline H., 2012. Identification des plantes nurses potentielles pour améliorer la croissance des plantes cibles pour la réhabilitation post-exploitation de la mine d'Ambatovy à Madagascar. Mémoire de fin d'études, AgroParisTech, Montpellier, 90p.
4. CHAUSSOD R., 2001. La qualité biologique des sols : évaluation et implications. INRA, p18.
5. CHOTTE et al, 2001. Jachère et biologie du sol en Afrique tropicale. Paris, 37p.
6. DEMOLON et LEROUX., 1952. Guide pour l'étude expérimentale du sol. 251p.
7. DOMMERGUES Y., 1954. La microbiologie appliquée à l'étude de la conservation des sols. Mémoire de l'Institut Scientifique de Madagascar, ORSTOM, 113p.
8. DYNATEC CORPORATION, 2006. Etude d'Impacts Environnementale (EIE) du projet Ambatovy, Volume A à K.
9. Hanitra R., 2011. Madagascar: Ambatovy - Création d'une vitrine de revégétalisation. Article journal Midi Madagasikara.
10. HUARD J., 2010. Mise en Evidence des interactions Sol-Faune-Flore. 16p.
11. Hopkins, 2003. Physiologie végétale. Espagne, De Boeck University, 515 p.
12. Jaffré, 1974. La végétation d'un massif de roches ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie: le Koniambo. Candollea, p. 427–456.
13. Jaffré, 1992. Floristic and ecological diversity of the vegetation on ultramafic rocks in New Caledonia. The Vegetation of Ultramafic Soils (Baker, Proctor & Reeves), p. 101–107.
14. Jourand et al, 2010. Ultramafic soils from New Caledonia structure *Pisolithus albus* in ecotype. 249p.
15. LAROCHE O., 2011. Revégétalisation de sites miniers et valorisation de boues de stations d'épuration : cas de la Nouvelle-Calédonie, 128p.
16. Latham M., 1981. Atlas de la Nouvelle-Calédonie. ORSTOM, Paris, France.
17. Lavelle P & Spain A, 1991. Soil Ecology. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands. p. 1-3.
18. Lebrun & Van Straalen, 1996. Oribatid mites, prospects for their use in ecotoxicology. Experimental & applied Acarology, vol.19, p. 361-379.
19. L'Huillier L., Jaffré T. et Wulff A., 2010. Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration. Nouvelle-Calédonie, 412p.
20. M. Bonneau&B. Souchier., 1979. Pédologie : constituants et propriétés du sol. Paris, 459p.
21. ONE, 2006. Plan de gestion environnementale et de développement social (PGEDS) - Projet Nickel Ambatovy. 110p.

22. P. PESSON., 1971. La vie dans les sols. Gauthier- Villars, 471p.
23. Paoletti, 1999. Invertebrates Biodiversity Bioindicator of Sustainable Landscapes. Agriculture, Ecosystem & Environment, vol. 74, p. 1-41.
24. Parisi VC, Menta C, Gardi C, Jacomini C, Mozzanica E, 2005. Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: a new approach in Italy. Agriculture Ecosystems and Environment, vol. 105, p. 323–333.
25. Proctor and McGowan, 1976. Influence of magnésium on nickel toxicity. Nature, n°176, p. 234.
26. Projet Ambatovy, 2011. L'exploitation de Nickel et de Cobalt Ambatovy. 35p.
27. RABARY B., 2011. Impact du semis direct sur couverture végétale sur la macrofaune et la microflore des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. Thèse de Doctorat, Département de Biologie et Ecologie Végétale, Université d'Antananarivo. 204p.
28. RAJOELINA, 2008. Analyses de l'influence des types de sol sur la couverture végétale de la forêt de Kirindy-Morondava. Mémoire de fin d'études, ESSA-Forêts. 72p.
29. RAJOELINA, 2012. « Etude du stock de carbone organique du sol sous mangroves » Cas des mangroves de Maintirano. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'études approfondies Option foresterie, environnement et développement, ESSA-Forêts. 56p.
30. RAJOELISON, 2005. Les forêts littorales de la région orientale de Madagascar : vestiges à conserver et à valoriser. Thèse de Doctorat, 268p.
31. RAMADE F., 1984. Eléments d'écologie – Ecologie fondamentale. Mc Graw-Hill, Paris. 397p.
32. RAMANANTSARA, 2008. Etude de la trajectoire de la succession végétale naturelle d'Ambatovy en vue de mettre en place un plan de restauration forestière. Mémoire de fin d'études, ESSA-Forêts, Université d'Antananarivo. 68p.
33. RANDRIAMBOAVONJY J.C., 1997. Examen du profil pédologique, Manuel à l'usage des techniciens du développement rural, Manuel forestier n°2. ESSA-Forêts, 28p.
34. Raphaël Métral et al., 2007. Étude de la diversité de la pédofaune dans les systèmes agroforestiers. Programme CAS DAR Agroforesterie 2006/2008, Recherche et développement, Centre de Transfert de Montpellier SupAgro. 65p.
35. RAZAFIMAMONJY et al., 2011. Rapport du 1er congrès national « MYCOROI » - Symbioses mycorhiziennes : écosystèmes et environnement des Etats insulaires de l'Océan Indien. 21, 22 et 23 Novembre 2011. Antananarivo-Madagascar.
36. RAZAFINDRAKOTO, 2004. Evaluation de l'efficacité de diverses techniques biologiques de gestion conservatoire de la fertilité des sols. Thèse de doctorat. 274p.
37. Ross, 1994. Retention, transformation and mobility of toxic métal in soils. Toxic metals in soil-plant systems. Ed. S. M. Ross, John Wiley and Sons Ltd., p. 63-152
38. Seastedt, 1984. The role of microarthropods in decomposition and mineralization processes. Annu. Rev. Entomol volume 29, p. 25-46.
39. Tondoh et al, 2007. Can earthworms be used as bio-indicators of land-use perturbations in semi-deciduous forest? Biology and Fertility of Soils, vol.43, p. 585-592.

Webiographie

1. AFES (Association Française pour l'Étude du Sol), 2008. Référentiel pédologique, 435p. In <http://www.afes.fr>
2. DEPRINCE A., 2003. La faune du sol : diversité, méthodes d'étude, fonctions et perspectives. Le Courrier de l'environnement n°49, juin 2003. In www.inra.fr
3. FAO, ISRIC et AISS, 1999. Base de référence mondiale pour les ressources en sols, 101p. In www.fao.org
4. Lavoisiers, 1988 « Le tassement des sols agricoles : problèmes actuels et perspectives » (Compte-rendus AAF Vol 74 no.1). In <http://fr.wikipedia.org>
5. MAIGNIEN R., 1969. Manuel de prospection pédologique. IRD - ORSTOM, Paris. In horizon.documentation.ird.fr
6. NALOVIC L. et PINTA M., 1969. Recherches sur les éléments traces dans les sols tropicaux: étude de quelques sols de Madagascar. Laboratoire des sols ORSTOM-Antananarivo. 12p. In horizon.documentation.ird.fr
7. OIBT, 2003, Restaurer les forêts : présentation des directives de l'OIBT pour la restauration, l'aménagement et la réhabilitation des forêts tropicales dégradées et secondaires, in www.itto.or.jp.
8. PBSN, 2003. La faune du sol : clé de détermination. Parc naturel régional des Boucles de la Seine Normande. In <http://membres.multimania.fr>
9. PNUD, 2012. Madagascar – Rapport National. In www.mg.undp.org
10. Projet Ambatovy, 2007. Le projet nickel Ambatovy (AMSA/DMSA), Plan de gestion environnementale spécifique - Plan de gestion de la biodiversité. in www.ambatovy.com, fichier pdf, 65p.
11. Projet Ambatovy, 2011. Ambatovy Sustainability Report. In www.ambatovy.com, fichier pdf, 76p.
12. Projet Ambatovy, 2011. Ambatovy - Soutenir la croissance et le développement à Madagascar. in www.ambatovy.com, fichier pdf, 25p.
13. ROBISOA M., 2010. Etude des successions végétales des forêts brûlées du Tampoketsa d'Ankazobe pour la restauration de la forêt d'Ankafobe. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies en Foresterie-Environnement et Développement, ESSA. In www.rncalliance.org
14. R. Kunanayagam et al., 2000. Impact positif de la mine : Avant-projet pour commentaires. Fichier pdf, 27p. In <http://siteresources.worldbank.org>
15. Sakchoowong W. et al., 2007. Comparaison de l'efficacité d'extraction entre les extracteurs de Tullgren et de Winkler. Thai Journal of Agricultural Science, vol. 40, n ° 3-4, 105p. In www.dnp.go.th
16. SER, 2004. L'abécédaire sur l'écologie de la restauration, Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group, in www.ser.org

Autres sites internet

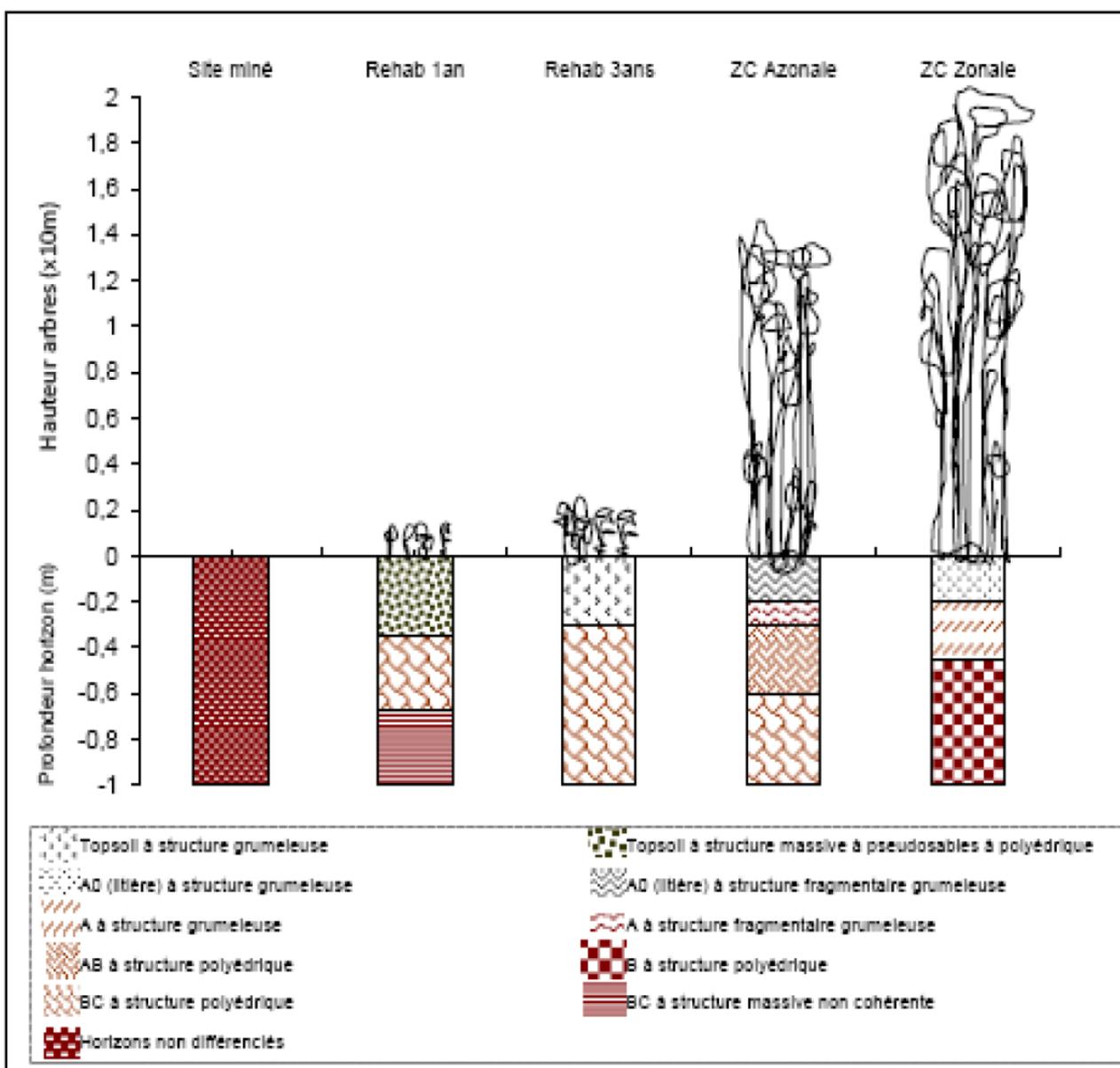
1. *fr.getamap.net*
2. *google earth*
3. *http://www.symbiose.ca*
4. *theses.recherches.gov.mg*
5. *www.cabinet-mci.com*
6. *www.meeft.gov.mg*
7. *www.newsmada.com*
8. *www.pugetsoundhydroseeding.com*
9. *www.sciencelib.fr*
10. *www.sordalab.com*
11. *www.viu.ca*

Cours professés

1. RABEFARIHY T., 2011. Cours d'inventaire floristique, ESSA-Forêts.
2. RABEFARIHY T., 2011. Cours de statistique appliquée, ESSA-Forêts.
3. RABENILALANA F. M., 2010. Cours d'écologie générale, ESSA.
4. RAJOELISON G., 2011. Cours de sylviculture des forêts tropicales, ESSA-Forêts.
5. RAKOTO R. H., 2012. Cours de télédétection, ESSA-Forêts.
6. RANDRIAMBOAVONJY J.C., 2011. Cours de pédologie appliquée, ESSA-Forêts.
7. RAMAMONJISOA B. S., 2011. Cours de Méthodologie de recherche, ESSA-Forêts.
8. RATSIMBAZAFY J., 2010. Cours de Biométrie, ESSA-Forêts.
9. RAZAFINDRAKOTO M. A., 2010. Cours de Défense et restauration du sol, ESSA.
10. RAZAFY F.L., 2012. Aménagement et gestion des ressources naturelles, ESSA-Forêts.
11. RAZAFIMBELO T., 2009. Cours de Sciences du sol, ESSA.

ANNEXES

1 Schéma récapitulatif des résultats



PARAMETRES	OAN DE REHAB	1AN DE REHAB	3ANS DE REHAB	CLIMAX TYPE AZONAL	CLIMAX TYPE ZONAL
Types de sol	Sol ferrallitique rajeuni (ultisol)			Sol pisolithique (ultisol-oxisol)	Sol ferrallitique rouge-jaunâtre (oxisol)
Granulométrie	limono-sableux	limon argilo-sableux	limon argilo-sableux	limono-sableux	limon argilo-sableux
pH	Fortement acide	Très fortement acide	Très fortement acide	Très fortement acide	extrêmement acide
C/N	satisfaisant (10 à 20)	satisfaisant (10 à 20)	satisfaisant (10 à 20)	trop fort (>20)	satisfaisant (10 à 20)
P assimilable	pauvre (≤ 5ppm)	pauvre (≤ 5ppm)	très pauvre (< 2,5ppm)	pauvre (≤ 5ppm)	Riche (>5ppm)
Bases échangeables	pauvre (<normale)	pauvre (<normale)	pauvre (<normale)	pauvre (<normale)	pauvre (<normale)
Densité pédofaune	0 ind/m ³	2693 ind/m ³	3893 ind/m ³	15013 ind/m ³	32667 ind/m ³
Activité biomasse microbienne totale	11,77 µg de Fluoresceïne/h/g sol	173,95 µg de Fluoresceïne /h/g sol	185,37 µg de Fluoresceïne /h/g sol	241,92 µg de Fluoresceïne /h/g sol	299,83 µg de Fluoresceïne/h/g sol
Actinomycètes	2667 UCF/5g de sol	5667 UCF/5g de sol	1667 UCF/5g de sol	359000 UCF/5g de sol	29667 UCF/5g de sol
Azotobacter	0 UCF/5g de sol	4667 UCF/5g de sol	10667 UCF/5g de sol	10667 UCF/5g de sol	11667 UCF/5g de sol
Spoires vivantes	60 %	54,47 %	65,76 %	68,01 %	69,74 %

Figure 26: Schéma récapitulatif des résultats

2 Le traitement de réhabilitation T3+TS

Le traitement T3+TS (traitement n°3 associé au topsoil) est le traitement de revégétalisation envisagé par Ambatovy pour la restauration écologique du site minier. Parmi les trois types de traitement appliqués à l'essai de réhabilitation en 2010, c'est le traitement T3+TS qui a été répété en 2012. C'est, donc, ce type de traitement qui a été étudié lors de l'étude de l'évolution pédologique et biologique des sites réhabilités afin d'évaluer son efficacité par l'analyse de l'évolution dans le temps.

- Date du traitement de revégétalisation : Juin 2010
- Dimension de la parcelle : 22m x 2.000 m soit 44000m² (4,4ha)
- Substrat : Topsoil d'épaisseur 25 cm
- Composition floristique T3: mélange des plantules (T1+T2)
- 13000 plantes de 2ème et 3ème âge fournis par JDV à partir de l'ancienne pépinière de TAM'S
- Plantation : trou de 40cmx40cmx40cm par plant
- Ecartement entre plant : 2mx2m

Tableau 13: Illustration de la Stratification horizontale par type de traitement

TRAITEMENT	DIVERS FAMILLES	ASTERA CEAE	FABA CEAE	RUBIA CEAE	ERYTHROXYLACEAE	HARUNGANA	EUPHORBIA CEAE	LAURA CEAE
T1	64	5	3	7	1	1	12	7
T2	53	5	7	7	1	6	14	7
T3	59	5	5	7	1	4	13	7

Tableau 14: Illustration de la stratification verticale par type de traitement

Traitement	Stade	1er étage	2 nd étage	3 ^{ème} étage
T1	FL1-Harungana	10%	30%	60%
T2	FL1-FL2	10%	30%	60%
T3	(T1+T2)/2	10%	30%	60%

T3 : Plant de (st1+st2) /2

La composition floristique est constituée par un stade intermédiaire proche à *Harungana* : (FL1-FL2)/2. Ce dernier résulte de l'étude de la succession végétale naturelle forestière d'Ambatovy.

3 Propriétés physiques des sites d'étude

3.1 ZC Zonale

Date de collecte des données: 20/02/2013 à 10h

Lieu: Z16 Ampangadiantrandraka

Site: état de référence naturel zonal

alt: 1037m

X = 0215305

Y = 7911912

Pente: 25%

Position : partie basse du mi-versant

Tableau 15: Profil pédologique de la zona de conservation zonale

Caractéristiques	Horizon A	Horizon B
Epaisseur	45cm dont 10cm = litière	55cm ou plus
Couleur	Marron (Hue 7,5YR 4/6)	Marron (Hue 7,5YR 4/4)
Structure	Grumeleuse	Polyédrique
Enracinement	densité forte, cheminement vertical ou oblique	densité moyenne, cheminement horizontal
Consistance des agrégats	Faible	Moyenne
Porosité	forte avec forte activité biologique	Forte
Transition	A/B: progressive	

Potentialités

horizon humifère épais

existence de plantes indicatrices de présence d'eau : fougères, orchidées

forte activité biologique et matière organique très décomposée



Photo 10: Profil pédologique de la zone de conservation zonale

Température

Niveau (m)	T (°C)
1	24
-0,5	25
-1	26

3.2 ZC Azonale

Date de collecte des données: 21/02/2013 à 10h

Lieu: ZC Ampanatovana-Est

Site: état de référence naturel azonale

alt = 1121m

X = 0218188

Y = 7912869

Pente : 5%

Position : mi-versant

Tableau 16: Profil pédologique de la zone de conservation azonale

Caractéristiques	Horizon A	Horizon AB	Horizon BC
Epaisseur	30cm dont 20cm = litière	30cm	40cm ou plus
Couleur	Marron rougeâtre très foncé (Hue 2,5YR 2/3)	Marron foncé (Hue 10YR 3/4)	Rouge foncé (Hue 7,5R 3/4)
Structure	fragmentaire grumeleuse	Polyédrique	Polyédrique
Enracinement	densité moyenne à forte, cheminement horizontal	Inexistant	Inexistant
Consistance des agrégats	moyenne à faible	moyenne à faible	moyenne à faible
Porosité	Faible	Faible	Faible
Cuirasse	peu abondante (présence de grosses cuirasses et concrétions)	Concrétions abondantes	Concrétions très abondantes (presque tout l'horizon)
Transition	A/AB: progressive	AB/BC: progressive (changement de couleur)	

Inconvénients	Potentialités
Horizon humifère fine Zone très cuirassée Agrégats de grande taille (3 à 8dm) et non poreux	Existence de plantes indicatrices de présence d'eau Horizon limoneux: résistance à la sécheresse malgré la présence des cuirasses



Température

Niveau (m)	T (°C)
1	23
-0,5	21,3
-1	20,2

Photo 11: Profil pédologique de la zone de conservation azonale

3.3 Zone rehab 3ans : Berano

Date de collecte des données: 20/02/2013 à 15h

Lieu: Berano, pipeline 2km

Site: réhabilité T3+TS (3ans)

Coordonnées GPS:

alt = 1128m

X = 0217579

Y = 7915203

Pente: 8%

Position : mi-versant

Tableau 17: Profil pédologique de la zone réhabilitée de 3ans

Caractéristiques	Topsoil	Horizon BC1	Horizon BC2
Epaisseur	30cm	30cm	40cm ou plus
Couleur	Marron (Hue 7,5YR 4/6)	Rouge foncé (Hue 7,5R 3/4)	Marron rougeâtre foncé (Hue 7,5R 3/3)
Structure	Grumeleuse	Polyédrique	presque similaire au précédent
Enracinement	Faible	Néant	
Consistance des agrégats	Moyenne	Forte	
Porosité	Forte	Faible	
Cuirasse	Néant	très peu	
Transition	TS/A: brusque (changement couleur et structure)	A/BC: progressive	

Inconvénients

Horizons A et B à cohésion forte à moyenne



Potentialités

Topsoil épais permettant la croissance des plantes

Photo 12: Profil pédologique de la zone réhabilitée de 3ans

Température

Niveau (m)	T (°C)
1	25
-0,5	26
-1	27

3.4 Témoin nu 3ans

Date: 22/02/2013 à 11h
Lieu: Analamay, Parcelle 6P
Site: témoin nu (3ans)
Coordonnées GPS:
alt = 1060m
X= 0217628
Y= 7918405
Pente: 23%
Position : mi-versant

Température

Niveau (m)	T (°C)
1	28
-0,5	32
-1	35

Tableau 18: Profil pédologique du témoin non réhabilité de 3ans

Caractéristiques	Horizon AB	Horizon BC
Epaisseur	45cm	55cm
Couleur	Marron jaunâtre (Hue 10YR 5/6)	Marron jaunâtre (Hue 10YR 5/8)
Structure	Particulaire (avec des agrégats polyédriques)	Particulaire à polyédrique fine
Porosité	Moyenne	moyenne à faible
Enracinement	très peu, voire inexistant	
Consistance des agrégats	Faible	Faible
Cuirasse	surtout à la surface du sol, densité moyenne	
Transition	AB/BC: progressive	

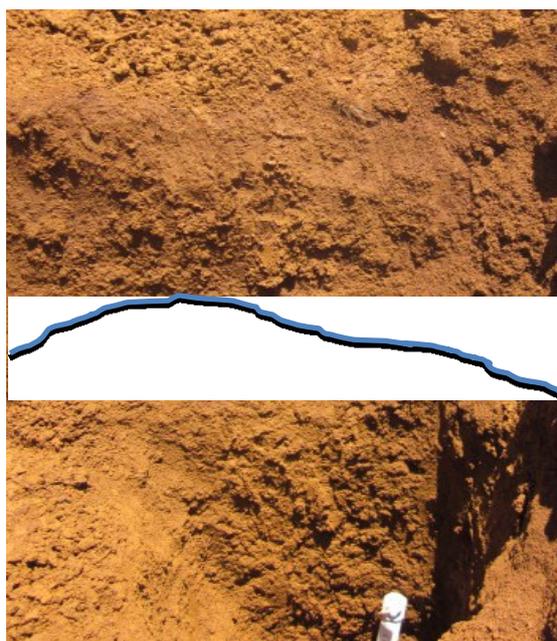


Photo 13: Profil pédologique du témoin nu de 3ans

3.5 Zone rehab 1an /PK5

Date 05-mars-13
 Lieu Piste water-pomp Mangoro
 Site réhabilité T3+TS (1an)
 Coordonnées GPS:
 alt 963m
 X 0213029
 Y 7912693
 Pente: 10%
 Position mi-versant

Tableau 19: Profil pédologique de la zone réhabilité de 1an

Caractéristiques	Top-sol	Horizon A	Horizon B
Epaisseur	35Cm	32cm	33cm au plus
Couleur	Marron (Hue 7.5 YR 4/6)	Marron rougeâtre clair (Hue 10R 4/4)	Marron rougeâtre clair (Hue 10R 4/6)
Structure	massive à pseudosables à polyédrique	Polyédrique	massive non cohérente
Enracinement	densité faible, petite taille, cheminement horizontal		
Consistance des agrégats	Faible à moyenne	Moyenne	moyenne
Porosité	Forte	moyenne à forte	moyenne
Cuirasse	Néant	Néant	Néant
Transition	TS/A brusque (couleur)	A/B progressive	

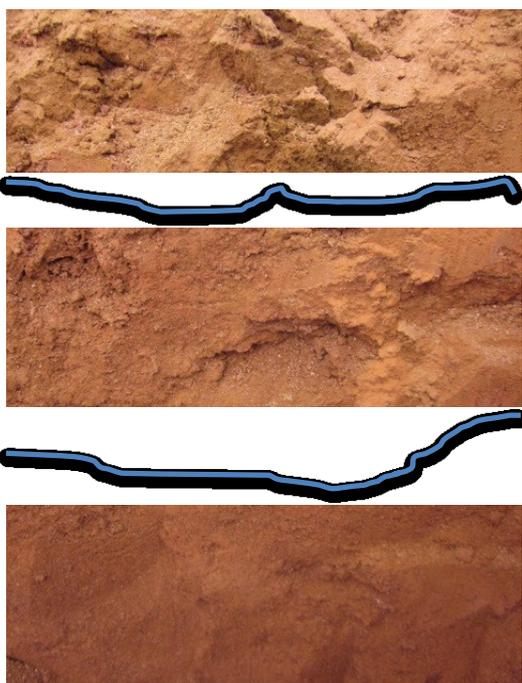


Photo 14: Profil pédologique du site réhabilité de 1an

Température

Niveau (m)	T (°C)
1	29
-0,5	26
-1	25.7

3.6 Site miné



Photo 15: Profil pédologique du site miné

Sans différenciation de couches/horizons

Aucune végétation

4 Analyses physico-chimiques en laboratoire

Les analyses sur la pédologie ont été effectuées au Laboratoire de pédologie de la FOFIFA sis à Tsimbazaza-Antananarivo.

Les six (06) sites de prélèvement sont :

- La zone de conservation zonale
- La zone de conservation azonale
- Le site réhabilité âgé de 3ans
- Le site réhabilité âgé de 1an
- Le témoin âgé de 3ans
- Le site miné

Les 2 échantillons prélevés pour chaque site sont :

- Un échantillon = mélange des terres végétales de l'horizon 1 (environ 0-25cm)
- Un échantillon = mélange des terres végétales de l'horizon 2 (environ 25-50cm)

4.1 Mode opératoire (FOFIFA, 2013)

4.1.1 Préparation d'échantillon de sols

PROCEDURE

- ☞ Verser et étaler le sol sur une feuille de papier portant la référence.
- ☞ Glisser le sac d'origine sous l'échantillon afin de ne pas le séparer de ce dernier.
- ☞ Deux ou trois fois par jour, écraser à la main les mottes de terre afin de favoriser le séchage. L'échantillon est sec lorsqu'il s'effrite entre les doigts sans coller.

- ☞ Faire passer à travers un tamis de 2mm d'ouverture. Après chaque opération de tamisage, verser le refus sur une feuille de papier. Si celui-ci contient de la terre agglomérée, la mettre dans un mortier en porcelaine, et à l'aide d'un pilon, écraser les petites mottes de terre sans taper ni appuyer trop fort.
- ☞ Pour les analyses de routine, conserver environ 500g de cet échantillon dans un sachet plastique portant la référence.
- ☞ Broyer ensuite 10g de ce même échantillon et faire passer à travers un tamis de 0.5mm d'ouverture. Le conserver dans un sachet plastique portant le référence. Cet échantillon est réservé pour les analyses suivantes :
- ☞ Carbone organique
- ☞ Azote Kjeldahl
- ☞ Fer extractable.

4.1.2 pH

4.1.2.1 Principe

La différence de potentiel créée entre une électrode de verre et une électrode de référence plongées dans une solution à analyser est une fonction linéaire du pH de celle-ci.

4.1.2.2 Appareillage et réactifs

- pH mètre
- Bécher de 50ml
- Solution tampon pH 4 et pH 7

4.1.2.3 Mode opératoire

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

4.1.3 PHOSPHORE ASSIMILABLE

4.1.3.1 Principe

- Les phosphates donnent un complexe phosphomolybdique en présence de molybdate d'ammonium, en milieu acide.
- Après une réduction par une solution de chlorure stanneux, ce complexe développe une coloration bleue susceptible d'un dosage colorimétrique.

4.1.3.2 Réactifs

- NH_4F 1N. Dissoudre 37g de fluorure d'ammonium avec de l'eau distillée et compléter le volume à 1l en utilisant une fiole jaugée de 1L. On peut stocker cette solution dans une bouteille en polyéthylène.
- HCl 2N. Diluer 80.8 ml de HCl concentré par de l'eau distillée pour avoir un volume total de 500 ml.
- Solution extractante. Ajouter 15 mL de fluorure d'ammonium 1N et 25 ml de HCl 2N dans 460 ml d'eau distillée. Cette solution nous donne 0.03N de NH_4F et de 0.1N de HCl . On peut la stocker dans une bouteille en verre pendant 1 an.
- $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ concentré : Dissoudre 10g de chlorure stanneux dans 25 ml de HCl concentré. Le stocker dans une bouteille à compte-goutte sombre pendant 6 semaines.
- Molybdate d'ammonium : dissoudre 15g de paramolybdate d'ammonium dans 350 ml d'eau distillée. Y ajouter lentement 290 ml de HCl 12N en agitant. Refroidir et compléter le volume à 1l avec de l'eau distillée.
Stocker cette solution dans une bouteille en verre sombre pendant 2 mois.
- Solution diluée de SnCl_2 : Diluer 3 gouttes de SnCl_2 concentré dans 50 ml d'eau distillée. Cette solution est à renouveler toutes les 2 heures.
- Solution mère étalon de P 100 ppm : Dissoudre 0.2129 g de KH_2PO_4 séché à l'étuve à 110°C dans de l'eau distillée. Compléter le volume à 500 ml en utilisant une fiole de 500 ml.
- Solution fille étalon de 10 ppm : Mettre 10 ml de la solution mère étalon de 100 ppm dans une fiole de 100 ml. Ajouter de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.
- Solutions standards : 1 ppm, 2 ppm, 3 ppm et 5 ppm.
A partir de la solution fille de P 10 ppm, mettre respectivement 2.5 ml, 5 ml, 7.5 ml et 12.5 ml dans 4 différentes fioles jaugées de 25 ml portant chacune leur référence, et ajouter de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

4.1.3.3 Mode opératoire

Peser 2 g de sol à 2 mm de diamètre dans une bouteille nalgène de 125 ml. Ajouter 14 ml de la solution extractante. Bien fermer la bouteille et agiter rigoureusement pendant 1 mn. Filtrer avec un papier filtre Watman N° 42. Le filtrat ainsi obtenu contient le P assimilable contenu dans l'échantillon de sol.

- Préparation des étalons

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

- Préparation des échantillons

Dans un tube à essai, mettre successivement 2 ml de filtrat, 5 ml d'eau distillée, 2 ml de la solution de molybdate d'ammonium et 1 ml de la solution diluée de chlorure stanneux. Bien homogénéiser le contenu du tube à essai. Faire un essai à blanc.

Attendre 20 mn pour la stabilisation de la coloration ainsi obtenue, puis effectuer les mesures au spectromètre UV/VIS à la longueur d'onde de 660 nm.

4.1.3.4 Expression des résultats

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

4.1.4 GRANULOMETRIE

4.1.4.1 Principe

Les différentes particules du sol sont dispersées par une solution diluée de métaphosphate de sodium. La détermination de la proportion des sables, des limons et des argiles dans le sol utilise la technique selon laquelle les particules mises en suspension dans un liquide se disposent avec une vitesse V telle que :

$$V = \frac{2.r^2.(D_s - D_l)}{9.n} \quad (\text{loi de Stokes})$$

r :

rayon des particules supposées sphériques

D_s et D_l : densités du solide et du liquide

n : viscosité du liquide

Une fraction de terre est dispersée dans l'eau, puis abandonnée à elle-même à un certain temps. La vitesse de sédimentation étant proportionnelle au carré du rayon des particules. Les sables se déposent beaucoup plus rapidement que les limons, et les limons beaucoup plus vite que les argiles.

La quantité des particules restantes dans l'eau sont mesurée à l'aide d'un densimètre de Bouyoucos.

4.1.4.2 Matériels et réactifs

- Mixeur
- Cylindre jaugé de 1l
- Densimètre de Bouyoucos gradué en /l.
- Thermomètre
- Hexamétaphosphate de sodium 5% : 5 l par échantillon.
- Alcool amylique.
- Chronomètre.

4.1.4.3 Procédure

Peser 50g de sol séché à l'abri dans un Bécher de 600 ml.

Ajouter 50 ml d'hexamétaphosphate de sodium et 100 ml d'eau distillée.

Bien mélanger et laisser au repos pendant une nuit.

Agiter pendant 5 mn à l'aide d'un mixeur.

Transvaser dans un cylindre de 1l et à l'aide de l'eau de rinçage, compléter le volume jusqu'au trait et laisser se reposer quelques minutes afin d'obtenir l'équilibre thermique avec le milieu ambiant.

Boucher le cylindre et retourner vivement à plusieurs reprises pendant 1 mn. Laisser se reposer et déboucher.

Après 40 s et 2 heures de repos, introduire le densimètre dans le liquide surnageant et faite la lecture.

L'introduction du densimètre dans le liquide se fait 10s avant la lecture.

S'il y a formation de mousse à la surface, ajouter quelques gouttes d'alcool amylique pour les faire disparaître.

Faire un essai à blanc dans les mêmes conditions.

4.1.4.4 Calcul

Soient : L_{B40} la lecture après 40s de blanc.

L_{B2h} la lecture après 2 heures de blanc.

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

L_{2h} la lecture après 2 heures de l'échantillon.

t°_{40} la température après 40s.

t°_{2h} la température après 2 heures.

0.36 ($t^{\circ} - 20$) correction en température t° en $^{\circ}\text{C}$

$$\% \text{ sable} = 100 - 2[L_{40} - L_{B40} + 0.36(t^{\circ}_{40} - 20)]$$

$$\% \text{ argile} = 2[L_{2h} - L_{B2h} + 0.36(t^{\circ}_{2h} - 20)]$$

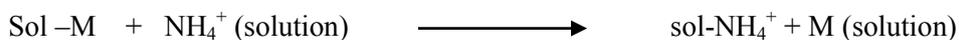
$$\% \text{ limon} = 100 - (\% \text{ sable} + \% \text{ argile})$$

4.1.5 BASES ECHANGEABLES ET CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE

4.1.5.1 Principe

Extraction et détermination des bases échangeables

On met en contact le sol avec une solution molaire et neutre d'acétate d'ammonium. Les cations basiques échangeables sont extraits dans la solution, tandis qu'une partie de NH_4^+ est adsorbée par le sol, suivant l'équilibre ci-dessous :



M : cation basique échangeable

Les cations basiques ainsi extraits sont ensuite déterminés à l'aide du spectromètre d'absorption atomique.

Détermination de la capacité d'échange cationique

Après l'extraction des bases échangeables, le sol est saturé de NH_4^+ . On enlève les sels d'ammonium libre, puis on procède à l'extraction de NH_4^+ ainsi adsorbé par une solution molaire de NaCl.

L'ammoniaque sera ensuite déplacée en milieu alcalin, puis entraîné par la vapeur d'eau. Le dosage volumétrique est effectué sur le distillat.

4.1.5.2 Réactifs

- Acétates d'ammonium $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1 M : Peser 77.08 g d'acétate d'ammonium et le dissoudre dans de l'eau distillée à 1 l.
- Ethanol 60%
- Solution de NaCl 1 M : dissoudre 68.5 g de NaCl dans 1 l d'eau distillée. Le conserver dans une bouteille en verre de 1 l.
- Solution d'hydroxyde de sodium 10 N
- Solution d'acide sulfurique 0.01 N
- Indicateur mixte : dissoudre 0.0495 g de vert de bromocrésol et 0.033 g de rouge de méthyle dans 50 ml d'éthanol.
- Solution d'acide borique à 2% : Dans une fiole jaugée de 2 l, dissoudre 40 g de H_3BO_3 dans 1800 ml d'eau distillée. Ajouter ensuite 40 ml de la solution de l'indicateur mixte. Mélanger et ajuster le volume avec de l'eau distillée jusqu'au trait de la jauge.

4.1.5.3 Procédure

Placer 10g de sol de diamètre 2mm dans un erlenmeyer de 125 ml. Ajouter 40 ml d'acétate d'ammonium 1M.

Tournoyer et laisser reposer pendant 1 heure ou plus.

Transférer le contenu de l'erlenmeyer dans un entonnoir garni d'un papier filtre.

Récupérer le filtrat dans une fiole jaugée de 100 ml.

Bien rincer plusieurs fois le contenu de l'erlenmeyer par 10 ml d'acétate d'ammonium 1M et le transférer dans l'entonnoir jusqu'à l'obtention d'un volume de 100 ml. Compléter le volume jusqu'au trait de jauge par l'acétate d'ammonium.

Déterminer les concentrations en Ca, Mg, K et Na par le spectromètre d'absorption atomique.

Le contenu de l'entonnoir sert à la détermination de la capacité d'échange cationique.

Ajouter 50 ml de la solution d'éthanol 60% dans l'entonnoir. Récupérer le filtrat dans un erlenmeyer de 125 ml. Après le lessivage par la solution d'éthanol, ajouter ensuite la solution de NaCl dans l'entonnoir. Récupérer le filtrat dans une fiole jaugée de 100 ml. Continuer cette opération jusqu'à l'obtention d'un volume de 100 ml.

Dans l'appareil à distillation, introduire 10 ml du filtrat et 5 ml de la solution de soude. Recueillir le distillat dans un erlenmeyer de 125 ml contenant 5 ml de la solution d'acide borique. Effectuer le dosage avec la solution d'acide sulfurique.

Un témoin est préparé dans les mêmes conditions.

4.1.5.4 Expression des résultats :

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

N sa normalité

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

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

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

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

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

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

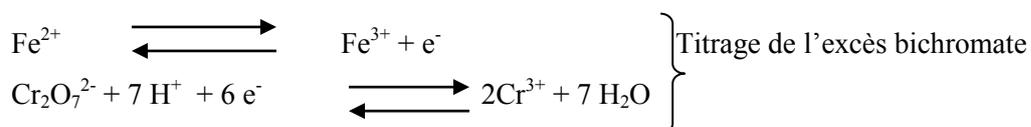
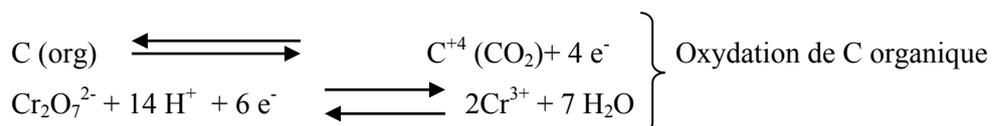
Comme $N = 0.01 \text{ N}$, alors : **CEC = V méq/100 g**

4.1.6 CARBONE ORGANIQUE

4.1.6.1 Principe

Les carbones organiques sont oxydés par un excès d'une solution de bichromate de potassium, en milieu acide.

L'excès sera ensuite déterminé à l'aide d'une solution de sulfate ferreux. Les réactions correspondantes seront les suivantes :



4.1.6.2 Réactifs

- Bichromate de potassium 1N : Dissoudre 49.04g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ dans une fiole jaugée de 1l avec de l'eau distillée et compléter le volume jusqu'au trait du jauge.
- Acide sulfurique concentré : 20 ml par échantillon.
- Sulfate ferreux 0.5 N : Dissoudre 140g de sulfate ferreux ($\text{FeSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$) dans une fiole jaugée de 1l avec de l'eau distillée. Ajouter 15 ml de H_2SO_4 concentré et compléter le volume à 1l avec de l'eau distillée.
- Complexe ferreux-ortho-phénantroline 0.025 M : dissoudre 1.485 g d'ortho-phénantroline monohydraté $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2, \text{H}_2\text{O}$ et 0.695g de $\text{FeSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$ dans de l'eau distillée et compléter le volume à 100 ml.

4.1.6.3 Procédure

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

- Ajouter 10 ml de bichromate de potassium 1N et faire tourner l'erenmeyer pour faire disperser le sol dans la solution.
- Ajouter rapidement 20 ml de H₂SO₄ concentré. Tourner l'erenmeyer puis agiter vigoureusement pendant 1 mn.
- Laisser reposer pendant 30 mn. Ajouter 200 ml d'eau distillée. Ajouter 4 gouttes d'orthophénantroline et titrer la solution avec FeSO₄ 0.5N.
- La fin de la réaction s'observe par le virage d'une coloration verte intense au rouge violacé.
- Faire un essai à blanc dans les mêmes conditions.

4.1.6.4 Calcul

Carbone organique (%) = $(N_{ox} \cdot V_{ox} - N_{red} \cdot V_{red}) \cdot 0.39 / \text{masse du sol}$

Ox : bichromate de potassium

Red : sulfate ferreux

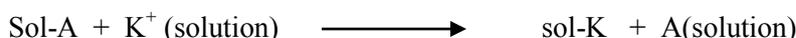
Le taux de la matière organique étant obtenu par la formule simplifiée suivante :

M.O% = carbone % x 1.72

4.1.7 ACIDITE D'ECHANGE

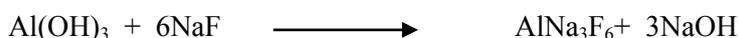
4.1.7.1 Principe

Les cations acides échangeables (Al³⁺ et H⁺) sont extraits dans le sol par une solution normale de KCl à pH neutre, suivant la relation d'équilibre ci-dessous :



A : cation acide

Ils sont ensuite titrés par une solution diluée de NaOH. L'hydroxyde d'Aluminium ainsi obtenu sera complexé par une solution de NaF suivant les réactions chimiques ci-après :



NaOH ainsi formé sera titré par une solution diluée de HCl suivant la réaction chimique ci-après:



4.1.7.2 Réactifs

- KCl 1N
- NaF 1N
- Solution standard de HCl 0.01N.
- Solution standard de NaOH 0.01N.
- Solution de phénolphtaléine. Dissoudre 0.1g de phénolphtaléine dans 100 ml d'éthanol

4.1.7.3 Procédure

- Peser 10g de sol de diamètre 2 mm dans un erlenmeyer de 125 ml.
- Ajouter 25 ml de KCl 1M. Bien agiter pendant quelques minutes et laisser reposer pendant 30 mn.
- Passer le contenu de l'erlenmeyer sur un Büchner adapté à une fiole à vide et garni d'un papier filtre. Filtrer. Rincer plusieurs fois le contenu de Büchner par 10 ml de KCl 1M jusqu'à ce que le volume total du filtrat atteigne 100 ml environ.
- Enlever le Büchner et ajouter 4 à 5 gouttes de phénolphthaléine dans le filtrat.
- Titrer ensuite avec une solution de NaOH 0.01N jusqu'à l'obtention d'une coloration rose très pâle. Soit V_{NaOH}^E le volume de la solution de soude versée.
- Ajouter ensuite 10 ml de la solution de NaF 1M et titrer avec la solution de HCl 0.01N jusqu'à la disparition de la couleur rose. Soit V_{HCl}^1 le volume de HCl versé.
- Attendre 30 mn. S'il y a réapparition de la coloration rose, retitrer par HCl. Soit V_{HCl}^2 le volume versé.
- Le volume total de HCl versé sera donc : $V_{\text{HCl}}^E = V_{\text{HCl}}^1 + V_{\text{HCl}}^2$
- Faire un essai à blanc avec 10 ml de KCl dans les mêmes conditions. Soit V_{NaOH}^B et V_{HCl}^B les volumes respectifs de NaOH et de HCl versés.

4.1.7.4 Expression des résultats

Mesure de l'acidité totale en méq/100g

$$\text{méq/100g d'acidité totale} = (V_{\text{NaOH}}^E - V_{\text{NaOH}}^B) \cdot N_{\text{NaOH}} \cdot 10 / \text{masse du sol}$$

Mesure de l'aluminium échangeable

$$\text{méq/100g d'aluminium échangeable} = (V_{\text{HCl}}^E - V_{\text{HCl}}^B) \cdot 10 / \text{masse du sol}$$

Mesure de l'hydrogène échangeable

$$\text{méq/100g d'hydrogène échangeable} = \text{méq/100g d'acidité totale} - \text{méq/100g d'aluminium échangeable}$$

4.1.8 AZOTE KJELDAHL

4.1.8.1 Principe

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

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

4.1.8.2 Réactifs

- Acide sulfurique concentré (H_2SO_4)
- Catalyseur de minéralisation Kjeltab : mélange de 3.5 g de K_2SO_4 et de 0.4 g de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ par échantillon.
- Solution d'hydroxyde de sodium 10 N
- Solution d'acide sulfurique 0.01 N
- Indicateur mixte : dissoudre 0.0495 g de vert de bromocrésol et 0.033 g de rouge de méthyle dans 50 ml d'éthanol.
- Solution d'acide borique à 2% : Dans une fiole jaugée de 2 L, dissoudre 40 g de H_3BO_3 dans 1800 ml d'eau distillée. Ajouter ensuite 40 ml de la solution de l'indicateur mixte. Mélanger et ajuster le volume avec de l'eau distillée jusqu'au trait de la jauge.

4.1.8.3 Mode opératoire

- Minéralisation de l'azote organique.

Dans un tube de digestion, introduire successivement 1g de sol à 0.5 mm de diamètre, 1 catalyseur de minéralisation et 10 ml d'acide sulfurique concentré. Chauffer fortement (environ $430^\circ C$) pendant 30 minutes. Après refroidissement, transvaser le contenu du tube de digestion dans une fiole de 50 ml. Ajuster au trait de la jauge avec de l'eau distillée.

- Distillation de l'azote

Dans l'appareil à distillation, introduire 10 ml de la prise d'essai et 10 ml de la solution de soude. Recueillir le distillat dans un erlenmeyer de 125 ml contenant 20 ml de la solution d'acide borique. Effectuer le dosage avec la solution d'acide sulfurique.

Un témoin est préparé dans les mêmes conditions.

4.1.8.4 Expression des résultats :

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

N sa normalité

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

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

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

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

Comme la masse d'un milliéquivalent d'azote étant 14 mg, la quantité d'azote dans 1 g de sol sera :

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

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

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

Comme $N = 0.01 N$, alors :

$$N\% = V \times 0.07$$

4.2 Résultats des analyses

Tableau 20: Récapitulation de la physico-chimie des sites d'étude

Site	pH eau	C (%)	N (%)	C/N	P (Bray II) (ppm)	Bases échangeables (méq/100g)				Granulométrie (%)		
						Ca	Mg	K	Na	Argile	Limon	Sable
Site miné (0-25)	5,63	0,04	0,004	10,0	1,7	0,95	0,63	0,04	0,10	12	33	55
Site miné (25-50)	5,50	0,12	0,012	10,0	2,9	1,15	0,70	0,04	0,33	10	33	57
Rehab (1an) (0-25)	4,61	0,33	0,032	10,3	1,6	2,00	0,82	0,18	0,30	21	19	60
Rehab (1an) (25-50)	4,70	0,15	0,012	12,5	3,2	1,80	0,45	0,10	0,25	21	17	62
Rehab (3 ans) (0-25)	5,15	1,96	0,119	16,5	1,6	1,70	0,63	0,08	0,16	23	17	60
Rehab (3 ans) (25-50)	5,03	1,15	0,063	18,3	0,6	1,70	0,29	0,04	0,14	25	17	58
Témoin (3ans) (0-25)	4,32	1,65	0,077	21,4	1,8	1,05	0,03	0,02	0,10	16	17	67
Témoin (3ans) (25-50)	5,01	0,64	0,035	18,3	1,8	1,15	0,05	0,02	0,24	10	15	75
ZC azonale (0-25)	4,56	6,77	0,308	22,0	3,0	1,80	0,42	0,13	0,35	11	13	76
ZC azonale (25-50)	4,44	2,82	0,098	28,8	1,5	1,60	0,20	0,06	0,36	17	17	66
Zonale ZC (0-25)	3,88	4,38	0,266	16,5	7,5	0,50	0,32	0,10	0,17	20	10	70
Zonale ZC (25-50)	4,45	2,29	0,154	14,9	1,4	0,65	0,12	0,05	0,10	24	10	66

5 Analyses microbiologiques

Pour les analyses microbiologiques, les analyses seront effectuées au laboratoire du CNRE (Centre Nationale de Recherche sur l'Environnement) sis à Tsimbazaza-Antananarivo.

<i>Nb site</i>	<i>Nb fosses de prélèvement/site</i>	<i>Nb échantillons /site</i>	<i>Nb total échantillons</i>	<i>Types d'analyses / échantillon</i>
6	6	1	6	Description de la communauté mycorhizienne Biomasse microbienne totale Actinomycètes Azotobacter

NB :

Les six (06) sites de prélèvement sont :

- La zone de conservation zonale
- La zone de conservation azonale
- Le site réhabilité âgé de 3ans
- Le site réhabilité âgé de 1an
- Le témoin âgé de 3ans
- Le site miné

L'échantillon prélevé pour chaque site est un mélange des terres végétales appartenant à l'intervalle de 0-15cm en dessous du sol.

5.1 Méthodes d'analyses (CNRE, 2013)

5.1.1 Dénombrement des groupes des microorganismes spécifiques

5.1.1.1 Méthode quantitative: Dénombrement par la méthode des suspensions-dilutions

a) Préparation de la solution mère

Pour chaque traitement, 10g de sol sont mis en suspension dans 90ml d'eau distillée stérile. La solution est agitée pendant 10min sur un agitateur magnétique puis laissée décanter une à 2min.

b) Préparation de la solution dilution (dilution en cascade)

1ml de la solution mère est versé dans un tube contenant 9ml d'eau distillée stérile. Après agitation 1ml de la solution est prélevé stérilement, puis transféré dans un deuxième tube contenant comme le premier, 9ml d'eau distillée stérile. La dilution se fait ainsi jusqu'à 10⁻⁴.

c) *Méthode de dénombrement*

Le dénombrement consiste à compter les colonies présentes sur les boîtes en Unité Formant Colonie (UFC). Le comptage se fait macroscopiquement. En tenant compte des caractéristiques des colonies sur son milieu approprié, seules les boîtes ayant 30 à 300 UFC sont retenues. Le nombre d'Unité Formant Colonie est déterminé selon la formule :

$$\text{UFC} = \frac{\text{Nombre de colonies} \times \text{Facteur de dilution finale}}{\text{Poids sec du sol}}$$

Microorganismes	Milieu de culture	Durée d'incubation dans 30°C
Actinomycète	Waksman	7 jours
Azotobacter	MA	8 jours

Milieu Waksman (Waksman, 1961) en g/l

Glucose	20g
Casitone	05g
NaCl	05g
Extrait de viande	03g
Agar	20g

Milieu MA pour 1L :

Glucose	5g
Solution saline A	30cm ³
Phosphate dissodique	2g
Phosphate monopotassique	10g
Eau	970cm ³
Agar	20g

Solution saline A

KH ₂ PO ₄	5g
MgSO ₄	2,5g
NaCl	2,5g
Fe ₂ (SO ₄) ₃	0,05g
MnSO ₄	0,05g
Eau	1000ml

5.1.2 *Dénombrement des spores de champignons endomycorhiziens*

La densité et la diversité morphologique des spores de champignons MVA ont été évaluées selon la méthode décrite par Sieverding (1991). Les spores ont été extraites à partir des échantillons de sol (100 g) par des séries de tamisage (200 µm, 100 µm, 80 µm et 50 µm) sous un jet d'eau. Deux séries de centrifugation ont été réalisées, la première à 5000 tours pendant 5mn avec de l'eau distillée et le deuxième pendant 3 mn à 1000 tours après ajout de saccharose 60% (m:v). Les spores ayant migrées vers le haut par gradient de concentration ont été récupérées par filtration du surnageant à travers un filtre millipore et récupérées sur du papier Wattman N°1. L'observation est effectuée sous loupe binoculaire (grossissement ×40).

Les spores ont été classées selon leur taille, leur aspect et leur couleur puis comptées (Walker, 1983). La densité des spores est exprimée en nombre de spore par gramme de sol.

5.1.3 *Protocole de la fluorescéine diacetate*

5.1.3.1 Rappel

La conservation des échantillons de sol devant servir aux analyses enzymatiques doit toujours se faire à (+4°C).

5.1.3.2 Pesées

Prise d'essai optimisé à 1g de sol pour la fluorescéine diacétate : cependant cela n'est pas une règle absolue, ce poids peut varier selon la nature du sol.

On fait 4 pesées par échantillon de sol : le 1er sert de témoin enzyme (TE) et les trois autres constituent les essais (E). Prévoir un tube sans sol pour témoin substrat (TS). A cause de l'acétone, il est préférable d'utiliser des tubes en verre.

5.1.3.3 Tampons et pH :

On utilise le tampon potassium phosphate au pH 7,6

a) Tampon potassium phosphate

Solution stock de K_2HPO_4 et de KH_2PO_4 à 60 mM :

Dissoudre 8,7g de K_2HPO_4 et 1,3g de KH_2PO_4 dans 800ml d'eau déminéralisée.

Ajuster le pH à 7,6 avec de NaOH.

Compléter à 1L et garder 4°C.

b) Substrat

C'est la fluorescéine diacetate ou FDA : réf : F7378 (sigma)

Préparer une solution à 1mg /ml dans de l'acétone et conserver à -20°C.

c) Réactifs

On utilise soit le mélange chloroforme/méthanol (2 : 1) ou de l'acétone à 100%.

Pour la première option : prélever 666ml de chloroforme et compléter à 1L avec du méthanol.

d) Dosage

TS (témoin substrat) : 15ml de tampon + 200 μ l de FDA

TE (témoin enzyme) : 15ml de tampon+ 200 μ l H₂O + 1g de sol

E (essai) : 15ml de tampon + 200 μ l de FDA + 1g de sol

Boucher les tubes et vort²xer légèrement.

Incuber pendant 1h sous agitation à 30°C.

e) Arrêt de la réaction

Il se fait par le mélange chloroforme/méthanol ou par l'acétone à 100%.

Au bout d'une heure d'incubation, prélever dans des tubes eppendorfs 1ml de cette solution et ajouter 1ml d'acétone.

Vortexer et centrifuger pendant 5mn à 1000 tours/mn.

f) Lecture au spectrophotomètre

Prélever 1ml du surnageant et lire la DO au spectro à 490 nm.

Pour la lecture, faire l'auto zéro du spectro avec 0 μ g /ml de la fluorescéine standard.

Lire dans l'ordre : Témoin substrat.... Essais.

Faire un témoin substrat pour chaque échantillon.

Utiliser des cuves spectro en verre à cause de l'acétone

5.1.3.4 Gamme étalon de la fluorescéine.

a) Solution mère de fluorescéine à 1mg /ml

Dissoudre 100mg de fluorescéine (F 7505 SIGMA) dans 100ml d'acétone.

b) Solution fille de fluorescéine à 100 μ g/ml

Diluer 1ml de la solution – mère dans 9ml d'acétone

Calibration des standards : Faire 6 points de gamme de la manière suivante :

0 μ g : 1000 μ l de tampon + 1000 μ l d'acétone + 0 μ l de la solution standard

1 μ g : 990 μ l de tampon + 990 μ l d'acétone +10 μ l de la solution standard

2 μ g : 980 μ l de tampon + 980 μ l d'acétone +20 μ l de la solution standard

3 μ g : 970 μ l de tampon + 970 μ l d'acétone + 30 μ l de la solution standard

4 μ g : 960 μ l de tampon + 960 μ l d'acétone + 40 μ l de la solution standard

5 μ g : 950 μ l de tampon + 950 μ l d'acétone + 50 μ l de la solution standard

Vortexer et lire la DO à 490 nm

5.2 Résultats des analyses

Tableau 21: Activité de la biomasse microbienne totale pour chaque site

Site	Activité biomasse microbienne totale	Actinomycètes (UCF/5g de sol)	Azotobacter (UCF/5g de sol)
	µg de Fluorescence/heure/g sol		
Site miné	11,77	2667	0
Rehab 1an	173,95	5667	4667
Rehab 3ans	185,37	1667	10667
Non rehab 3ans	81,21	4667	0
ZC azonale	241,92	359000	10667
ZC zonale	299,83	29667	11667

Tableau 22: Structure des communautés mycorhyziennes du sol

Site	Densité sporale	Pourcentage de chaque type de spore			
	spore/100g sol	Noir (%)	Marron (%)	Brun (%)	Jaune (%)
Site miné	40	40	12,5	15	32,5
Non rehab 3ans	161	26,71	21,74	6,83	44,72
Rehab 1an	123	45,53	22,76	5,69	26,02
Rehab 3ans	73	34,25	46,58	8,22	10,96
ZC azonale	272	31,99	34,19	21,32	12,5
ZC zonale	195	30,26	40	11,28	18,46

6 Données floristiques

6.1 Liste des espèces inventoriées par site d'étude

SITE DE REFERENCE NATURELLE ZONALE	Nom vernaculaire	Genre	Espèce	Famille	Forme biologique
	amalomanta	<i>Cabucala</i>	<i>cryptophlebia</i>	APOCYNACEAE	ligneuse arborée
	famelona	<i>Chrysophyllum</i>	<i>boivianum</i>	SAPOTACEAE	ligneuse arborée
	Hazoambo	<i>Xylopia</i>	<i>danguyella</i>	ANONACEAE	ligneuse arborée
	hazomboangy	<i>Suregada</i>	<i>boiviana</i>	EUPHORBIACEAE	ligneuse arborée
	hazondomoina	<i>Amyrea</i>	<i>Humberti</i>	EUPHORBIACEAE	ligneuse arborée
	hazontoho	<i>Oncostemum</i>	<i>elephantipes</i>	MYRSINACEAE	ligneuse arborée
	kafe ala	<i>Tricalysia</i>	<i>cryptocalix</i>	RUBIACEAE	ligneuse arbustive
	kija	<i>Symphonia</i>	<i>Louvellii</i>	CLUSIACEAE	ligneuse arborée
	marankoditra	<i>Homalium</i>	<i>Humblotii</i>	FLACOURTIACEAE	ligneuse arborée
	matsoraka	<i>Ouratea</i>	<i>dependes</i>	OCHNACEAE	ligneuse arborée
	ranga	<i>Thecacoris</i>	<i>Perrieri</i>	EUPHORBIACEAE	ligneuse arborée
	tavolo	<i>Cryptocarya</i>	<i>Ovalifolia</i>	LAURACEAE	ligneuse arborée
	tsikafekafe	<i>Barleria</i>	<i>Sp</i>	ACANTHACEAE	ligneuse arbustive
	tsimahamasatsokona	<i>Memecylon</i>	<i>sabulosum</i>	MELASTOMATAACEAE	ligneuse arborée
	vandrika	<i>Pyrostria</i>	<i>Vandrika</i>	RUBIACEAE	ligneuse arborée
vanginambo	<i>Clerodendrum</i>	<i>Putre</i>	VERBENACEAE	ligneuse arborée	
varongy	<i>Ocotea</i>	<i>Laevis</i>	LAURACEAE	ligneuse arborée	
SITE DE REFERENCE NATURELLE AZONALE	Nom vernaculaire	Genre	Espèce	Famille	Forme biologique
	Bedoda	<i>Dypsis</i>	<i>hildebrandtii</i>	ARECACEAE	ligneuse arbustive
	Belavenona	<i>Mallotus</i>	<i>baillonianus</i>	EPHORBIACEAE	ligneuse arborée
	Fotsiavadika	<i>Croton</i>	<i>Sp</i>	EUPHORBIACEAE	ligneuse arborée
	Hafotra	<i>Grewia</i>	<i>Repanda</i>	TILIACEAE	ligneuse arborée
	Hazoambo	<i>Xylopia</i>	<i>danguyella</i>	ANONACEAE	ligneuse arborée
	Hazambararana	<i>Prothorus</i>	<i>Thouarsii</i>	ANACARDIACEAE	ligneuse arborée
	Hazombary	<i>Launtembergia</i>	<i>Coriacea</i>	EUPHORBIACEAE	ligneuse arborée
	Hazondomoina	<i>Amyrea</i>	<i>Humberti</i>	EUPHORBIACEAE	ligneuse arborée
	Karambitro	<i>Clerodendrum</i>	<i>Oscitans</i>	VERBENACEAE	ligneuse arborée
	Kija	<i>Symphonia</i>	<i>Louvellii</i>	CLUSIACEAE	ligneuse arborée
	Mangavony	<i>Saldinia</i>	<i>Sp</i>	RUBIACEAE	ligneuse arborée
	Marankoditra	<i>Homalium</i>	<i>Humblotii</i>	FLACOURTIACEAE	ligneuse arborée
	Maroandro	<i>Psychotria</i>	<i>Coursii</i>	RUBIACEAE	ligneuse arborée
	Menahihy	<i>Erythroxylum</i>	<i>Sp</i>	ERYTHROXYLACEAE	ligneuse arborée
	Mokaranana	<i>Macaranga</i>	<i>Alnifolia</i>	EUPHORBIACEAE	ligneuse arborée
	Pitsikahitra	<i>Canthium</i>	<i>Bosseri</i>	RUBIACEAE	ligneuse arborée
	Ramiandafy	<i>Neotina</i>	<i>Coursii</i>	SAPINDACEAE	ligneuse arborée
	Rotra	<i>Syzygium</i>	<i>Gavoala</i>	MYRTACEAE	ligneuse arborée
	Sangasanganakoholahy	<i>Cnestis</i>	<i>polyphylla</i>	CONARACEAE	ligneuse arbustive
	Tavolo	<i>Cryptocarya</i>	<i>Sp</i>	LAURACEAE	ligneuse arborée
	Tsimahamasantsokona	<i>Memecylon</i>	<i>sabulosum</i>	MELASTOMATAACEAE	ligneuse arborée
	Tsiramiramy	<i>Plagioscyphus</i>	<i>Louvellii</i>	SAPINDACEAE	ligneuse arborée
	Voantsilana	<i>Schefflera</i>	<i>Repanda</i>	ARALIACEAE	ligneuse arborée
	Voapaka	<i>Uapaca</i>	<i>Bojeri</i>	EUPHORBIACEAE	ligneuse arborée

SITE REHAB 3ANS	Nom vernaculaire	Genre	Espèce	Famille	Forme biologique
	Dingadingana	<i>Psiadia</i>	<i>Altissima</i>	ASTERACEAE	ligneuse arbustive
	Harongana	<i>Harungana</i>	<i>mad/sis</i>	HYPERICACEAE	ligneuse arborée
	Hazomboangy	<i>Suregada</i>	<i>boiviniana</i>	EUPHORBIACEAE	ligneuse arborée
	Molotrangaka	<i>Tarenna</i>	Sp	RUBIACEAE	ligneuse arborée
	Ravimbetro	<i>Bathiorhamnus</i>	<i>Louvelii</i>	RHAMNACEAE	ligneuse arborée
	Tsilaitra	<i>Norhonia</i>	<i>boiviniana</i>	OLEACEAE	ligneuse arborée
	Voamboana	<i>Dalbergia</i>	Sp	FABACEAE	ligneuse arborée
	Voretra	<i>Rhus</i>	<i>Taratana</i>	ANACARDIACEAE	ligneuse arborée
SITE REHAB 1AN	Nom vernaculaire	Genre	Espèce	Famille	Forme biologique
	Bakobako	<i>Solanum</i>	Sp	SOLANACEAE	ligneuse arbustive
	Dingadingana	<i>Psiadia</i>	<i>Altissima</i>	ASTERACEAE	ligneuse arbustive
	Famoilambo	<i>Dichrostachys</i>	<i>tenuifolia</i>	FABACEAE	ligneuse arbustive
	Fotsiavadika	<i>Croton</i>	Sp	EUPHORBIACEAE	ligneuse arborée
	Harongana	<i>Harungana</i>	<i>mad/sis</i>	HYPERICACEAE	ligneuse arborée
	Hasina	<i>Dracaena</i>	<i>Reflexa</i>	LILIACEAE	ligneuse arborée
	Hazombarorana	<i>Prothorus</i>	<i>Thouarsii</i>	ANACARDIACEAE	ligneuse arborée
	Hazomboangy	<i>Suregada</i>	<i>boiviniana</i>	EUPHORBIACEAE	ligneuse arborée
	Menahihy	<i>Erythroxylum</i>	<i>buxifolium</i>	ERYTHROXYLACEAE	ligneuse arborée
	Molotrangaka	<i>Tarenna</i>	Sp	RUBIACEAE	ligneuse arborée
	Pitsikahitra	<i>Canthium</i>	<i>Medium</i>	RUBIACEAE	ligneuse arborée
	Ramanjavona	<i>Vernonia</i>	<i>garnieriana</i>	ASTERACEAE	savane herbeuse
	Tavolo	<i>Cryptocarya</i>	<i>Ovalifolia</i>	LAURACEAE	ligneuse arborée
	Vakoka	<i>Trema</i>	<i>orientalis</i>	ULMACEAE	ligneuse arborée
	Voretra	<i>Rhus</i>	<i>Taratana</i>	ANACARDIACEAE	ligneuse arborée
TEMOIN NU 3ANS	Nom vernaculaire	Genre	Espèce	Famille	Forme biologique
	Ahipody	<i>Panicum</i>	<i>brevifolium</i>	POACEAE	savane herbeuse
	Anjavidy	<i>Philippia</i>	<i>Latifolia</i>	ERICACEAE	savane herbeuse
	Dingadingana	<i>Psiadia</i>	<i>Altissima</i>	ASTERACEAE	ligneuse arbustive
	Horombato	<i>Sporobolus</i>	<i>Indicus</i>	POACEAE	savane herbeuse
	Lalona	<i>Weinmannia</i>	<i>rutembergii</i>	CUNONIACEAE	ligneuse arbustive
	Ramanjavona	<i>Vernonia</i>	<i>garnieriana</i>	ASTERACEAE	savane herbeuse
	Rambiazina	<i>Helichrysum</i>	<i>gymnocephalum</i>	ASTERACEAE	savane herbeuse
	Tagnatrandraka	<i>Lycopodium</i>	<i>Clavatum</i>	LYCOPODIACEAE	savane herbeuse
Tegnina	<i>Imperata</i>	<i>cylindrica</i>	POACEAE	savane herbeuse	

6.2 Structure totale

Tableau 23: Densité moyenne selon les classes de diamètre

Site	Intervalle de diamètre (cm)				
	<5	[5-10[[10-15[[15-20[>20
ZC zonale	30000	2800	600	200	200
ZC azonale	35000	3200	800	100	0
Rehab 3ans	7200	700	0	0	0
Rehab 1an	5100	100	0	0	0
Témoin 3ans	0	0	0	0	0
Site miné	0	0	0	0	0

D: DHP = D_{1,30} pour les forêts naturelles

Dcollet pour la réhabilitation

6.3 Structure verticale

Tableau 24: Densité moyenne selon les classes d'hauteur

Site	Intervalle de hauteur (m)				
	<1	[1-5[[5-10[[10-15[>15
ZC zonale	20000	10000	2800	400	600
ZC azonale	25000	10000	3700	400	0
Rehab 3ans	6200	1700	0	0	0
Rehab 1an	5000	200	0	0	0
Témoin 3ans	0	0	0	0	0
Site miné	0	0	0	0	0

7 Traitement statistique sur la pédofaune

7.1 Données d'inventaire

Site d'étude	Strate	Répétition	Densité (effectif/m ³)	Site d'étude	Strate	Répétition	Densité (effectif/m ³)
1	1	1	18400	1	3	3	2400
1	1	2	18400	1	3	4	320
1	1	3	18720	1	3	5	1920
1	1	4	17440	1	3	6	5280
1	1	5	17120	2	1	1	2400
1	1	6	17440	2	1	2	3040
1	2	1	17280	2	1	3	1920
1	2	2	17120	2	1	4	1920
1	2	3	17120	2	1	5	7840
1	2	4	5760	2	1	6	1920
1	2	5	4960	2	2	1	16640
1	2	6	5440	2	2	2	1280
1	3	1	5440	2	2	3	16320
1	3	2	5440	2	2	4	16640

Site d'étude	Strate	Répétition	Densité (effectif/m3)
2	2	5	640
2	2	6	16320
2	3	1	0
2	3	2	160
2	3	3	1760
2	3	4	480
2	3	5	800
2	3	6	0
3	1	1	3520
3	1	2	2720
3	1	3	1920
3	1	4	3040
3	1	5	1920
3	1	6	480
3	2	1	1120
3	2	2	800
3	2	3	2240
3	2	4	1120
3	2	5	640
3	2	6	640
3	3	1	800
3	3	2	480
3	3	3	800
3	3	4	1120
3	3	5	0
3	3	6	0
4	1	1	0
4	1	2	0
4	1	3	0
4	1	4	0
4	1	5	0
4	1	6	0
4	2	1	0
4	2	2	0
4	2	3	0
4	2	4	0
4	2	5	0
4	2	6	0
4	3	1	0
4	3	2	0
4	3	3	0
4	3	4	0
4	3	5	0
4	3	6	0

Site d'étude	Strate	Répétition	Densité (effectif/m3)
5	1	1	1280
5	1	2	5120
5	1	3	2880
5	1	4	160
5	1	5	960
5	1	6	0
5	2	1	320
5	2	2	1600
5	2	3	2240
5	2	4	640
5	2	5	0
5	2	6	0
5	3	1	0
5	3	2	160
5	3	3	160
5	3	4	320
5	3	5	0
5	3	6	320
6	1	1	0
6	1	2	0
6	1	3	0
6	1	4	0
6	1	5	0
6	1	6	0
6	2	1	0
6	2	2	0
6	2	3	0
6	2	4	0
6	2	5	0
6	2	6	0
6	3	1	0
6	3	2	0
6	3	3	0
6	3	4	0
6	3	5	0
6	3	6	0

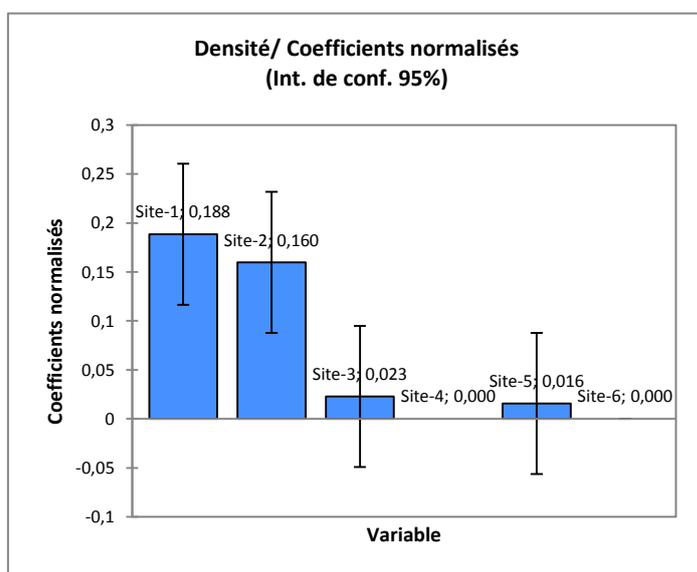
7.2 Analyse de la variance

7.2.1 Corrélation densité-sites

Matrice de corrélation entre la densité et les sites :

Variables	Site-1	Site-2	Site-3	Site-4	Site-5	Site-6	Densité
Site-1	1,000	-0,200	-0,200	-0,200	-0,200	-0,200	0,149
Site-2	-0,200	1,000	-0,200	-0,200	-0,200	-0,200	0,114
Site-3	-0,200	-0,200	1,000	-0,200	-0,200	-0,200	-0,050
Site-4	-0,200	-0,200	-0,200	1,000	-0,200	-0,200	-0,077
Site-5	-0,200	-0,200	-0,200	-0,200	1,000	-0,200	-0,059
Site-6	-0,200	-0,200	-0,200	-0,200	-0,200	1,000	-0,077
Densité	0,149	0,114	-0,050	-0,077	-0,059	-0,077	1,000

Coefficients normalisés :

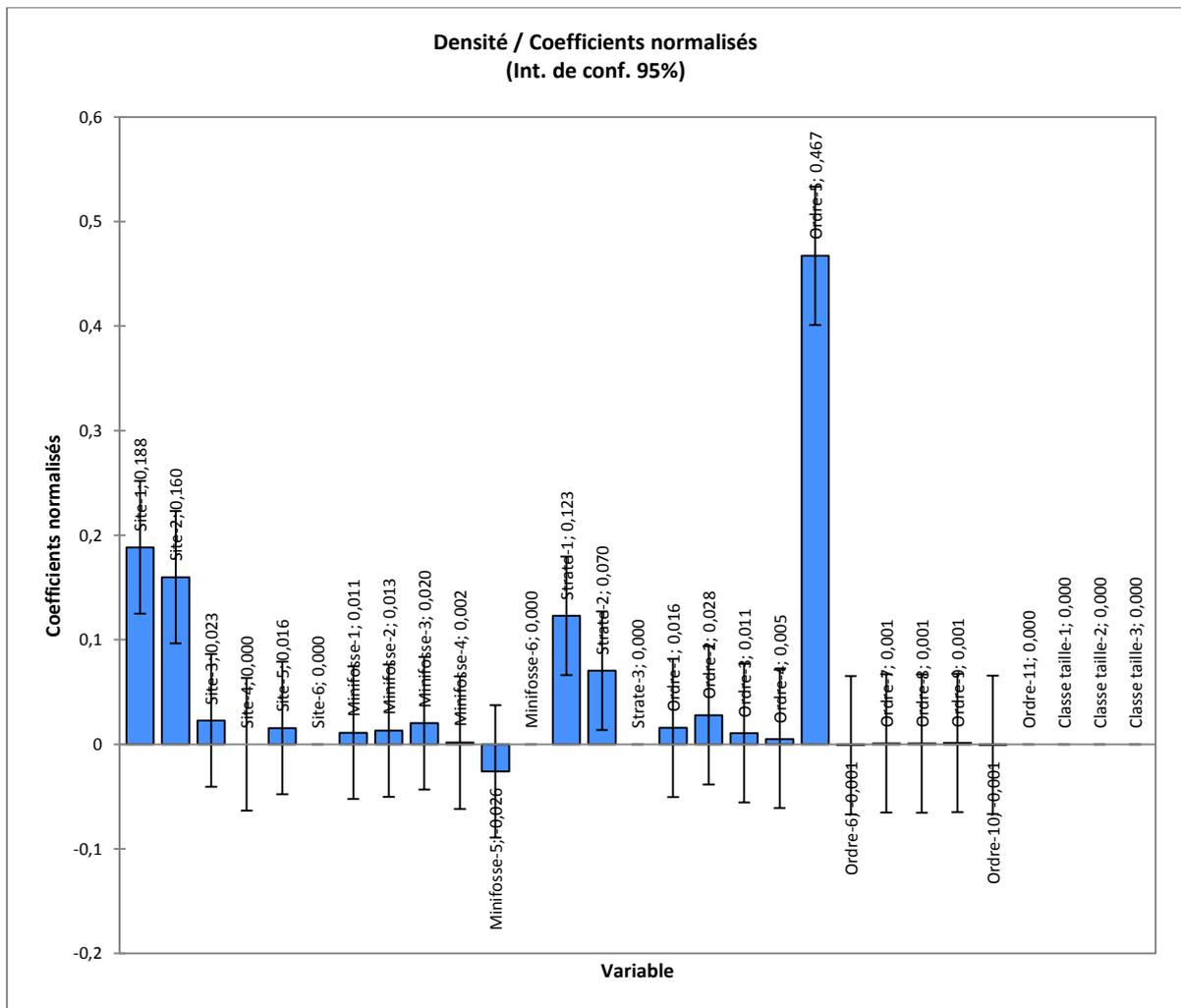


7.2.2 Analyse multivariée

Coefficients normalisés :

Source	Valeur	Ecart-type	T	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Site-1	0,188	0,032	5,834	< 0,0001	0,125	0,252
Site-2	0,160	0,032	4,947	< 0,0001	0,096	0,223
Site-3	0,023	0,032	0,705	0,481	-0,041	0,086
Site-4	0,000	0,032	0,000	1,000	-0,063	0,063
Site-5	0,016	0,032	0,481	0,630	-0,048	0,079
Site-6	0,000	0,000				
Minifosse-1	0,011	0,032	0,343	0,732	-0,052	0,074
Minifosse-2	0,013	0,032	0,405	0,685	-0,050	0,076
Minifosse-3	0,020	0,032	0,624	0,533	-0,043	0,084
Minifosse-4	0,002	0,032	0,048	0,962	-0,062	0,065

Minifosse-5	-0,026	0,032	-0,805	0,421	-0,089	0,037
Minifosse-6	0,000	0,000				
Strate-1	0,123	0,029	4,250	< 0,0001	0,066	0,179
Strate-2	0,070	0,029	2,433	0,015	0,014	0,127
Strate-3	0,000	0,000				
Ordre-1	0,016	0,034	0,465	0,642	-0,051	0,082
Ordre-2	0,028	0,034	0,820	0,413	-0,039	0,094
Ordre-3	0,011	0,034	0,316	0,752	-0,056	0,077
Ordre-4	0,005	0,034	0,148	0,882	-0,061	0,071
Ordre-5	0,467	0,034	13,848	< 0,0001	0,401	0,533
Ordre-6	-0,001	0,034	-0,026	0,979	-0,067	0,065
Ordre-7	0,001	0,034	0,026	0,979	-0,065	0,067
Ordre-8	0,001	0,034	0,019	0,985	-0,066	0,067
Ordre-9	0,001	0,034	0,039	0,969	-0,065	0,067
Ordre-10	-0,001	0,034	-0,019	0,985	-0,067	0,066
Ordre-11	0,000	0,000				
Classe taille-1	0,000	0,000				
Classe taille-2	0,000	0,000				
Classe taille-3	0,000	0,000				



8 Classification taxonomique de la pédofaune

Embranchement	Classe	Ordre	Famille		
Protozoaires					
Némathelminthes	Nématodes				
Annélides	Lumbricidés				
	Enchytréides				
Mollusques	Gastéropodes				
Arthropodes	Crustacés		Isopodes		
	Diplopodes				
	Chilopodes				
	Arachnides	Acariens	Gamasides		
			Oribates		
		Actinedides			
		Aranéides			
		Opilions			
	Insectes	Collemboles			
		Diploures			
		Thysanoures			
		Isoptère			
		Diptères (Larves)			
		Hyménoptères			
		Dermaptères			
		Orthoptères			
		Hémiptère			
		Lépidoptère (chenille)			
		Coléoptères	Carabidae		
			Elateridae		
Staphylinidae					
Alleculidae					
Bostrichidae					
Scarabeidae					
géotrupidae					
Curculionidae					
Histeridae					
Siphidae					

Les protozoaires (Protistes)

	<p><i>Classe de taille</i> : microfaune, 3 µm à 3 mm <i>Habitats</i> : eau pelliculaire et interstitielle <i>Abondance</i> : 10 à 1000 millions d'individus par mètre carré (estimations) <i>Régime alimentaire</i> : bactériophages, saprophages, prédateurs d'autres protozoaires <i>Intérêt agronomique</i> : très important pour les équilibres biologiques au niveau des micro-organismes, principaux prédateurs de bactéries</p>
---	--

Les nématodes (Némathelminthes)

	<p><i>Classe de taille</i> : microfaune – 0.5 à 3 mm <i>Habitats</i> : eau pelliculaire et interstitielle en zone d'enracinement et matière en décomposition <i>Abondance</i> : 100 à 1000 individus/g de terre <i>Régime alimentaire</i> : phytophages, carnivores <i>Intérêt agronomique</i> : ravageurs ou auxiliaire, ce sont des intermédiaires entre microflore et mésofaune</p>
---	--

Les vers de terre (Annélides, oligochètes)

	<p><i>Classe de taille</i> : macro- mégafaune, jusqu'à 35 cm <i>Habitats</i> : litière et sol <i>Abondance</i> : entre 30 et 100g/m² <i>Régime alimentaire</i> : détritivores (racines morte, humus) <i>Intérêt agronomique</i> : aération du sol, brassage des éléments, amélioration de la structure, dégradation des matières organiques</p>
--	--

Là où les vers de terre sont présents, ils forment entre 50 et 75% de la biomasse animale (Bachelier, 1979)

Selon Bouché (1972), on distingue trois catégories :

- Les épigés vivent en surface, ils sont liés à la litière, au fumier, compost ou encore bois mort
- Les anéciques sont les vers verticaux, de grande taille, ils creusent un réseau de galerie. Ils ont le plus d'impact sur le sol
- Les endogés vivent en profondeur et « horizontalement »

Les enchytréides (Annélides, oligochètes)

	<p><i>Classe de taille</i> : mésofaune, 2 à 35 mm <i>Habitats</i> : litière (10 premiers centimètres du sol) <i>Abondance</i> : entre 3 à 53g/m², 10.000 à 290.000 indiv/m² <i>Régime alimentaire</i> : microphages, phytosaprophages <i>Intérêt agronomique</i> : augmentation de la porosité superficielle, stimule l'activité des micro-organismes</p>
---	---

Les mollusques (escargots, limaces)

	<p><i>Classe de taille</i> : macrofaune,</p> <ul style="list-style-type: none">• Escargots (coquille) : 2 à 50 mm de haut, 1 à 50mm de diamètre• Limaces : 20 à 200 mm de long <p><i>Habitats</i> : dans les sols et les litière humides (10 premiers centimètres)</p> <p><i>Abondance</i> : 110-150 individus/m²</p> <p><i>Régime alimentaire</i> : phytophages et quelques espèces carnivores</p> <p><i>Intérêt agronomique</i> : ravageurs importants des cultures</p>
---	---

Les cloportes (Arthropodes, Crustacés, Isopodes)

	<p><i>Classe de taille</i> : macrofaune, 5 à 20 mm</p> <p><i>Habitats</i> : litière et annexes du sol⁷</p> <p><i>Abondance</i> : jusqu'à 8.000 individus/m² en prairie</p> <p><i>Régime alimentaire</i> : phytosaprophages (feuilles, bois mort)</p> <p><i>Intérêt agronomique</i> : Responsable de la fragmentation : première étape de la dégradation de la matière organique, favorise l'activité des micro-organismes</p>
---	---

Les diplopodes (Arthropodes, Myriapodes)

	<p><i>Classe de taille</i> : macrofaune, 5 à 50 mm</p> <p><i>Habitats</i> : litière et annexes du sol</p> <p><i>Abondance</i> : plusieurs centaines par mètre carré lorsque les vers de terre sont rares.</p> <p><i>Régime alimentaire</i> : phytosaprophages (feuilles, bois mort), coprophages</p> <p><i>Intérêt agronomique</i> : Responsable de la fragmentation : première étape de la dégradation de la matière organique, favorise l'activité des micro-organismes</p>
--	---

Les chilopodes (Arthropodes, Myriapodes)

	<p><i>Classe de taille</i> : macrofaune, 5 à 100 mm</p> <p><i>Habitats</i> : milieux humides (litières, compost, habitats cryptozoïques)</p> <p><i>Abondance</i> : 40 à 400 individus/m²</p> <p><i>Régime alimentaire</i> : carnivores, peuvent ingérer de la litière</p> <p><i>Intérêt agronomique</i> : contrôle des populations de proies (auxiliaires comme ravageurs)</p>
---	---

Les Arachnides (Arthropodes, Chélicérates)

Ils appartiennent à l'embranchement des arthropodes et sous-embranchement des chélicérates. La classe des arachnides comporte 11 ordres dont 5 seulement sont présents en zone tempérée : aariens, aranéides, opilions, pseudo-scorpions et scorpions. Les acariens ont un rôle important sur le fonctionnement du sol. Les aranéides et opilions évoluent en surface du sol, ce sont des prédateurs généralistes, efficaces contre les ravageurs des cultures.

⁷ Structure qui diversifie la surface du sol : bois mort, cadavres, bouses, tas de cailloux

Les acariens (Gamasides, Actinédides, Oribates)

	<p><i>Classe de taille</i> : mésofaune, 0.1 à 6 mm <i>Habitats</i> : litière et annexes du sol <i>Abondance</i> : très abondants (jusqu'à 425.000 oribates/m² dans les sols de forêt) <i>Régime alimentaire</i> :</p> <ul style="list-style-type: none">• Gamasides → carnivores, fongivores• Actinédides → carnivores, suceurs de sèves, ectoparasites• Oribates → phytosaprophages, microphages, coprophages, pollinivores <p><i>Intérêt agronomique</i> : microfragmentation et brassage des matières organiques, dispersion et régulation de la microflore, régulation des populations de la micro et mésofaune</p>
---	--

Acarien oribate

Les aranéides et les opilions

	<p><i>Classe de taille</i> : macrofaune, 0.5 à 90 mm <i>Habitats</i> : litière, surface du sol <i>Abondance</i> : 40 à 400 individus/m² <i>Régime alimentaire</i> : prédateurs généralistes <i>Intérêt agronomique</i> : contrôle des populations de proie (ravageurs)</p>
---	---

Aranéides

Les insectes

De l'embranchement des arthropodes et sous embranchement des antennates ou mandibulates Ils sont classés en 42 ordres.

Les insectes présentent des comportements et des besoins très diversifiés. Les 4 ordres présentés ci-dessous interviennent plus spécialement dans le sol : les collemboles, les diptères, les coléoptères et les hyménoptères.

Les collemboles

	<p><i>Classe de taille</i> : mésofaune, 0.25 à 10 mm <i>Habitats</i> : jusqu'à 10 cm de profondeur avec le maximum dans les 3 premiers centimètres, également dans les annexes du sol <i>Abondance</i> : 2.000 à 200.000 individus/m² <i>Régime alimentaire</i> : fongivores (surtout), phytosaprophages, coprophages, pollinivores, carnivores, phytophages <i>Intérêt agronomique</i> : microfragmentation et brassage des matières organiques, dispersion et régulation de la microflore, stimulation des populations fongiques, peuvent devenir nuisibles</p>
---	--

Les coléoptères (larves et adultes):

Une vingtaine de familles est représentée dans le sol. Elles offrent des adaptations très variables aux conditions du sol, tant au niveau de la morphologique, que du régime alimentaire (Tableau 4). La diversité et l'abondance au sein de ce groupe en fait un acteur important du fonctionnement du sol et particulièrement les sols agricoles.

	<p><i>Classe de taille</i> : macrofaune</p> <ul style="list-style-type: none">• adultes → 0.5 à 75 mm• larves → <1 à 100 mm <p><i>Habitats</i> : surface du sol jusqu'à 1 m de profondeur, annexes du sol</p> <p><i>Abondance</i> : 10 à plusieurs centaines par mètre carré</p> <p><i>Régime alimentaire</i> : Tableau 4</p> <p><i>Intérêt agronomique</i> : prédateurs jouant un rôle dans l'équilibre biologique des sols, ravageurs des cultures, dégradation de la matière organique</p>
---	---

Coléoptère carabidés

Les diptères :

Les formes larvaires sont dominantes dans le sol. Elles montrent une grande diversité morphologique, écologique et comportementale. Elles peuvent utiliser les différentes ressources offertes par le sol et par ses annexes (Tableau 5). Si quelques espèces présentent des formes imaginales aptères vivant dans le sol, la plupart des adultes sont aériens.

	<p><i>Classe de taille</i> : macrofaune, 2 à 40 mm</p> <p><i>Habitats</i> : sol humide, litière et annexes du sol</p> <p><i>Abondance</i> : 10 à quelques milliers d'individus par mètre carré (souvent répartis en tache)</p> <p><i>Régime alimentaire</i> : Tableau 5</p> <p><i>Intérêt agronomique</i> : fragmentation de la litière, dégradation des matières organiques, prédateurs jouant un rôle dans l'équilibre biologique des sols, ravageurs des cultures</p>
--	--

Larve de tipulidés

Les fourmis (Hyménoptères – Formicidés)

	<p><i>Classe de taille</i> : macrofaune</p> <p><i>Habitats</i> : de la surface à plusieurs mètres en profondeur</p> <p><i>Abondance</i> : jusqu'à plusieurs millions d'individus à l'hectare regroupés en colonie ou supercolonie</p> <p><i>Régime alimentaire</i> : phytophages, granivores, carnivores, souvent omnivores</p> <p><i>Intérêt agronomique</i> : bioturbation du sol</p>
---	---

L'ordre des isoptères (termites) peut également avoir un impact fort sur le sol. Les effets les plus importants sur les sols agricoles sont cependant observés sous climat tropical. Sous les climats tempérés, trois espèces sont représentées. Elles vivent en société à l'intérieur d'un nid qu'ils construisent dans le sol, à sa surface ou dans le bois mort.

Les vertébrés

Seul un petit nombre de vertébrés influencent de manière significative le fonctionnement des sols. Les campagnols et les taupes peuvent avoir un impact considérable par bioturbation. À une échelle plus locale, les fouisseurs peuvent remuer de grande quantité de terre (lapin, blaireaux). D'autres mammifères n'appartenant pas à la pédofaune peuvent modifier la surface du sol (piétinement, labourage), et peuvent causer des dégâts importants dans les cultures.

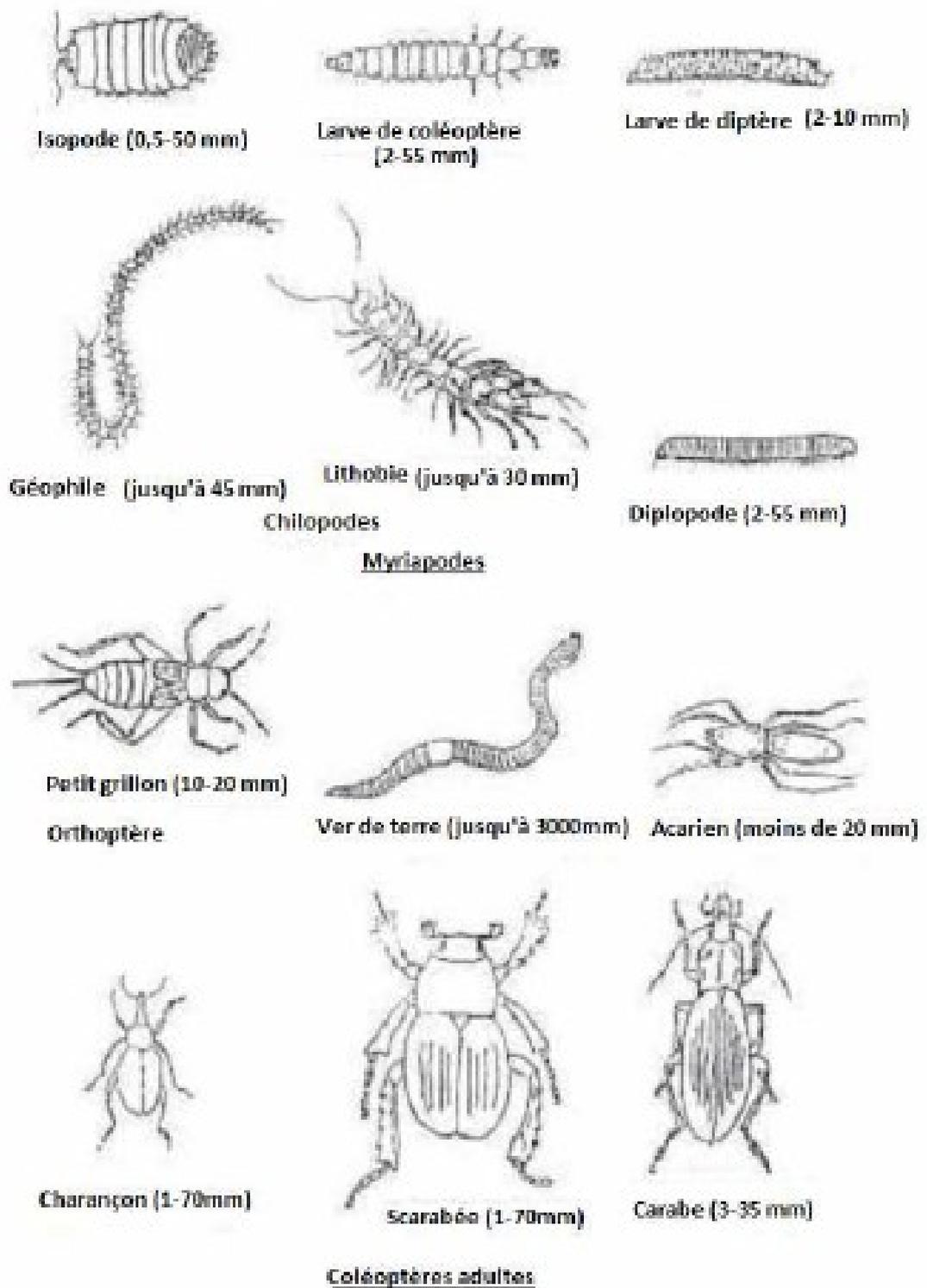


Figure 28: Les principaux représentants de la macrofaune du sol
 Source : BACHELIER, 1978

10 Rôle de la pédofaune (Courrier de l'environnement de l'INRA n°49, juin 2003)

Tableau I. Principaux groupes composant la pédofaune et leur rôle au sein de l'écosystème sol

	Qui sont-ils ?	Combien sont-ils ? (par m ² , dans un sol brun tempéré non cultivé, selon plusieurs auteurs, d'après G. Bachelier, 1979)	Que mangent-ils ?	Que produisent-ils ?	Classification fonctionnelle (d'après P. Lavelle et autres auteurs)
Microfaune	Protozoaires	de 100 à 1 000 millions	des bactéries et des champignons		microprédateurs
	Nématodes	de 1 à 20 millions	beaucoup d'espèces sont phytoparasites ; certaines sont prédatrices d'autres Nématodes et d'Acariens ; les autres sont saprophages	des pelotes fécales avec des fragments de 5 µm ³	microprédateurs ou transformateurs de litière
Mésafaune	Acariens	de 20 000 à 500 000	la plupart ingèrent des Bactéries, des pollens, des débris végétaux et animaux divers : ce sont des saprophages ; certains sont prédateurs	des pelotes fécales avec des fragments de 20 µm ³	transformateurs de litière
	Collemboles	de 20 000 à 500 000	la plupart sont saprophages ; quelques espèces sont prédatrices	des pelotes fécales avec des fragments de 20 µm ³	transformateurs de litière
	Enchytréides	de 10 000 à 50 000	des débris végétaux en décomposition, les déjections des micro-Arthropodes	des agrégats et des petites galeries	fouisseurs et transformateurs de litière
Macrofaune	Lombrics	de 50 à 400	des débris végétaux, qu'ils ingèrent avec de la terre	des agrégats organo-minéraux, des galeries, des turricules	ingénieurs de l'écosystème
	Larves de Diptères, de Coléoptères, de Lépidoptères...	larves de Diptères : 400 larves de Coléoptères : 100	les régimes varient selon les espèces : on trouve des saprophages, coprophages, nécrophages, prédatrices, phytophages	les saprophages produisent des pelotes fécales, les phytophages, beaucoup de dégâts dans les cultures	transformateurs de litière, consommateurs primaires ou prédateurs, selon les espèces
	Coléoptères adultes	quelques-uns	la plupart sont saprophages ; certaines espèces sont parasites des fourmilères	des pelotes fécales avec des fragments d'1 mm ³	transformateurs de litière
	Fourmis, Termites	très variable selon les lieux	les fourmis sont saprophages et/ou prédatrices selon les espèces, elles ingèrent aussi du mielat sucré ; les termites sont xylophages	des galeries ; les termites produisent des boulettes fécales organo-minérales	ingénieurs de l'écosystème
	Autres insectes	quelques-uns	ils se nourrissent d'une grande diversité de matières végétales et animales	des pelotes fécales	transformateurs de litière
	Myriapodes	250 (très variable)	les Diplopodes sont saprophages, les Chilopodes sont tous prédateurs-chasseurs	les saprophages produisent des pelotes fécales avec des fragments d'1 mm ³	transformateurs de litière ou macroprédateurs
	Cloportes	100	saprophages	des pelotes fécales avec des fragments d'1 mm ³	transformateurs de litière
	Araignées	quelques-unes	prédatrices d'autres Arthropodes		macroprédateurs
	Limaces et Escargots	50	ils se nourrissent de végétaux.		consommateurs primaires
Mégafaune	Taupe, marmotte, lapin, musaraigne, crapaud fouisseur, etc.		les Mammifères Insectivores mangent des Insectes, les Rongeurs grignotent les plantes et les racines	de très gros trous qui peuvent être des habitats pour une faune nombreuse, des déjections et des cadavres sources de matière organique	bioturbateurs (ils remuent le sol) et macroprédateurs

11 Classification de la macrofaune suivant leur fonction trophique

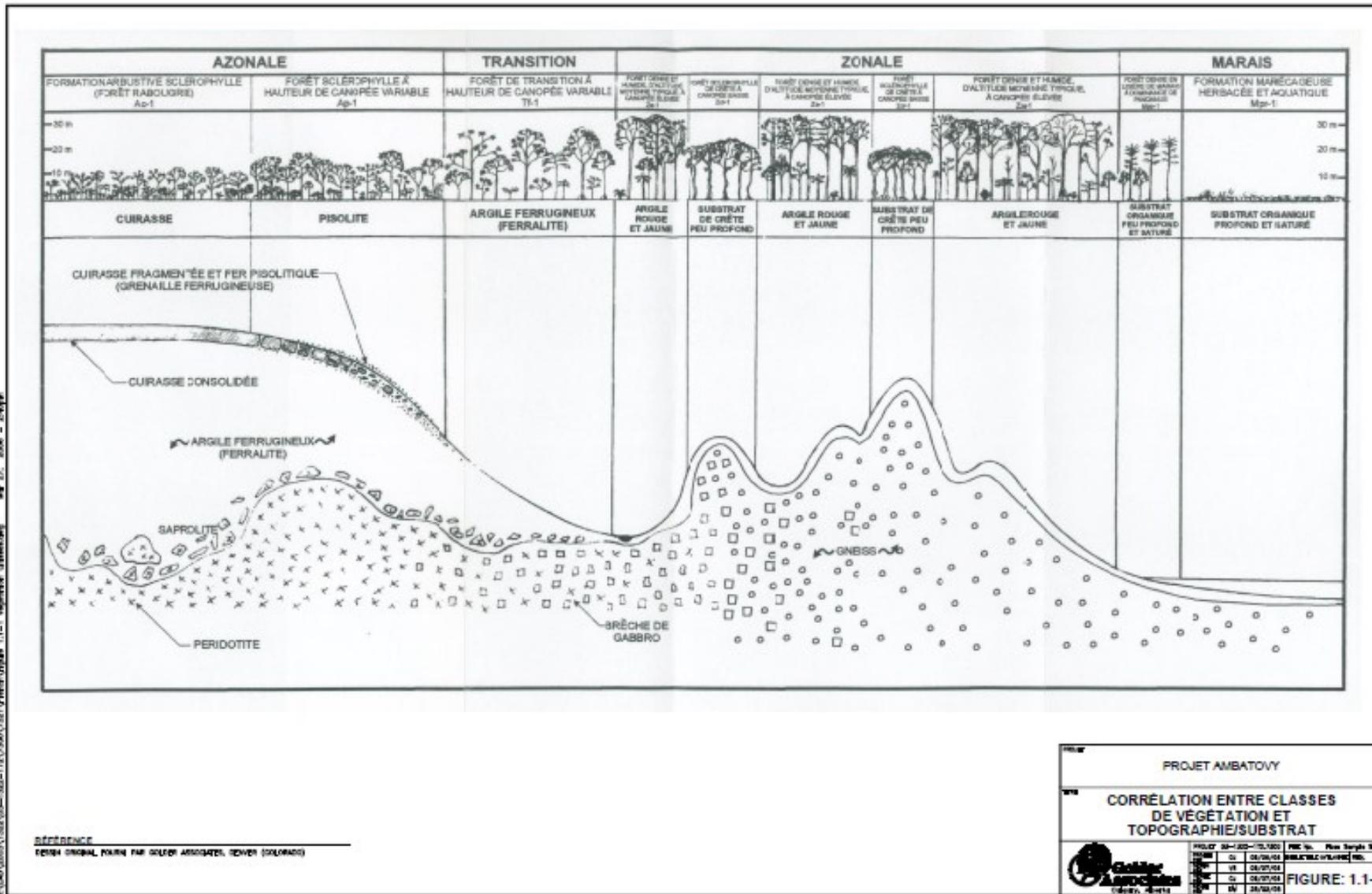
<i>Action</i>	<i>Fonction</i>	<i>Phylum</i>	<i>Classe</i>	<i>Ordre</i>	<i>Famille</i>	<i>Nom Commun</i>
BÉNÉFIQUE	<i>détritiphage</i>	Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Tenebrionidae	ténébrions
				Dictyoptera	Blattidae	blattes
		Crustacea	Isopoda	Porcellonidae	cloportes	
		Annelida	Oligocheta	Haplotaxida	Lumbricidae	vers de terre
BÉNÉFIQUE	<i>prédateur</i>	Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Carabidae	carabes
				Dermaptera	forficulidae	perce-oreilles
		Chilopoda	Geophila	Geophilidae	géophiles	
			Lithobida	Lithobidae	lithobies	
		Arachnida	Araneae	Diverses araneae	araignées	
NUISIBLE	<i>phytophage</i>	Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Divers Coleoptera	larves coléoptères
					Dynastidae	<i>Heteronychus spp</i>
					Melolonthidae	<i>Apicencya spp</i>
		Orthoptera	Grillidae	grillons		
			Diplopoda	Julida	Julidae	tules

12 Chronogramme des activités

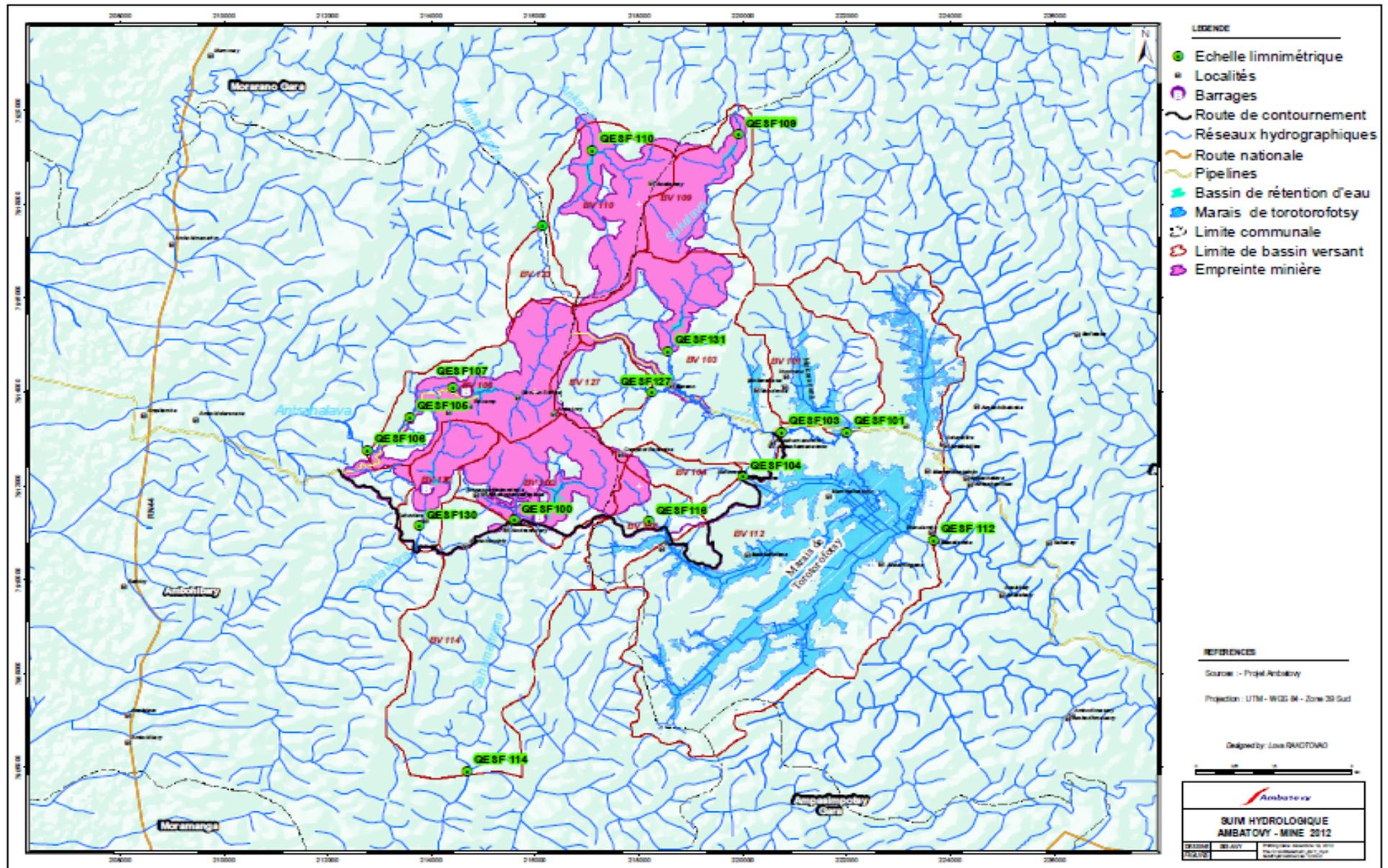
En commençant l'intervention en Décembre 2012 et en la finalisant en Juin 2013, le calendrier d'exécution des travaux de recherche se présente comme suit :

Activités	Mois (2012-2013)						
	D	J	F	M	A	M	J
Investigations bibliographiques	■	■	■	■	■	■	■
Elaboration du plan de recherche et protocole d'accord	■						
Descente sur terrain (collecte des données, prélèvement des échantillons)		■	■				
Analyse en laboratoire			■	■			
Analyse, traitement des données et élaboration du rapport écrit				■	■		
Restitution et présentation des résultats par la soutenance du mémoire						■	
Correction et publication du rapport final							■

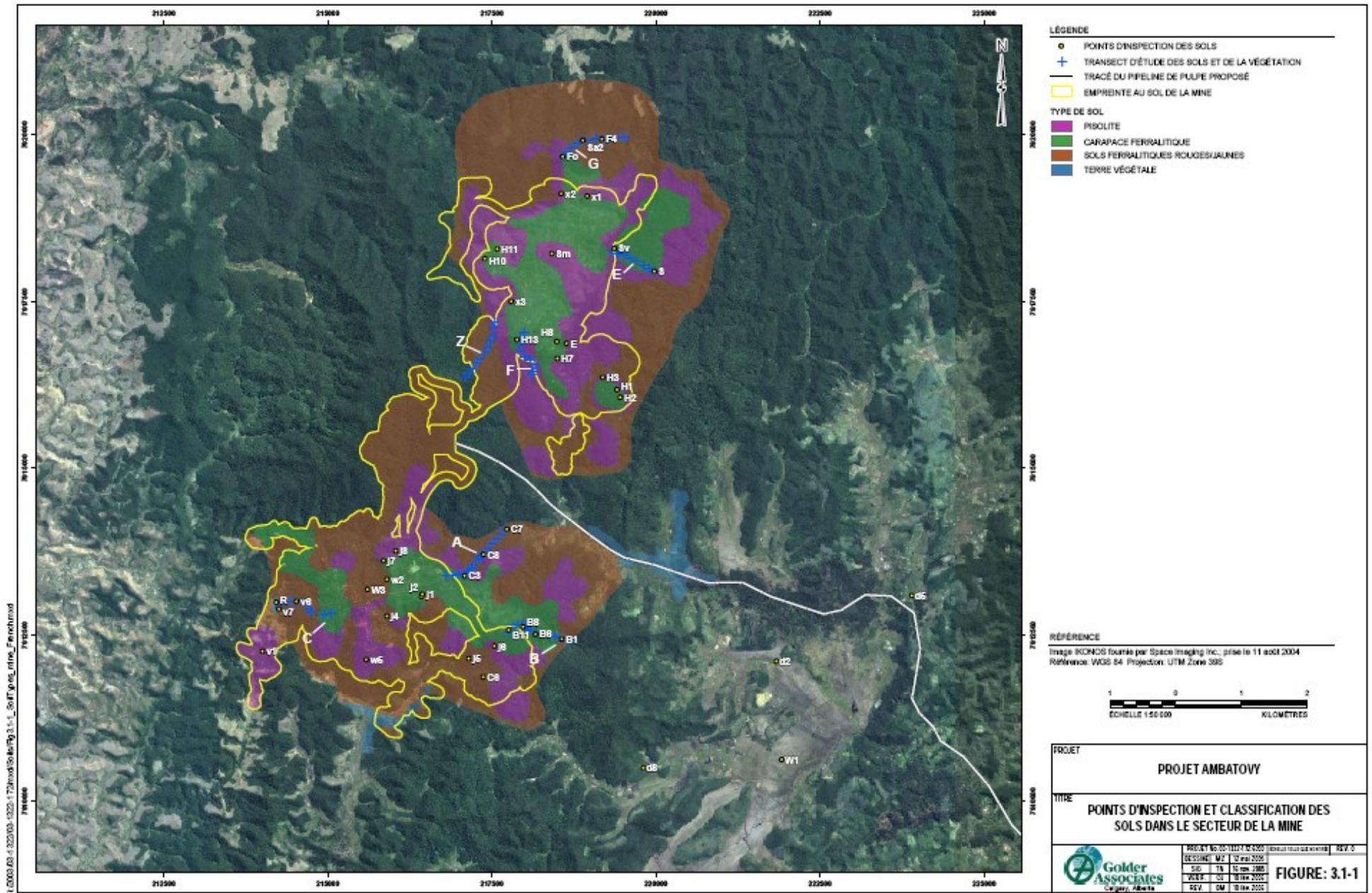
13 Différentes cartes illustratives sur la zone d'étude



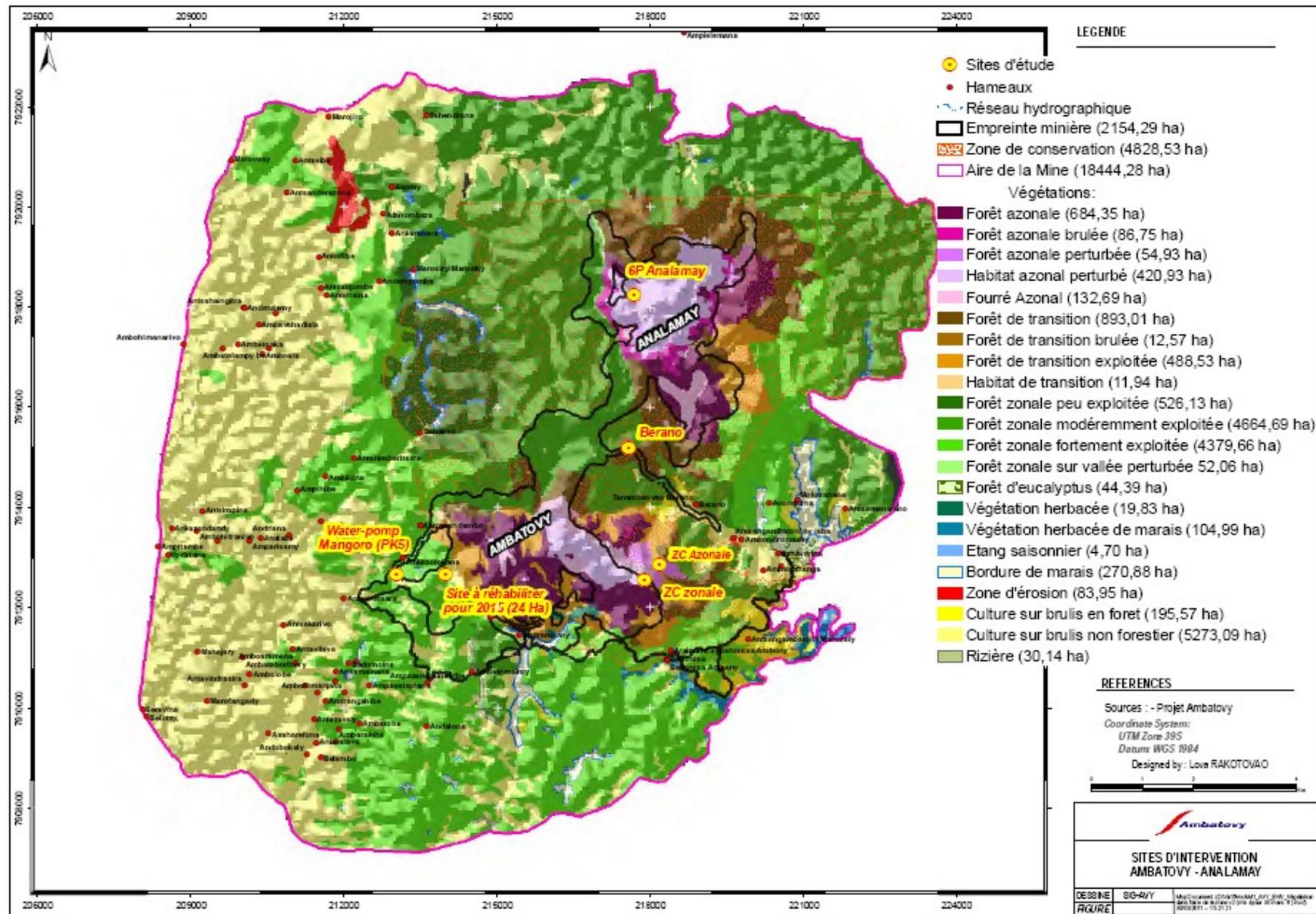
Carte 2: Relation végétation-topographie-sol d'Ambatovy (Source : Projet Ambatovy, 2006)



Carte 3: Carte hydrologique d'Ambatovy
Source : Ambatovy-Environment Department, 2012



Carte 4: Classification des sols dans le site de la mine
 Source : EIE Ambatovy, 2006



Carte 5: Présentation générale de la zone d'étude
 Source : Ambatovy-Environment Department, 2013