



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
MENTION : BASSINS SEDIMENTAIRES EVOLUTION CONSERVATION



PARCOURS : PATRIMOINE SCIENTIFIQUE AMÉNAGEMENT ET EXPERTISE DES
ECOSYSTEMES LITTORAL ET LIMNIQUE (PSAEECO)
SPECIALITE : VALORISATION DES PATRIMOINES GEOLOGIQUES



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER II EN
PATRIMOINE SCIENTIFIQUE AMENAGEMENT ET EXPERTISE DES ECOSYSTEMES LITTORAL ET
LIMNIQUE



Présenté par : ANDRIANJAFIMALALA Tiana Patrick

Soutenu publiquement le, 14 Juin 2019.

Devant les membres de jury composés de :

Président	: Mme RANIVOCHARIMANANA Lovasoa, Professeur
Encadreur pédagogique	: Mme RANDRIANALY Hasina Nirina, Professeur
Encadreur professionnel	: Mr RAKOTONDRAMANO Vonjy, Chef de service au Ministère des Mines
Examineur	: Mr RAKOTOMANANA Faliarimino, Coordinateur National du GEF SGP PNUD Madagascar.





UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
DOMAINE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE



MENTION : BASSIN SEDIMENTAIRE EVOLUTION CONSERVATION



PARCOURS : PATRIMOINE SCIENTIFIQUE AMÉNAGEMENT ET EXPERTISE DES
ECOSYSTEMES LITHORAL ET LIMNIQUE (PSAEECO)
SPECIALITE : VALORISATION DES PATRIMOINES GEOLOGIQUES



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master en patrimoine
scientifique aménagement et expertise des écosystèmes littoral et limnique

EVALUATION DE L'EROSION HYDRIQUE CAS DE LA LOCALITE DE MANERINERINA D'ANDAINGO (REGION ALAOTRA MANGORO)

Présenté par : ANDRIANJAFIMALALA Tiana Patrick



REMERCIEMENT

Je tiens à remercier vivement toutes les personnes ainsi que les entités qui ont contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire de fin d'étude. Depuis le stage de terrain, les collectes de données, en passant par la rédaction jusqu'à la présentation en ce jour, à travers ces écrits, je tiens à leur exprimer mon éternelle reconnaissance :

- Monsieur RAMAHASOA Irish Parker, Doyen de la Faculté des Sciences, Maître de conférence, de m'avoir admis à la Faculté des Sciences.
- Monsieur RASOLOFOTIANA Edmond, Maître de conférences, Responsable de la Mention Bassins Sédimentaires Evolution Conservation (BEC) de m'avoir dirigé à l'organisation de ce mémoire.
- Madame, RANIVO HARIMANANA Lovasoa, Professeur au sein de la Mention Bassins Sédimentaires Evolution Conservation (B.E.C.), qui m'a fait l'honneur de présider la soutenance de ce mémoire.
- Madame RANDRIANALY Hasina Nirina, Professeur au sein de la Mention Bassins Sédimentaires Evolution Conservation (B.E.C.), et aussi Responsable du Parcours PSAEECO et GECOGELL, d'avoir accepté d'être mon encadreur pédagogique. Je la remercie énormément pour sa disponibilité, ses conseils, les discussions et les partages.
- A Monsieur RAKOTOND RAMANO Vonjy, chef de service au Ministère des Mines et aussi mon encadreur professionnel qui a dépensé beaucoup de son temps pour me diriger et avoir partagé ses connaissances.
- A Monsieur RAKOTOMANANA Faliarimino, Coordinateur National du GEF SGP PNUD Madagascar examinateur de ce mémoire et qui m'a beaucoup aidé à réaliser les travaux de terrain.
- Monsieur RAKOTONDRAZAFY Toussaint, Maître de conférences, pour ses précieux conseils à l'organisation de ce mémoire.
- A Madame RAKOTOND RANDRIAMARO Faramalala, la Directrice Exécutive de Malagasy Communication Development and Council.
- Ma famille, mes collègues et les équipes qui m'ont énormément aidé pendant les travaux de terrain.

Merci infiniment à tous.

SOMMAIRE

REMERCIEMENT.....	i
SOMMAIRE.....	ii
LISTE DES FIGURES	iv
LISTE DES TABLEAUX	v
GLOSSAIRE	vi
ACRONYMES	vii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I. GENERALITES	1
I.1. CONTEXTE GENERAL DE LA REGION D’ANDAINGO.....	3
I.1.1. Monographie de la région Alaotra-Mangoro	3
I.1.2. Historique ethnique de la région	3
I.2. GEOMORPHOLOGIE DE LA ZONE D’ETUDE	3
I.2.1. Bassin versant topographique.....	3
I.2.2. Eléments du relief.....	4
I.2.3. Formations superficielles	4
I.2.4. Modelés	5
I.2.5. Réseau hydrographique	5
I.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	6
CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES	8
II.1. MATERIELS.....	8
II.1.1. Matériels de terrain.....	8
II.1.2. Matériel d’étude	8
II.1.3. Outils informatiques.....	11
II.2. METHODES	11
II.2.1. Phase de préparations et de documentation.....	12
II.2.2. Phase de recherche personnelle.....	13
II.2.3. Phases de conception.....	24
CHAPITRE III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	26
III.1. INVENTAIRE ET ANALYSES DES EROSIONS HYDRIQUES AFFECTANT LA ZONE D’ETUDE.....	26
III.2. INVENTAIRE DES LAVAKA DANS LA ZONE D’ANALYSE.....	27
III.3. ETAT D’AVANCEMENT DE L’EROSION	30
III.4. CALCUL DE LA PERTE EN TERRE	39

III.5. ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL	44
CHAPITRE IV. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS	47
IV.1. DISCUSSIONS	47
IV.3. RECOMMANDATIONS	49
CONCLUSION	54
BIBLIOGRAPHIES	55
ANNEXES.....	57

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Bassin versant topographique	4
Figure 2 : Les différentes formations superficielles.....	5
Figure 3 : Vue d'ensemble des composants géomorphologiques.....	6
Figure 4 : Carte lithologique de la commune d'Andaingo.....	7
Figure 5 : Carte de localisation du site d'étude (Manerinerina).....	9
Figure 6 : Eléments constitutifs d'un lavaka.....	10
Figure 7 : Typologie des Lavaka.....	10
Figure 8 : Processus méthodologique adopté.....	12
Figure 9 : Processus d'érosion hydrique.....	14
Figure 10 : Etapes de formations des lavaka.....	16
Figure 11 : Mesure direct sur terrain.....	17
Figure 12 : Transect de la ravine en aval.....	18
Figure 13 : Mesure du facteur pente. e.....	20
Figure 14 : Arbre des problèmes.....	25
Figure 15 : Erosion en nappe sur le bas fond de Manerinerina.....	26
Figure 16 : Différentes formes d'érosion dans la zone.....	27
Figure 17 : Manifestation de l'érosion en masse.....	27
Figure 18 : Lavaka simple contourné.....	28
Figure 19 : Lavaka digité ou en feuille de chêne.....	29
Figure 20 : Illustration de la force de corrosions des eaux de ruissèlement local.....	30
Figure 21 : Image Landsat classifiée de l'année 2011.....	31
Figure 22 : Image Landsat classifiée de l'année 2013.....	32
Figure 23 : Image Landsat classifiée de l'année 2016.....	33
Figure 24 : Courbe ombrothermique de la Région 2011-2013-2016.....	39
Figure 25 : Cycle régissant le phénomène érosion hydrique.....	47
Figure 26 : Vue longitudinale de la disposition des fascines.....	52
Figure 27 : Terrasse de culture.....	52
Figure 28 : Haies antiérosives.....	53
Figure 29 : Arbre des objectifs.....	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les étapes de l'évolution des lavaka.	16
Tableau 2 : Quelques exemples d'indice d'érodabilité du sol.....	20
Tableau 3 : Classification de niveau de tolérance suggéré en perte en terre.....	21
Tableau 4 : Les différents critères d'impact.)	21
Tableau 5 : Classification de l'importance des impacts.....	22
Tableau 6 : Statistique de classes).....	34
Tableau 7 : Exactitude totale de matrices de confusion	35
Tableau 8 : Coefficient Kappa	35
Tableau 9 : Matrice de confusion basée sur le nombre de pixel année 2011	36
Tableau 10 : Matrice de confusion basée sur le nombre de pixel année 2013	37
Tableau 11 : Matrice de confusion basée sur le nombre de pixel année 2016.....	38
Tableau 12 : Indice R pour l'année 2011	41
Tableau 13 : Indice R pour l'année 2013	42
Tableau 14 : Indice R pour l'année 2016	43
Tableau 15 : Résultats de l'application de l'USLE	44
Tableau 16 : Analyse des impacts	45
Tableau 17 : Importance des impacts.	46
Tableau 18 : Liste des espèces les plus fréquemment utilisées dans la lutte antiérosive..	50

GLOSSAIRE

Le bassin versant hydrographique est circonscrit par la ligne de crête délimitant le bassin versant d'un cours d'eau et de ses affluents ou ligne de partage des eaux. Il correspond donc au bassin versant topographique.

L'érosion est un phénomène géologique qui façonne la surface de la terre depuis son origine. Elle agit à différents rythmes et peut, sur plusieurs dizaines de millions d'années, araser des montagnes, creuser des vallées et faire reculer des falaises (Roose, 1998).

La perte tolérable de sol est la quantité maximale annuelle de sol qui pourrait être balayé par des ruissellements.

Les modelés sont les formes façonnées par l'érosion et/ou les zones de dépôts.

Le lavaka est la forme d'érosion du sol (hydrique) le plus accéléré. En d'autres termes, le lavaka est issu d'une manifestation ultime très grave de l'érosion accélérée et brutale de la surface du sol dans le milieu naturel. (J. RIQUIER, 1958).

La télédétection est l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour déterminer les caractéristiques de la surface et de l'atmosphère de la Terre ou d'une autre planète, par des mesures effectuées à partir d'un engin spatial évoluant à distance convenable de cette dernière (selon Commission Interministérielle de Terminologie de la Télédétection Aérospatiale, 1988).

ACRONYMES

A	Estimation de la perte en terre
A ²	Amplitude
BD	Base de Données
C	Indice d'occupation du sol
D	Durée
DRDR	Direction Régionale du Développement Rural
E	Etendue
E I E	Etude d'Impact Environnemental
GPS	Global Position Système
Ha	Hectare
Ip ₃₀	Intensité maximum de Pluie
K	Indice érodabilité des sols
Km	Kilomètre
LS	Facteur topographique (Indice de pente)
M	mètre
MCDC	Malagasy Communication Development and Council
MJ	Mili joule
Mm	millimètre
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
O	Occurrence
ONG	Organisation Non Gouvernementale
P	Pratiques antiérosives
PGRM	Projet de Gouvernance des Ressources Minérales
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
R	Indice agressivité climatique
SGP/GEF	Small Grants Program Madagascar
SIG	Système d'Information Géographique
TDR	Terme de référence
UPDR	Unité de Politique pour le Développement Rural
USLE	Universal Soil Loss Equation ou Equation Universelle de perte en terre

INTRODUCTION

Madagascar, est la grande Île où le riz constitue non seulement l'aliment de base de la population mais occupe aussi une dimension socioculturelle importante. La consommation en riz des Malgaches est élevée. Elle est classée parmi les plus fortes du monde avec une consommation moyenne annuelle estimée de cent treize kilogrammes (113 kg) par tête (<http://www.ricehub.org/MG/>)¹. Andaingo est une commune de la région Alaotra-Mangoro, où la principale activité économique est l'agriculture. Plus précisément, la riziculture est une activité vitale à l'échelle locale et régionale. Pourtant l'érosion hydrique des bassins versants représente un risque important pour l'agriculture. En effet, la pérennité du système de production en place est sérieusement menacée par la dégradation des périmètres irrigués par l'intermédiaire du fléau érosion. Les dangers d'érosion sont très marqués, caractérisés par la baisse de productivité des terres agricoles, par les impacts sur les infrastructures, ainsi que par les perturbations des régimes hydrologiques qui provoquent des pertes en sols.

L'érosion est un phénomène naturel mais depuis quelques années celle-ci est accentuée par de nombreuses actions anthropiques, pour ne citer que les feux de brousse et la déforestation. Cela a entraîné des dégâts considérables sur l'écosystème (ensablement) et sur le mode de vie des malagasy (diminution de la production).

Devant cette problématique, de nombreux projets de recherches à l'échelle mondiale dans différents domaines ont été entrepris. Dans la considération de ces faits et dans une quête de proposer des solutions, grâce au financement de GEF-PNUD de ce travail de mémoire, une question se pose alors : dans quelle mesure l'analyse de l'état d'avancement de l'érosion dans une localité à vocation agricole, permet-elle de réaliser les différentes initiatives de mesures de protection? En d'autres termes, quel intérêt cette étude peut apporter dans le souci d'équilibre entre la dégradation (identification des impacts de l'érosion), la protection (moyen de lutte ou d'atténuation) et la production (développement socio-économique).

Tout cela a incité à choisir le thème pour ce travail qui s'intitule « Evaluation de l'érosion hydrique cas de la localité de Manerinerina d'Andaingo (Région Alaotra-Mangoro). »

L'objectif principal est d'évaluer l'état d'avancement de l'érosion hydrique de la zone d'étude par l'ampleur des Lavaka et l'estimation de la perte en terre. Pour renforcer les mesures de protection et de restauration afin de proposer différentes initiatives de valorisation envisageable ou en cours de réalisation.

Les objectifs spécifiques sont donc les suivants :

- Faire un inventaire et analyse des érosions hydriques affectant la zone d'étude ;
- Etablir une carte d'érosion par utilisation du SIG et de la télédétection ;
- Evaluer la perte en terre ;
- Faire une Etude d'Impact Environnemental (EIE) de l'érosion hydrique.

Ce travail se subdivise en quatre parties : la généralité, les matériels et les méthodes adoptés, les résultats et interprétations des investigations et la discussion suivie des recommandations proposées.

CHAPITRE I. GENERALITES

I.1. CONTEXTE GENERAL DE LA REGION D'ANDAINGO

I.1.1. Monographie de la région Alaotra-Mangoro

I.1.1.1. Présentation de la sous-préfecture de Moramanga

La DRDR (Direction Régionale du Développement Rural) d'Ambatondrazaka est composée de neuf (9) sous-préfectures et 113 Communes. La commune d'Andaingo en fait partie dans la sous-préfecture de Moramanga d'une superficie de 835 km², soit 9% de la superficie totale de Moramanga. Source : Inventaire des Fivondronana de Madagascar, 2001 (Voir annexe I).

I.1.1.2. Population et démographie

Les régions concernées par la DRDR d'Ambatondrazaka recensent 112 550 habitants en 2004 dans une superficie de 45 048 Km², ce qui représente une densité de 24,69Hab/Km², légèrement supérieure à la densité nationale (UPRD, 2005). La population rurale constitue 80% de la population totale de la région (20 personnes en milieu urbain correspondent à 80 personnes en milieu rural).

I.1.2. Historique ethnique de la région

Au temps de la colonisation, le premier peuplement était un groupe ethnique appelé "TANOSIMBOANGY", constitué par les Sakalava, les Betsileo et les Antemoro, qui étaient des immigrants dans la région en ce temps. Ces immigrants étaient installés sur une montagne couverte d'orangers (orange = voangy) et de citronniers, encerclée d'eau infestée de caïmans formant une sorte d'îlot (îlot = nosy) d'où le nom Tanosimboahangy. Au fil des temps, la population s'est multipliée et s'est dispersée sur une montagne beaucoup plus vaste et presque rocheuse nommée "AMBATOHARANANA". Et à force de se multiplier, des extensions se font appréciées jusqu'à la chaîne des montagnes où se trouve actuellement ANDILAMENA. (Source : UPDR, 2005).

I.2. GEOMORPHOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude s'étend sur une surface de 350 Ha, dont le paysage est formé par une étendue de plaine alluviale ceinturée, d'un côté par une série de massifs latéritiques et de l'autre, d'un ensemble de collines ("tanety").

I.2.1. Bassin versant topographique

Pour pouvoir mettre en relation les précipitations/ruissellements et les débits d'un cours d'eau, il est nécessaire de délimiter les surfaces alimentant ce cours d'eau au niveau de la section considérée : le bassin versant (figure 6). Le bassin versant topographique regroupe toutes les

surfaces qui, par ruissellement, sont susceptibles de contribuer à l'écoulement au niveau de la section du cours d'eau considéré.

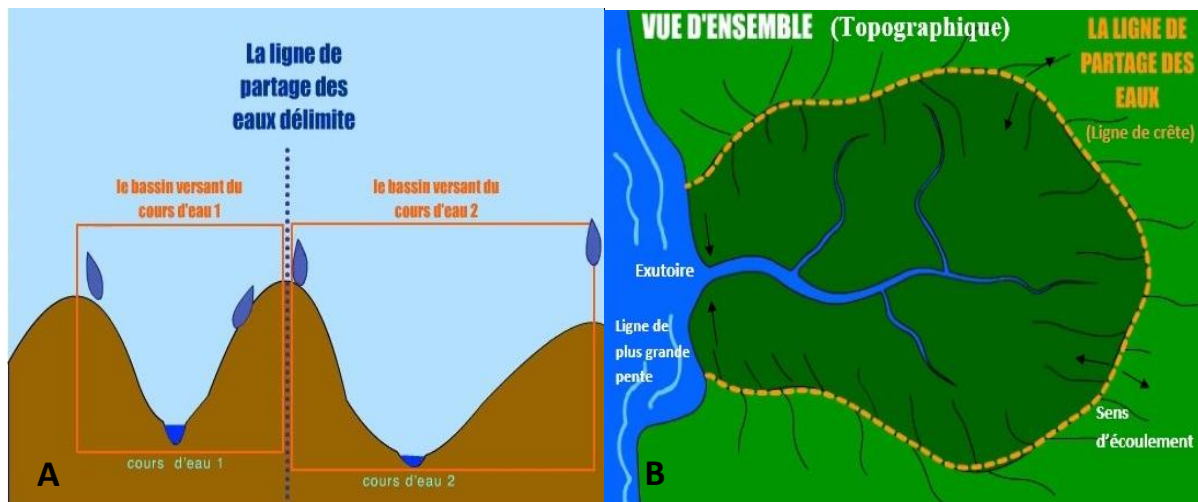


Figure 1 : Bassin versant topographique (A) vue en coupe transversale - (B) vue d'ensemble. Source : <http2://www.youtube.com/2/OBVAJ>

I.2.2. Éléments du relief

Le relief de Manerinerina est formé (Voir figure 4) principalement par des :

- plaines alluviales : utilisées en majeure partie par les exploitants comme terrain de culture rizicole. Avec une altitude moyenne de 930 mètres, elles forment un bas fond d'accumulation sédimentaire.
- massifs latéritiques : situés du côté Est de la zone d'étude, avec une orientation NNW-SSE et une altitude moyenne de 1150 m. Ils forment les rebords des bassins versants.
- collines : situées sur le côté Ouest de la localité avec une orientation NNW-SSE, avec une altitude moyenne de 1000 m.

I.2.3. Formations superficielles

Selon les observations effectuées lors de nombreuses descentes sur terrain en 2017 et en 2018, les formations superficielles sont caractérisées (figure 3) :

- en amont, sur le flanc des bassins versants et dans les ravins creusés par l'érosion, par la mise à nu du substratum constitué en majorité de Quartzites, des Gneiss et des Gabbros (figure 3a et b).
- en aval, au niveau des plaines alluviales, par de vastes dépôts sableux accompagnés de débris rocheux issus des pluies torrentielles qui envahissent les terrains de cultures (figure 3c).



Figure 2 : Les différentes formations superficielles. Quartzite (figures 3 A et B) -dépôts sableux et de débris rocheux (figure 3C).

I.2.4. Modelés

Ils sont, dans la région, pour la plupart de forme creuse sur les flancs des bassins versants, exemples : lavaka ou au niveau de champs de cultures en aval, exemple : ravine.

Les zones ensablées se rencontrent dans les bas-fonds (plaines alluviales, rizières...) et représentent une autre forme de modelé remarquable dans la zone d'investigation. L'analyse de ces formes occupe un intérêt capital dans ce travail. (Voir figure 4)

I.2.5. Réseau hydrographique

A l'échelle locale, les différents points d'eaux présents dans la zone de recherche (Manerinerina) sont les suivants : (voir figure 4)

- Point d'eau N°1 : cours d'eau se trouvant au Nord-Ouest, un affluent de la rivière Mangoro. Celui-ci est menacé d'ensablement, avec un faible débit, et ne peut plus subvenir aux besoins des terrains de cultures (P1).
- des petits ruisseaux qui puisent sa source au niveau des exécutoires des bassins versants, dénommés par la communauté par « RANO FASIKA », représentent le Point d'eau N°2 (P2).
- Le « DOBO » le Point d'eau N°3 est un petit étang, un des rares dans le genre à avoir survécu au phénomène d'ensablement et d'envasement. Il est utilisé par le propriétaire comme bassin de pisciculture (P3).

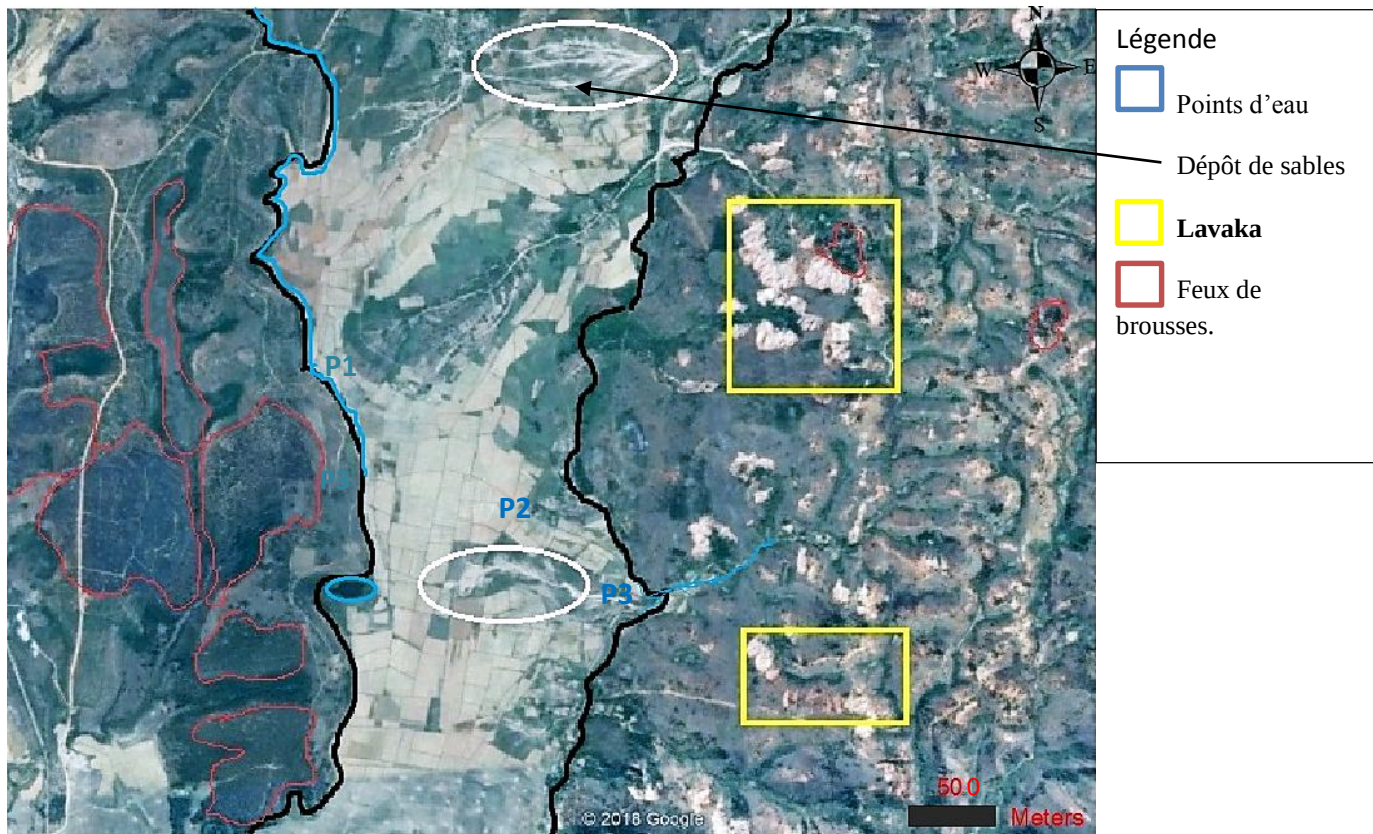


Figure 3 : Vue d'ensemble des composants géomorphologiques. Source : Google earth.

I.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La région du Mangoro fait partie du socle précambrien malgache. La zone d'étude appartient au domaine d'Antananarivo, qui correspond aux hauts plateaux du centre de Madagascar. C'est un domaine composé d'une vaste étendue d'orthogneiss et de paragneiss d'âge Néoarchéen en faciès schiste vert à granulitique (PGRM et Al, 2012).

Comme le montre la carte géologique ci-dessous (figure 5 et la carte en annexe VI), du point de vue pétrographique, la zone d'étude est formée par des :

- formations récentes formées de
 - dépôts alluviaux,
 - dépôts lacustres,
 - et de sables jeunes,
- roches consolidées (anciennes) qui correspondent aux
 - système du Vohibory (groupe de Beforona amphibolo-pyroxénique)
 - et système du Graphite (migmatite du Mangoro, gneiss à biotite, gneiss à pyroxène, sillimanite,...).

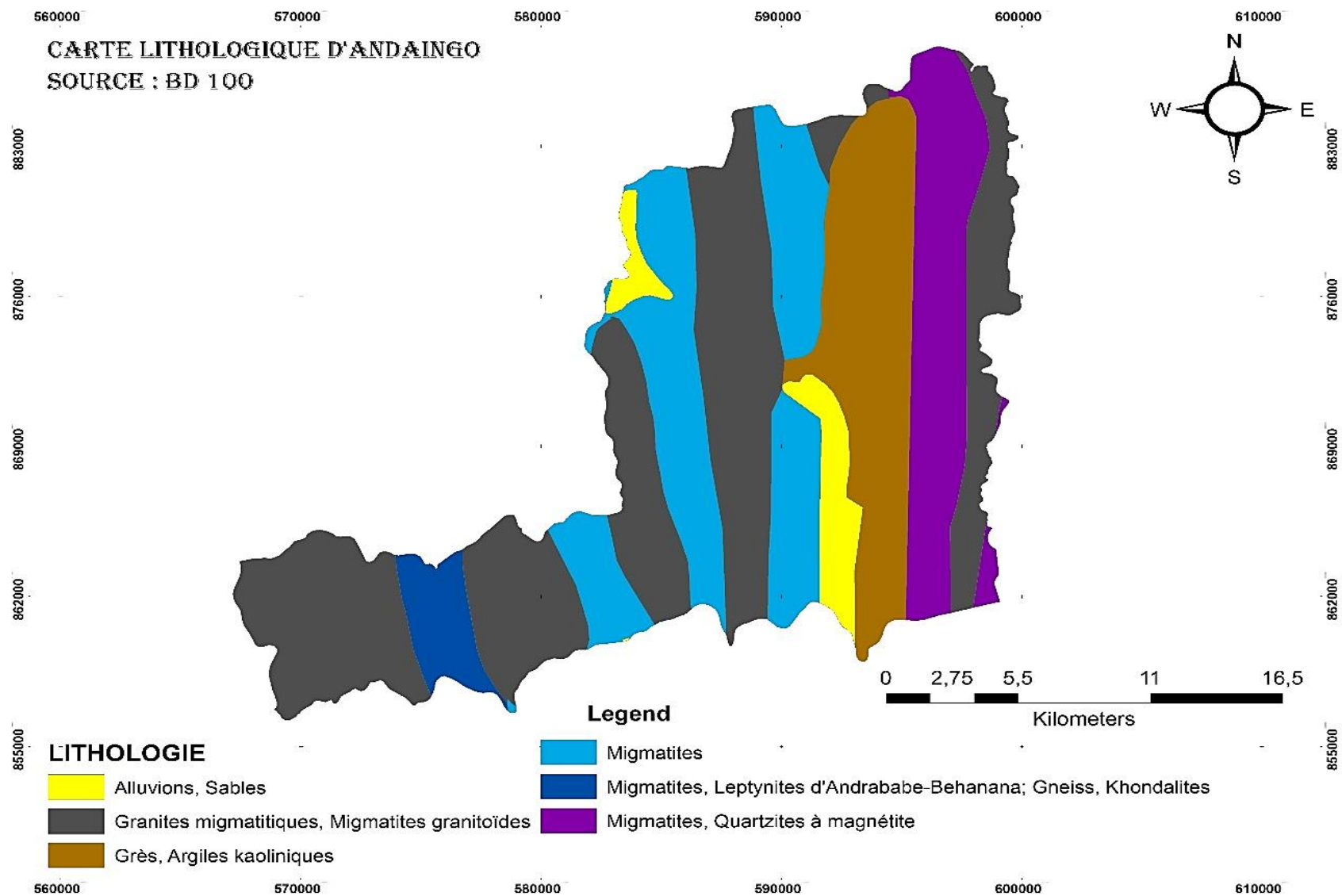


Figure 4 : Carte lithologique de la commune d'Andaingo. Source : BD 100

CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES

II.1. MATERIELS

Dans le cadre de la réalisation de chaque étape de ce travail, des outils ont été indispensables depuis la phase de consultation bibliographique jusqu'à la phase de rédaction proprement dit du mémoire. Cette partie se subdivise donc comme suit :

- matériels de terrain ;
- centre d'intérêt ;
- matériels d'études ;
- outils informatiques.

II.1.1. Matériels de terrain

Les matériels de terrain nécessitent en premier lieu une Bêche ou ANGADY servant à l'observation de la partie fraîche des éléments constitutifs du sol. Le GPS sert à localiser et orienter la zone d'étude et enfin l'appareil photo est utile à la capture des images.

II.1.2. Matériel d'étude

II.1.2.1. Zone d'étude

La zone d'étude choisie est localisée dans la commune d'Andaingo. C'est une parcelle de terrain ayant un taux d'érosion élevé dans un village nommé Manerinerina. Ce dernier est situé au centre de la région d'Alaotra-Mangoro et localisé dans la partie nord-est de Madagascar, mais non littorale. La région d'Alaotra-Mangoro se situe entre les limites géographiques (figure 1) :

- latitude : 16°22 et 20°47 sud ; - longitude : 47°63 et 48°99 Est.

Cette dernière s'étend sur une superficie de 33 054 km² et comporte cinq (5) districts à savoir, Ambatondrazaka, Amparafaravola et Andilamena qui entourent le lac Alaotra et les deux autres, Moramanga et Anosibe An'ala qui sont traversés par la rivière Mangoro.

Manerinerina, la vitrine d'étude, se trouve dans le fokontany Ambodirano, à sept kilomètres (7km) de la commune d'Andaingo (figures 1 et 2), district de Moramanga. Les coordonnées géographiques respectives sont les suivantes :

- 18°10'44, 8''S;
- 048°16'11, 5'' E;
- Altitude: 971m.

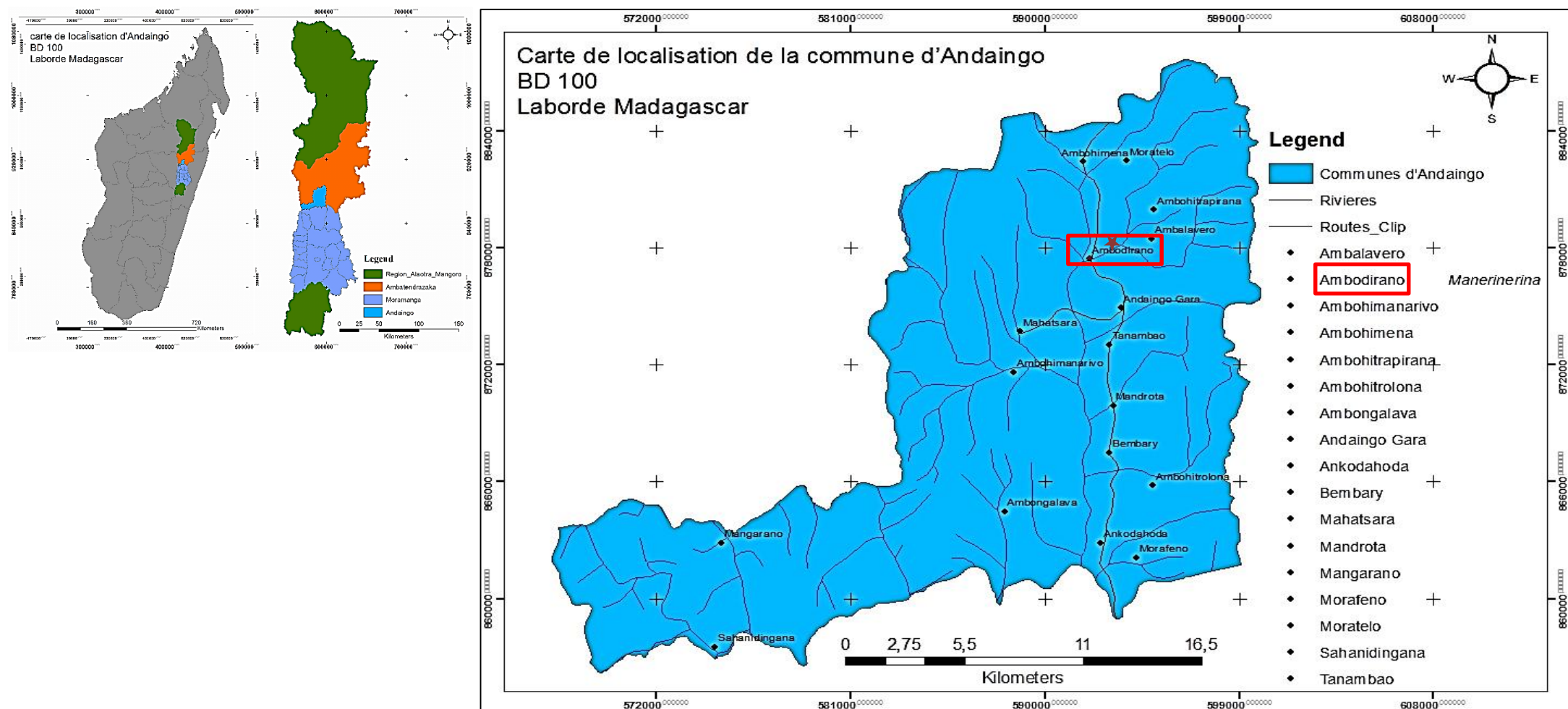


Figure 5 : Carte de localisation du site d'étude (Manerinerina) dans la commune d'Andaingo. Source : BD 100

II.1.2.2. Lavaka

Les lavaka sont caractérisés par leurs éléments constitutifs et leurs typologies.

❖ Eléments constitutifs

Un lavaka est formé par trois parties distinctes (figure 8) : la tête, l'exutoire et le cône de déjection.

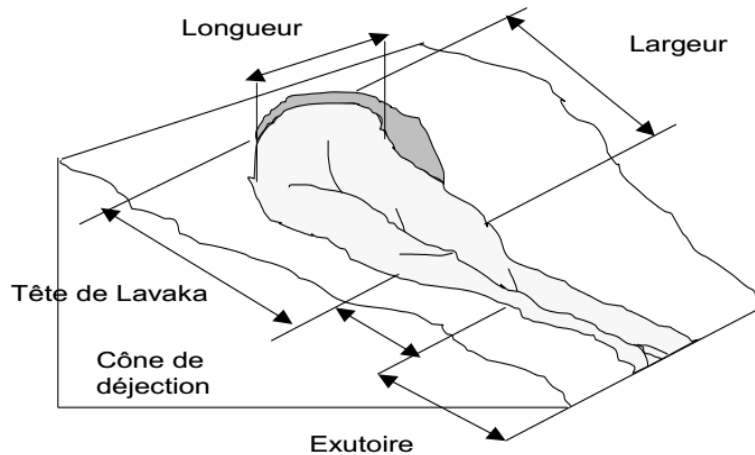


Figure 6 : Eléments constitutifs d'un lavaka. Source : (RIQUIER, 1954).

❖ Typologie des lavaka

Ils peuvent être classés suivant leur emplacement sur la pente ou selon leurs formes. Voici donc quelques types avec leurs caractéristiques respectives (figure 9):

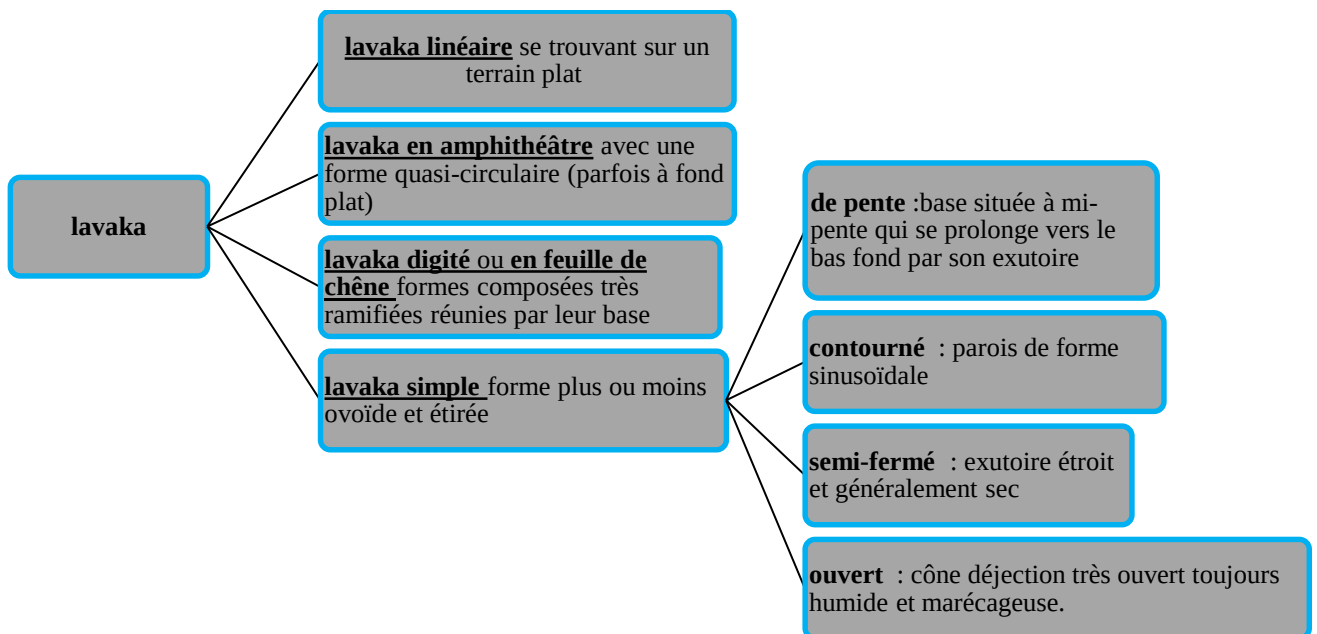


Figure 7 : Typologie des Lavaka. Source : inspirée de RIQUIER, 1954.

II.1.2.3. Image Landsat

C'est un programme à base d'images de couverture du sol. Les images sont produites de façons continues depuis 1972. La NASA a repris ensuite le programme et le satellite a été renommé Landsat 8. Les images téléchargées viennent sous forme de plusieurs bandes, accompagnées d'un document annexe composé de toutes les caractéristiques des bandes qui s'y trouvent.

II.1.3. Outils informatiques

Les différents outils informatiques utilisés pour la réalisation de ce travail sont :

- arcgis 10.1 : est un matériel informatique (logiciel) utilisé dans le domaine du Système d'Information Géographique (SIG). Le SIG permet d'exploiter toutes informations disposant d'une localisation spatiale ou d'une adresse. Il offre les avantages suivants:
 - gérer une infinité de thème sur une même carte qui facilite l'exploitation des données ;
 - faciliter la prise de décision sur un thème donné ;
 - réduire les coûts de production des cartes ;
 - multiplier les représentations visuelles facilitant ainsi une bonne interprétation tout en diminuant les risques d'erreurs.
- envi (Environment for Visualizing Images) version 4.5 : outil utilisé dans le domaine de la télédétection (détection à distance ou « Remote Sensing » en anglais). Il permet de contraster les images, de les corriger géométriquement, de les classifiés.
- adobe illustrator CC 2017 et MS Paint pour réaliser les illustrations indispensable pour ce travail.

II.2. METHODES

Les méthodes adoptées sont constituées de trois phases bien distinctes qui se résument par la figure ci-dessous (figure 10) :

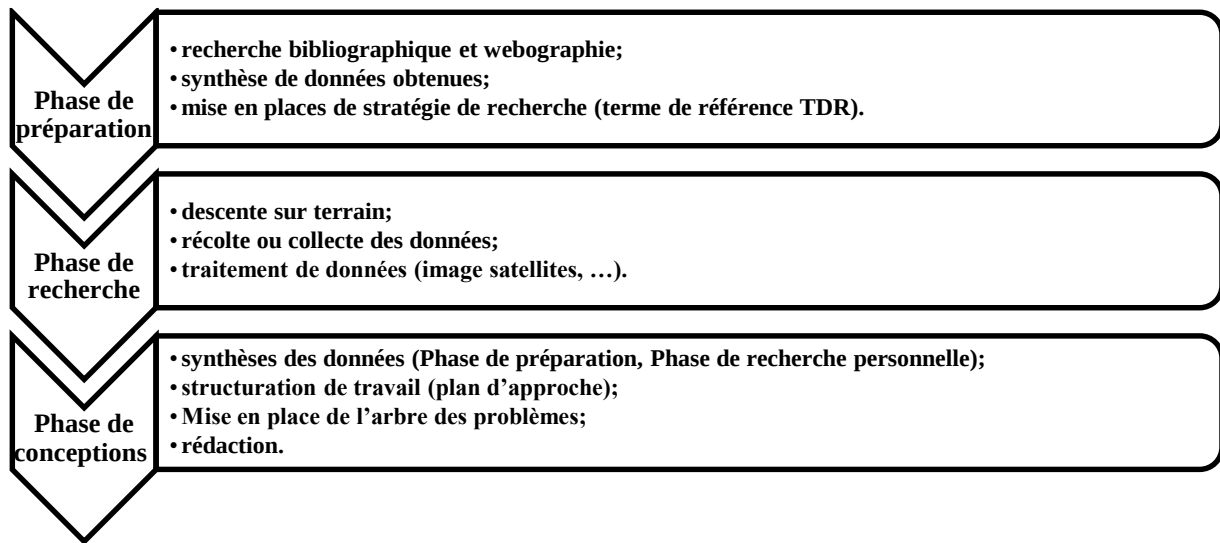


Figure 8 : Processus méthodologique adopté.

II.2.1. Phase de préparations et de documentation

II.2.1.1. Recherche bibliographique et webographie

Les étapes de la recherche consistent à :

- approfondir le thème de la recherche relatif à la documentation sur
 - le phénomène d'érosion hydrique : facteurs, formes, catégorisation, évolution et les lavaka ;
 - les méthodes de calcul de perte en terre ;
 - l'Etude d'Impact Environnemental ;
 - le Mode de traitement d'image satellite.
- Sélectionner les sources d'informations

Ce travail correspond à l'évaluation de la qualité et la pertinence des sources (consultation de documents d'études antérieures) : Ouvrage, revue, cours, rapports issus des projets effectués par le GEF. (Voir annexe II) ainsi que des documents sur site web (exemples : mémoires d'étude liées à la région ([http : www. Thèse malagasy en ligne.com](http://www.Thèse.malagasy.en.ligne.com))).

II.2.1.2. Synthèse des informations obtenues de ces sources

Dans cette partie il est question de faire un recoupement de toutes les données issues des recherches bibliographiques et de faire à la suite une synthèse. Il s'agit d'identifier les données pertinentes qui peuvent servir pour les prochaines phases du travail.

II.2.1.3. Mise en place de stratégie de recherche

C'est la dernière étape de la phase de préparation : rédaction et cadrage du terme de référence (TDR). C'est un court document (annexe) qui a été rédigé et supervisé par l'encadreur

(Responsable du parcours) afin de déterminer les objectifs de l'évaluateur (GEF PNUD). La rédaction de ce document est une des premières étapes de la mise en œuvre du stage de terrain et la rédaction du mémoire.

II.2.2. Phase de recherche personnelle

II.2.2.1. Descente sur terrain

Cette partie du travail consiste à faire des :

- visites de courtoisie des autorités locales;
- enquêtes auprès de la population locale : orientation et renseignement sur les mœurs et les tabous local ;
- descentes sur terrain proprement dit :
 - délimitation de la zone d'étude (vue de loin) : localisation des zones d'intérêts capitaux.
 - classification de la zone (vue de près) : observation directe de la problématique principale (lavaka, zone ensablée,...).

II.2.2.2. Récolte ou collecte des données (méthodes scientifiques)

L'analyse consiste à faire un recoupement entre les données issues de la recherche bibliographique et la vérité terrain sur le thème (érosion hydrique).

❖ Méthode d'étude du phénomène érosion hydrique

○ Caractéristiques et processus d'une érosion hydrique

Le phénomène d'érosion hydrique est un processus complexe se résumant généralement par les phases suivantes (figure 7) :

- détachement (phénomène de splash): les eaux de pluies agissent sur le sol par leur force de frappe (gravité) et font rejaillir des particules solides et de l'eau dans toutes les directions.
- ruissellement : lorsque l'intensité de pluie est supérieure à la capacité d'infiltration du sol, l'eau n'est plus totalement absorbée, elle commence à ruisseler.
- transport et dépôt : les particules issues de la dissociation, grossières ou fines, sont ultérieurement déplacées vers l'aval sous l'action de la gravité. La capacité de transport du ruissellement dépend de sa vitesse, de l'épaisseur, de l'agressivité des pluies, de la pente et de la taille des particules disponibles.

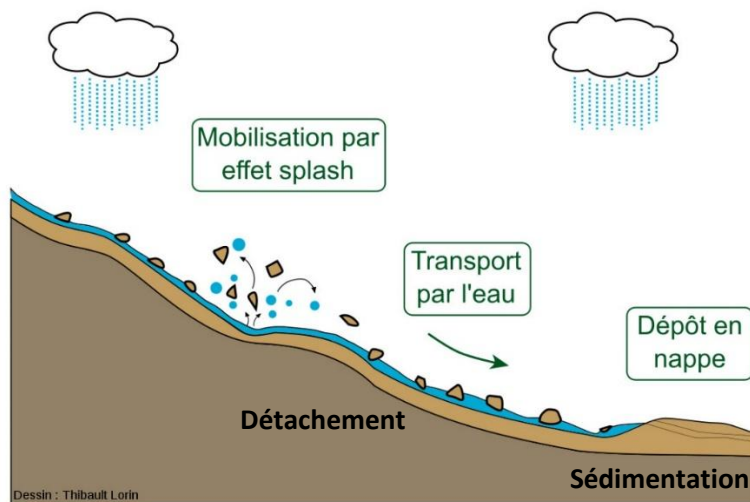


Figure 9 : Processus d'érosion hydrique. Source : <http://planet-terre.ens lyon.fr/planetterre/objets/Images/erosion-sols/erosion-sols-10.jpg>

○ Facteurs d'érosion hydrique

Les formes d'érosion varient très largement d'une région à l'autre suivant la diversité du relief et les variations des facteurs ci-dessous :

• Facteur pente

La pente est l'un des facteurs essentiels à l'apparition du phénomène de l'érosion dans les zones tropicales :

- Inclinaison de la pente (variation de la force de ruissellement) ;
- Longueur de la pente (variation de la vitesse de ruissellement) ;
- Forme de la pente : concave, convexe et homogène (variation dans la capacité de transports des solides).

• Facteur hydrogéologique

La genèse des lavaka est attribuée à l'existence d'une nappe phréatique circulante à la base des versants des hautes terres malgaches. (RIQUIER, 1947 ; ROBEQUAIN, 1953 et TRICART, 1963),

- soit en profondeur, l'apparition de cette nappe à la base des bassins versants provoque une humectation permanente de la zone qui conduit à un affaissement et un glissement de terrain qui par la suite évolue au fur et à mesure du temps en lavaka.

- Soit en surface, initié par les rigoles causées par le ruissellement concentré sur les versants qui peuvent évoluer en lavaka lorsque leur profondeur atteint la nappe phréatique.

• La précipitation atmosphérique

Les paramètres liés à l'érosion sont :

- la hauteur des précipitations peut être liée à l'importance de l'érosion, c'est à dire plus la hauteur des précipitations augmente, plus l'érosion est importante.

- l'intensité plus grande de précipitations qui cause l'effet prolongé de battage du sol.

- Couverture végétale

La couverture végétale des hautes terres est dominée par une formation herbeuse appelée « pseudo-steppe » ou « bozaka » (TRICART, 1979). C'est une savane herbeuse, à une faible rétention d'eau. Par conséquent, elle rend le paysage monotone, facilement érodable par l'eau.

- Activités humaines

Les activités humaines peuvent être à l'origine du déclenchement et de l'accélération de l'érosion par les actions suivantes : défrichements de la forêt, les techniques culturales.

- Nature du sol

La sensibilité d'un sol à l'arrachement et au transport des particules qui le composent est fonction de l'érodabilité de ce sol. Cette érodabilité est caractérisée par plusieurs paramètres tels que : la capacité d'infiltration, la stabilité structurale, la texture, la teneur en matière organique.

- Catégorisation et évolution des formes d'érosion hydrique

Les rigoles causées par le ruissellement concentré sur les versants peuvent évoluer en ravines qui au fur et à mesure que le facteur temps s'ajoute et deviennent des lavaka lorsque leur profondeur atteint la nappe phréatique.

- ❖ Méthode d'analyse des lavaka

L'étude d'un Lavaka doit considérer les étapes de sa formation ainsi que son évolution.

- Etapes de formations

Evoluant au niveau des versants, la formation des lavaka peut se résumer par les deux schémas ci-dessous (figure 11) :

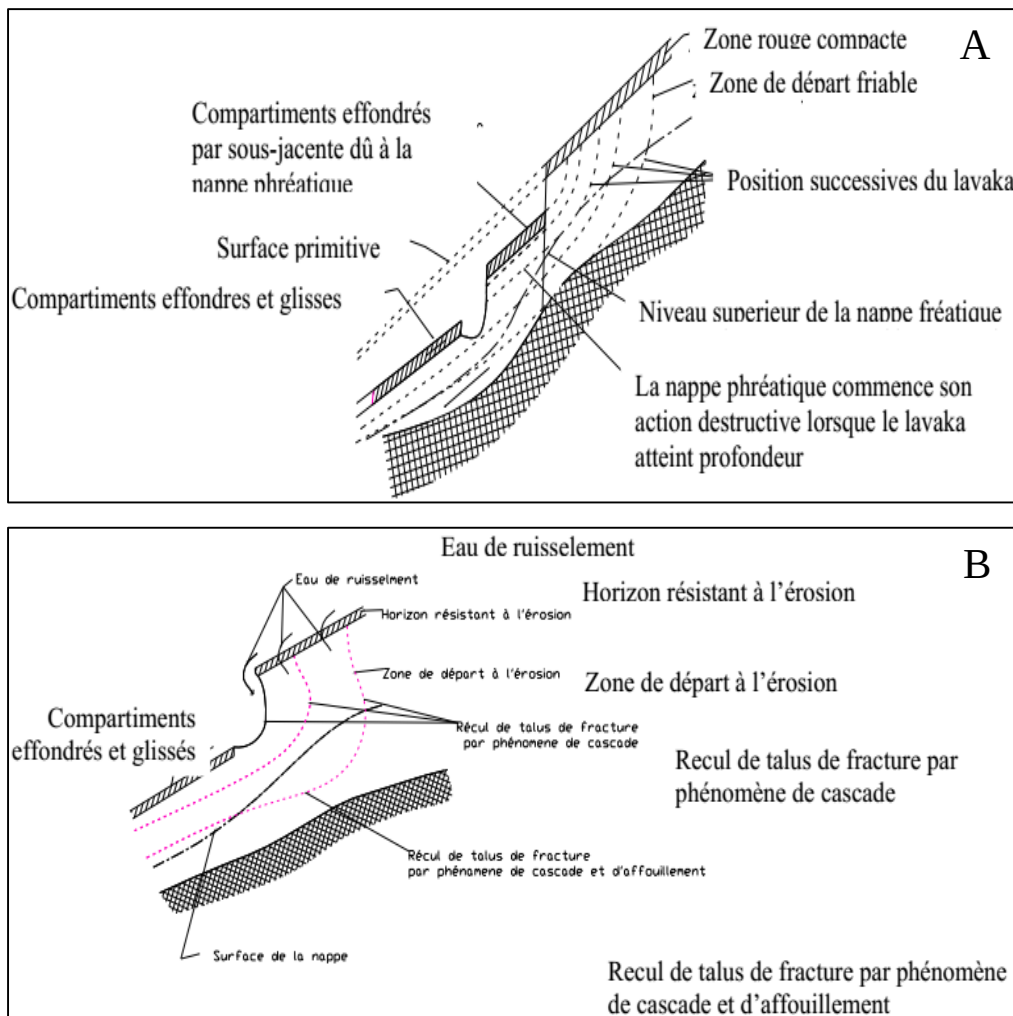


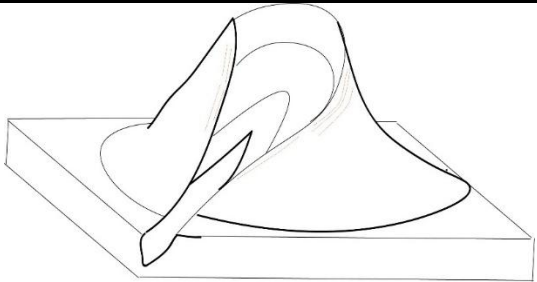
Figure 10 : Etapes de formations des lavaka. Source : (J.RIQUIER, 1954).

○ Evolution des lavaka

Tableau 1 : Les étapes de l'évolution des lavaka.

Le tableau 1 montre cette évolution qui est constituée par trois stades distincts.

Stade de formation des lavaka	Caractéristiques	Illustrations
stade Juvénile	Sol dénudé, -profondeur moins de 2 mètres, -forme plus ou moins arrondie.	

stade de maturité	Trace évolutive sur les bords.	
stade de stabilité	L'intérieur est recolonisé par la végétation.	

Cette évolution agit à différents rythmes et peut avec le facteur temps araser des montagnes, creuser des vallées et faire reculer des falaises.

❖ Méthodes de calcul de l'estimation de perte en terre

○ Méthode N°1 par calcul direct

Cette méthode sera utilisée dans le cadre de l'estimation du volume de perte en terre causée par l'érosion linéaire en Aval (plaine alluviale). Le volume de sol érodé (m^3) dépend de la dimension de chaque trace d'érosion et du nombre de trace (s) d'érosion.

Donc : $VOLUME (m^3) = LONGUEUR \text{ de la rigole ou ravine (m)} \times PROFONDEUR \text{ moyenne de la rigole ou ravine (m)} \times LARGEUR \text{ moyenne de la rigole ou ravine (m)}$

Et ces valeurs ont été obtenues d'après :

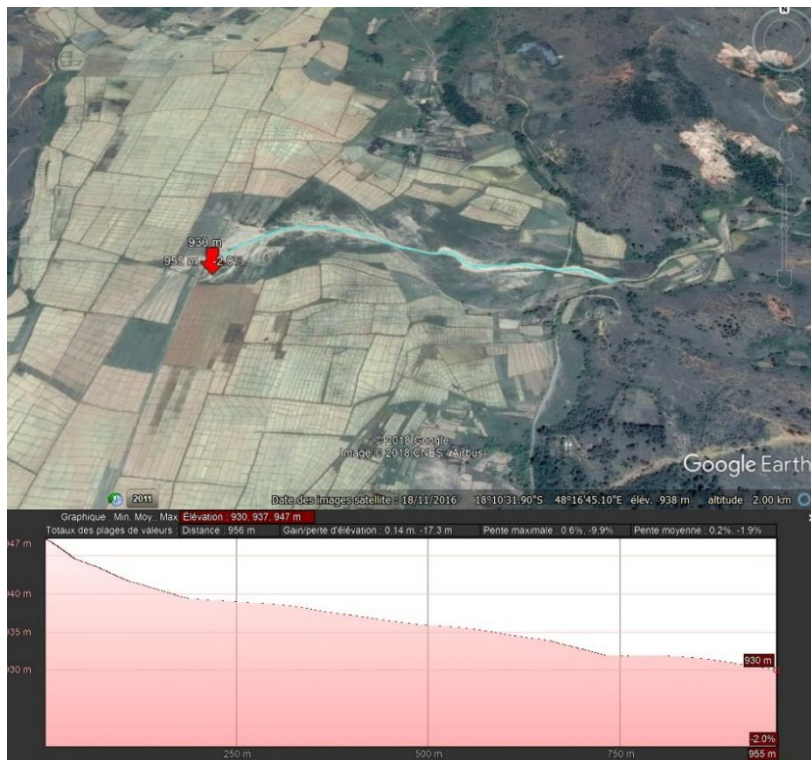
- la mesure directe sur terrain ;



Cette méthode est pratiquée sur les formes d'érosion de petite amplitude mesurables avec de simple moyen (exemple : règle).

Figure 11 : Mesure direct sur terrain

- la mesure sur image de Google earth :



Le logiciel informatique Google earth offre la possibilité de tracer des transects à un lieu donné et offre ensuite les mesures nécessaires lors du calcul direct en perte en terre.

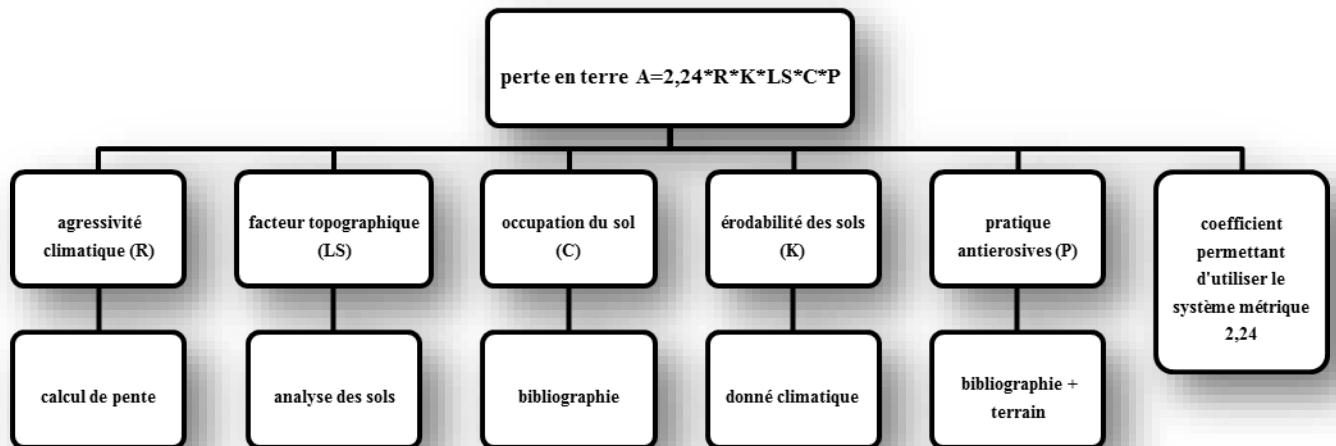
Figure 12 : Transect de la ravine en aval. Source : Google Earth

- Méthode N°2 (estimation de la perte en terre selon l'équation d'USLE ou modèle universelle de WISCHMEIER)

Ce modèle de WISCHMEIER permet la prévision de l'érosion en fonction des caractéristiques : climatique, pédologique, topographique et des techniques culturales utilisées. Cette estimation est obtenue par l'équation :

$$A \text{ (T/ha/an)} = 2,24 \cdot R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Avec :



- L'indice d'agressivité climatique (R en usa)

La principale cause de l'érosion dans la région est l'énergie cinétique des pluies qui dépend de leur intensité et de leur hauteur. WISCHMEIER a mesuré les pertes en terre sur des parcelles expérimentales par l'indice d'agressivité climatique définie comme la somme des produits de l'énergie cinétique des pluies unitaires par leur intensité maximale durant 30 mn et le tout divisé par 100.

$$R = \sum E \times I_{p30} / 100$$

Où :

- E (l'énergie cinétique des pluies en t.m/ha/cm) = $E_u \times h$

Avec :

- h : hauteur des pluies en cm
- E_u (Energie unitaire en t.m/ha) = $201 + 89 \log I_p$
- Et I_p (l'intensité de pluie en cm/h) = h / N_{Heures}
- I_{p30} (intensité maximum de pluie en cm/heures) = $I_p / 2$

- Les indices de pente (LS)

Le facteur topographique LS étudié par WISCHMEIER est défini par :

$$LS = L / 100 (0,76 + 0,53S + 0,076S^2)$$

Où :

- L : Longueur de la pente (m)
- S : Pente en %

Les valeurs ont été obtenues selon les graphes suivant:

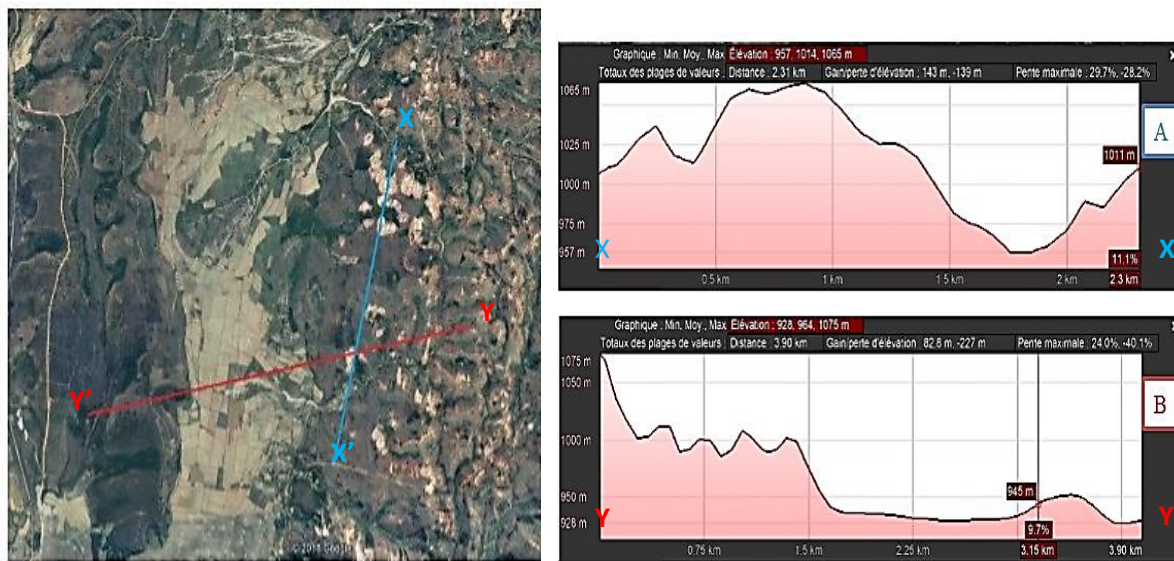


Figure 13 : Mesure du facteur pente. Source : Google earth -tranchet A en bleu -tranchet B en rouge

Les indices de pente (LS) sont obtenus, comme pour la figure 13, avec l'aide du logiciel informatique Google earth qui offre la possibilité de tracer des transects à un lieu donné et sur les fenêtres vues de la coupe (figure 14 à doit) sont affichées les données pentes (longueurs et pourcentages).

- L'indice de culture (C)

Elle varie selon la couverture végétale qui se résume par le tableau en annexe 3.

- Indice de traitement anti- érosif (P)

Le facteur P prend en compte les pratiques de conservation du sol. Dans le cas de Madagascar, en l'absence de données de mesure d'efficacité de traitement antiérosif (selon Payet et al, 2012). Une valeur de « 1 » peut être attribuée arbitrairement au facteur P.

- L'indice d'érodabilité du sol (K)

Tableau 2 : Quelques exemples d'indice d'érodabilité du sol. (ROOSE, 1975)

Cet indice d'érodabilité dépend étroitement du type de sol et de sa texture selon le tableau 2

Type de sols présents	Texture	Facteur K (t.h/MJ.mm)
Lithosols	limon	0,795
Sols ferrugineux tropicaux	Sablo-limoneux	0,157
Sols faiblement ferralitiques	Argilo- limoneux	0,695
Vertisols	Argile	0,689
Sols d'apport à minéraux brut	Sable	0,106
Alluvions	Argile	0,489

Remarque : il existe une méthode de classification applicable pour la méthode N°2 sur la tolérance en perte en terre.

Tableau 3 : Classification de niveau de tolérance suggéré en perte en terre (Stone R. Al, 2000)

Il est à noter que 1 acre correspond à 0,4046 ha

Classe d'érosion de sol	Perte potentielle de Sol (tonnes/acre.an)
Très faible (Tolérable)	< 3
Faible	3-5
Modérée	5-10
Elevée	10-15
Grave	> 15

Selon l'étude effectuée par le Diagnostic Et Recherche Appliquées pour le Développement en milieu rural (DERAD), cette tolérance est supposée homogène à travers la région tout entière. Les taux de perte en sol sont illustrés dans le tableau 3, et le niveau tolérable doit être inférieur ou égal à 3 tonnes/acre.an.

❖ Etude d'Impact Environnemental

Dans cette partie il est question de faire une évaluation quantitative des impacts par l'intermédiaire de la « méthode matricielle » adoptée par l'ONE, pour atteindre les trois objectifs spécifiques qui sont les suivants :

- Maintien de l'intégrité ENVIRONNEMENTALE
- Amélioration de l'efficacité ÉCONOMIQUE
- Amélioration de l'équité SOCIALE
 - Les critères d'impact

Tableau 4 : Les différents critères d'impact. (Source : ONE)

La méthode prend en compte 4 critères : durée (D), étendue (E), amplitude (A), probabilité d'occurrence (O) dont les valeurs sont montées par ce tableau.

Degré	Durée (D)	Etendue (E)	Amplitude (A)	Probabilité d'occurrence (O)
1	Courte durée	Etendue	Faible amplitude	Faible
2	Durée moyenne	Etendue locale	Amplitude moyenne	Moyenne

3	Longue durée	Etendue régionale	Forte amplitude	Forte
---	--------------	-------------------	-----------------	-------

Mais pour atteindre les trois objectifs, une catégorisation des différents impacts recensés sur terrain est nécessaire.

- Catégorisation de l'importance des impacts

Tableau 5 : Classification de l'importance des impacts. (Source : ONE)

Compte tenu, du tableau 3 ci-dessus, il est possible de catégoriser les impacts environnementaux.

Somme des degrés d'impact	Catégorie d'impact
4 à 6	Mineure
7 à 9	Moyenne
10 à 12	Majeure

II.2.2.3. Traitement des données

C'est un travail qui consiste à visualiser, traiter, analyser, et présenter des images satellites de la zone d'étude par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié. Les étapes à suivre pour cette partie de l'analyse se dirigent comme suit :



- Le prétraitement

- Visualisation globale de la zone de recherche : avec Google Earth, une exploration de la réalité du milieu a été faite suivie d'une acquisition des images ;

- Calage des cartes sur le logiciel SIG

Cette partie permet de rester sur le même repère de travail. Le calage est primordial pour tous traitements de données afin de minimiser les erreurs sur les résultats obtenus ;

- Extraction de la zone de recherche

La technique de détection la plus courante appliquée aux lignes de référence visibles telles que Les lignes instantanées de rivage, les limites d'humectation et les limites de végétation ont été repérées par les variations de tons en niveaux de gris ou des variations de couleur (selon Moise Tsayem Demaze, 2011) ;

- Les corrections comportent deux types radiométrique et géométrique ;

- Amélioration d'image

L'amélioration comprend principalement le rehaussement des contrastes, le filtrage, la création de compositions colorées et la création des néocanaux : pour la discrimination des informations comme les indices: de végétation, de brillance ...

- Traitement des images proprement dit

La classification supervisée a été choisie comme méthode de classification d'occupation du sol. Elle est basée sur des aires d'apprentissages et comporte les étapes suivantes :

- la sélection des aires d'apprentissages pour chaque classe selon la nomenclature adoptée et la classification des pixels ou objets de l'image qui ont été choisis dans la première étape, en utilisant des algorithmes spécifiques ;

- Corrections : réajustement des résultats suivant les observations des images réel issue de Google earth ;

- Seuillage : a permis de répartir le NDVI en plusieurs classes selon les signatures spectrales. (LACOMBE, 2008).

- Post classification

Une vérification de la véracité des carte obtenue doit être entreprise par l'intermédiaire des

- Résultats des cartes

Les cartes d'érosion ou cartes de lavakisation sont les résultats de base obtenus. Elles proviennent des images Landsat qui ont subi des corrections, des classifications...etc. Ici un travail de comparaison entre ces cartes et la vérité terrain (image Google earth) est à faire.

- Mise en page sur Arc GIS

La mise en page des cartes obtenues par télédétection a été faite sur des logiciels de système d'information géographique. Sur ce, les fichiers de transfert entre ces deux plateformes (télédétection et SIG) ont été au format tif.

- Les valeurs numériques

- Statistique des classes

C'est l'outil de calcul statistique utilisé pour apparier des valeurs numériques de chaque classe. Elle permet donc de faire sortir les surfaces et ainsi que les pourcentages de chaque classe après classification.

- Les matrices de confusion

Elle permet de confirmer la qualité de la classification. Des outils d'évaluation de la classification, de précisions, des calculs des erreurs figurent dans les tableaux (matrices de confusion).

- La valeur de l'exactitude totale (Overall Accuracy en anglais)

Elle caractérise la précision totale ou globale qui est le rapport entre le nombre de pixels bien classés sur le nombre total de pixels. En d'autres termes, c'est la moyenne de pixels correctement classé (DENIS,A 2016). Ce coefficient varie entre 0 et 1, et plus les valeurs proches de 1 évoquent les meilleures classifications.

$$\text{Exactitude totale} = \frac{\text{nbr pixel bien classes}}{\text{nbr pixels total}}$$

- La valeur du coefficient Kappa

Elle présente une valeur comprise entre 0 et 1. Cette méthode fait une estimation de qualité qui tient compte des erreurs en ligne et en colonne. Et comme avec l'exactitude totale, plus la valeur de Kappa est proche de 1 plus la qualité de la classification est meilleure.

C'est une autre manière d'évaluer la précision de la classification par l'intermédiaire de calcul avec la formule :

$$\frac{N \sum_1^n MC(ii) - \sum_1^n m_i X_i}{N^2 - \sum_1^n m_i m_j}$$

Avec N : nombre total de pixel ; $MC(ii)$: somme des diagonaux de la matrice de confusion ; m_i : pixels dans une classe ; X_i : pixels classifiés dans cette classe ; n : nombre total de classe.

II.2.3. Phases de conception.

- synthèse des données et regroupement de toutes les données recueillies de la phase de préparation jusqu'à la fin de la phase de recherche personnelle.
- structuration de travail et établissement du plan d'approche (IMRED) pour la rédaction du mémoire de fin d'étude.
- Mise en place de l'arbre des problèmes :

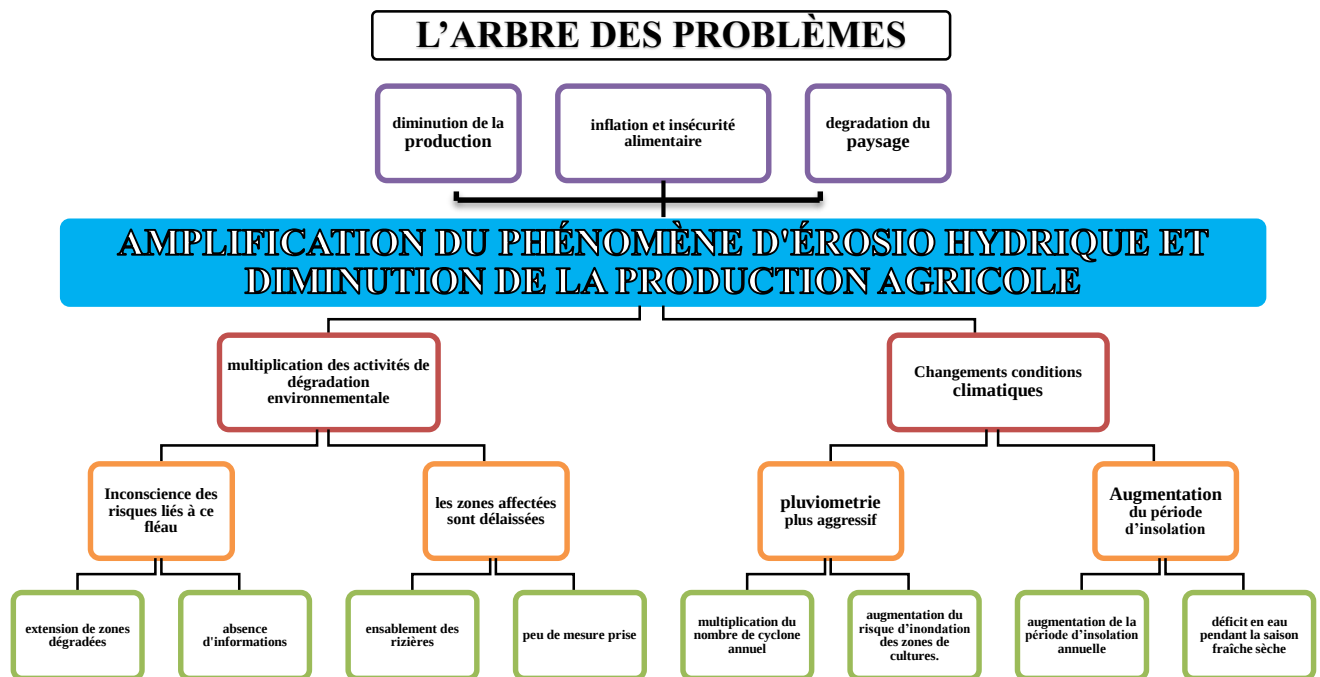


Figure 14 : Arbre des problèmes liés à l'augmentation du phénomène d'érosion hydrique

La lecture digitale du graphique ci-dessus (figure 15) se fait par l'illustration ci-dessous. Cette est une étape indispensable pour maîtriser les aspects des problèmes liés aux problèmes d'érosion dans la zone



- C'est seulement après toutes les étapes énumérées que la phase de rédaction proprement dit du mémoire de fin d'étude peut être entreprise.

CHAPITRE III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Dans cette troisième partie les résultats des études et des différentes analyses seront exposées puis interprétés.

III.1. INVENTAIRE ET ANALYSES DES EROSIONS HYDRIQUES AFFECTANT LA ZONE D'ETUDE

Les diverses formes d'érosion observées dans la zone d'études sont les suivantes : érosion en nappe, érosion en rigole, érosion en ravin, lavaka et érosion en masse.

Suite aux descentes sur le terrain et observation d'images satellite, l'estimation quantitative et les réalités concernant l'érosion hydrique dans le périmètre de Manerinerina ont pu être identifiées. Selon les constatations, l'érosion en nappe est la plus rependue avec à peu près 45%, tandis que l'érosion en rigole et l'érosion par ravinement est estimé à 20%, 30% pour l'érosion en lavaka et 5% pour l'érosion en masse.

Elles peuvent être plus ou moins accentuées selon la pente des différents terrains et l'absence de couvertures végétale.

- Erosion en nappe "sheet erosion" ou érosion diffuse



Figure 15 : Erosion en nappe sur le bas fond de Manerinerina.

Cette forme d'érosion est causée directement par la précipitation. C'est le ruissellement des eaux de pluies coulant en nappe sur un terrain en pente douce qui en est la cause. Cette action arrache progressivement les particules du sol. Ainsi, la surface du sol s'érode au fur et à mesure du temps. Le phénomène se reconnaît par les touffes d'herbes qui se mettent en nappe.

- Erosions linéaires
 - Erosion en rigole « Rill érosion »

C'est sur les terrains plus ou moins escarpés que se produit ce type d'érosion. Les rigoles, avec un tracé sinueux, se forment au gré des irrégularités sur la surface des terrains sous la pression des eaux de ruissellement. Les écoulements taillent des petits filets de plusieurs centimètres de profondeur dans le sol. (Voir figure 17)

- Erosion par ravinement « Gully érosion »

Avec un tracé peu sinueux au départ, elle résulte de l'accentuation de l'érosion en nappe ou en rigole. Plus précisément, quand les écoulements sont abondants, ils se concentrent sur certains points. C'est ce qui provoque le ravinement. Une ravine se forme en général au niveau de l'aval d'une pente. Le sol est grignoté de façon régressive et remonte petit à petit jusqu'au sommet du versant.

Comme il a été dit précédemment, les ravines peuvent avec le facteur temps, devenir des lavaka, la dernière forme d'érosion, lorsque leur profondeur atteint la nappe phréatique.



Figure 16 : Différentes formes d'érosion dans la zone. Source : archive Madagascar.

- Erosion en masse

Il se manifeste par des coulées boueuses accompagnées de laves torrentielles. Ce phénomène est à l'origine de la formation des alluvions de couleur rougeâtre « BEDANA ». En effet des particules provenant de la couverture latéritique en amont sont évacuées par l'eau de ruissèlements sous forme d'ions en solutions et précipitent dans les zones de dépôts pour former de couches fines de couleur marron (voir figures 18). Ce phénomène est un fléau indésirable pour la culture (rizicole surtout) car il peut rendre le terrain de culture stérile.



Figure 17 : Manifestation de l'érosion en masse.

III.2. INVENTAIRE DES LAVAKA DANS LA ZONE D'ANALYSE

Selon les observations sur terrain et des images satellites, il peut être dit que les lavaka recensés dans la zone d'analyse appartiennent à deux groupes bien distincts :

- Les lavaka simples contournés. (Figure 19)
- Les lavaka digités ou en feuille de chêne. (Figure 20).



Figure 18 : Lavaka simple contourné. A-Google Earth; B-image reel

Groupe caractérisé par des parois de forme sinusoïdale. Il est à noter aussi que ce groupe, avec l'intervention du facteur temps, évolue naturellement en lavaka de types digité ou en feuille de chêne.

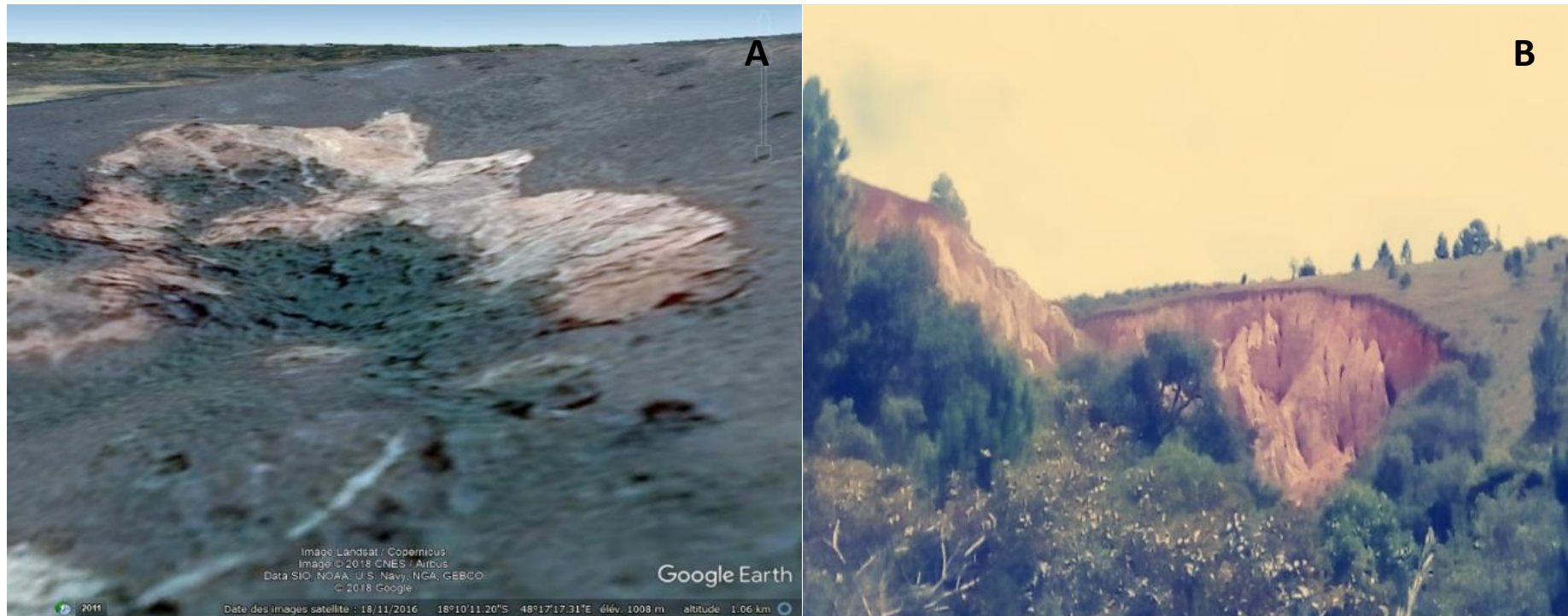


Figure 19 : Lavaka digité ou en feuille de chêne. A-Google Earth; B-image réel

Ils présentent de formes composées très ramifiées réunies par leur base comme une feuille de trèfle.

III.3. ETAT D'AVANCEMENT DE L'EROSION

En premier lieu, en aval, il est constaté lors des descentes sur terrain, une formation d'une ravine qui forme un lit de rivière temporaire à travers les plaines de cultures. Sa longueur est d'une centaine de mètres ayant plus de sept mètres de larges à certains endroits et plus de deux mètres de hauteur (figure 21). Cette formation est l'œuvre de l'eau de ruissèlement venant des bassins versants, fortement chargée en débris rocheuses formant par la suite un torrent boueux accentué par une pente forte et un sol plus ou moins nu. La combinaison de ces facteurs donne une eau de ruissèlement à très forte pouvoir de corrosions.



Figure 20 : Illustration de la force de corrosions des eaux de ruissèlement local.

La figure 21, qui montre une racine de « Kininina ou Eucalyptus » mise à nu, offre une idée de la force de corrosion de l'érosion en aval (ravin) au niveau des rizières.

III.3.1. Carte d'érosion par utilisation de la télédétection

La méthode utilisée est la classification supervisée ou assistée. Le principe de la classification assistée est de fournir au logiciel qui effectue la classification, à partir de l'image satellite Landsat 8 (à gauche figures 22a, 23a et 24a), les échantillons de pixels représentant une région de référence homogène.

Basée sur la classification supervisée, à partir de ces images satellites Landsat 8, les traitements des photographies aériennes des années 2011 (figure 22a), 2013 (figure 23a) et 2016 (figure 24a) permettent de repérer les zones sensibles qui peuvent servir de base pour approfondir l'évolution des menaces. Ils sont pour cela appelés carte d'érosion ou carte de lavakisation (à droite figures 22b, 23b et 24b).

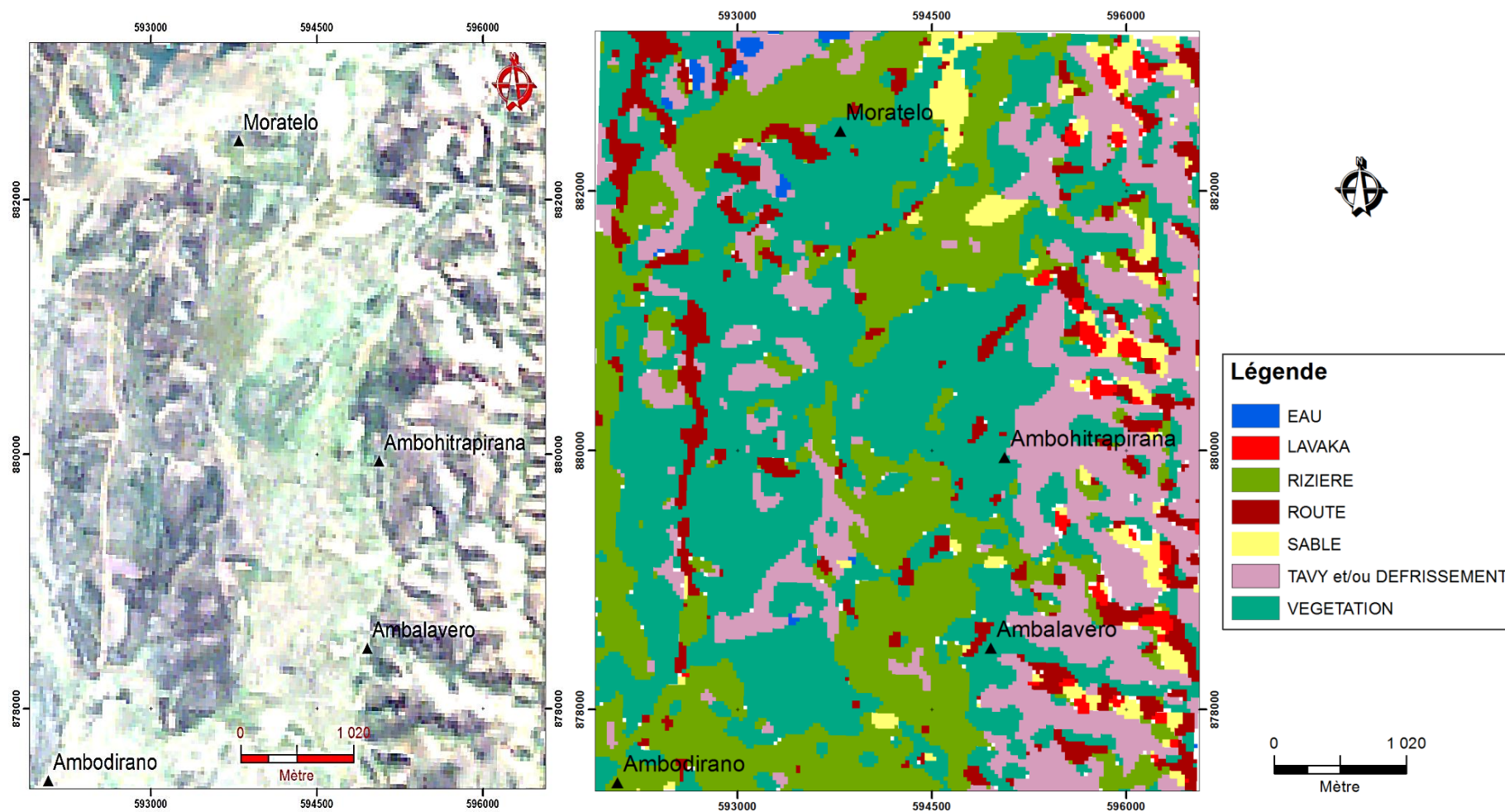


Figure 21 : Image Landsat classifiée de l'année 2011.

Source : Landsat 8

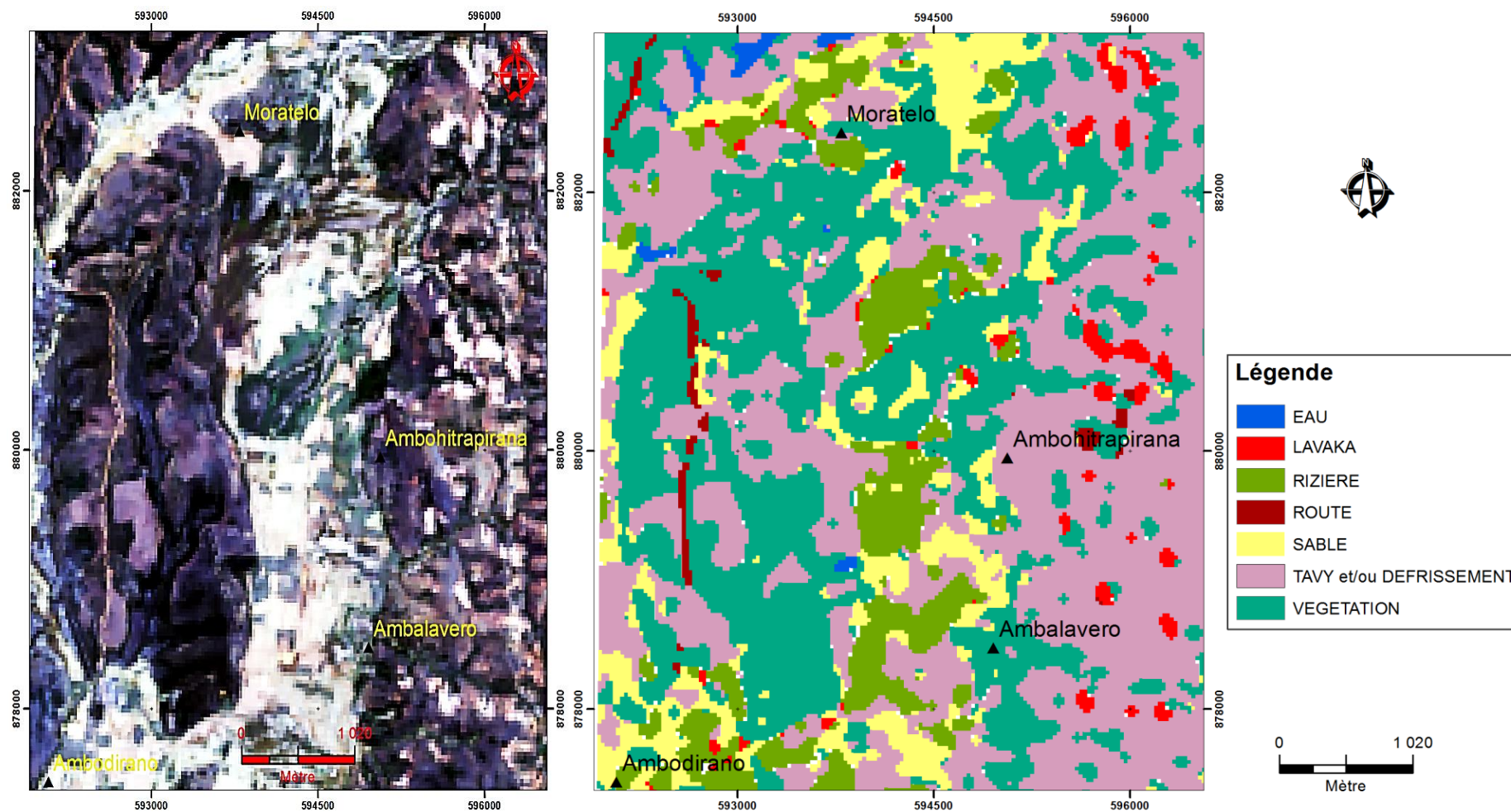


Figure 22 : Image Landsat classifiée de l'année 2013.

Source : Landsat 8

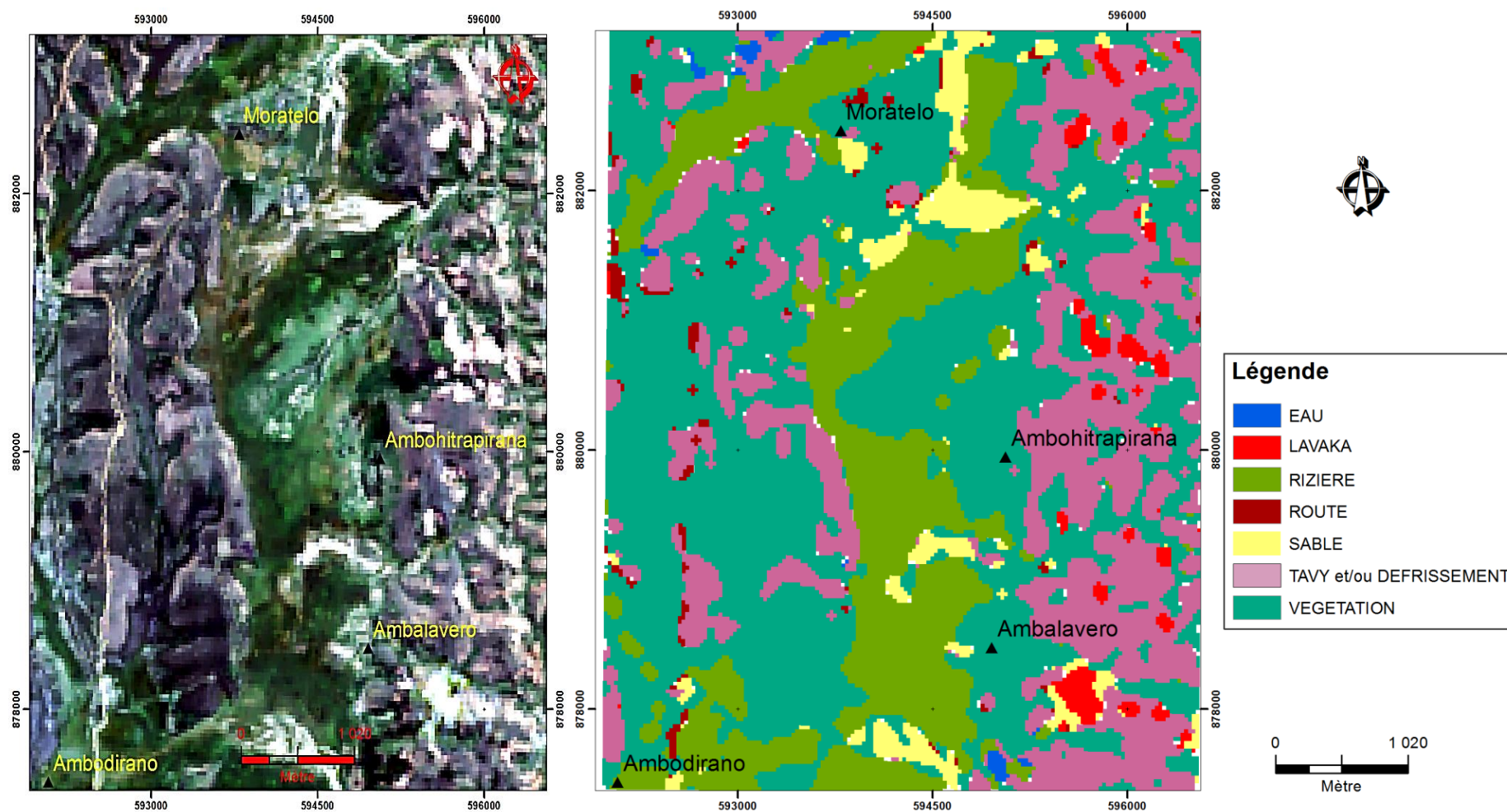


Figure 23 : Image Landsat classifiée de l'année 2016.

Source : Landsat 8

Il est constaté que l'image de 2016 représente une nette augmentation de la classe végétation (en vert) comparée aux autres images (2011 et 2013), qui est inversement proportionnelle la classe tavy/défrichement (en mauve) qui diminue au fur et à mesure des années. Par ailleurs l'étalement des Lavaka (rouge) suit la même évolution car elles ont remarquablement diminuées en 2016 (voir annexe VI pour analyse digital des cartes d'érosion).

Les résultats numériques ci-dessous servent à démontrer la véracité des faits constatés à travers ces cartes d'érosion.

III.3.2. Résultats numériques

L'opération consiste à faire une estimation de la pertinence de la classification aux travers de différentes valeurs numériques issues des images de la classification. Ces analyses permettent donc de valider l'exactitude des protocoles.

- Statistique des classes

Le tableau 7 ci-dessous est obtenu par combinaison des pourcentages et superficies des classes des années étudiées.

Tableau 6 : Statistique de classes (2011-2013-2016) (les pourcentages en hausses sont colorés en gris)

Ces données sont obtenues par analyses statistiques post-classifications. Avec 1ha=10 000m²

	2011		2013		2016	
Classes	Pourcentage (%)	Superficies (ha)	Pourcentage (%)	Superficies (ha)	Pourcentage (%)	Superficies (ha)
EAU	0,41	11,97	0,66	18,88	0,49	13,78
LAVAKA	1,15	33,39	1,85	52,73	1,74	48,65
VEGETATION	38,84	111,8	34,23	975,13	47,83	1339,21
SABLE	3,2	92,16	10,1	287,79	3,89	109,03
RIZIERE	25,1	722,88	8,77	249,78	19,22	538,17
ROUTE	7,38	212,76	0,85	24,32	1,02	28,58
TAVY/DEFRICHEMENT	20,56	592,2	40,67	1158,48	22,88	640,56
AUTRES	3,33	55,87	3,52	58,09	2,94	41,76

Ce tableau confirme les résultats observés sur les images auparavant. En effet, en 2016 le pourcentage en végétation est de 47,83% par rapport aux autres images qui en 2013 et en 2011 sont de 34,23% et de 38,84%, cette classe présente donc une augmentation flagrante. Pour la

classe tavy/défrichement, les données de traitement de l'image de 2016 (22,88%) qui montrent une nette diminution par rapport à celle de 2013 (40,67%). Cette amélioration résulte des actions de sensibilisation de la population locale menée par les ONG dans la région.

- La valeur de l'exactitude totale (Overall Accuracy en anglais)

Tableau 7 : Exactitude totale de matrices de confusion

Les valeurs indiquées dans ce tableau sont indispensables dans le souci de vérification de l'exactitude des cartes obtenues.

	2011	2013	2016
$\frac{\text{nbr pixel bien classes}}{\text{nbr pixels total}}$	9707 /12001	5935 /6640	6520 /7294
Exactitude totale	0,81	0,89	0,89

Ce tableau 6 montre que la classification de l'année 2011 présente une légère diminution en termes de qualité de classification par rapport aux deux autres. Cette diminution s'explique par la qualité de l'image source de cette année qui est de moins bonne qualité par rapport aux deux autres années.

- La valeur du coefficient Kappa

Tableau 8 : Coefficient Kappa

Suivants la méthode de calcul énumérée précédemment, dans le cadre de cette recherche, les coefficients kappa trouvés par les calculs statistiques de la matrice de confusion sont dans ce tableau.

Images	Coefficient Kappa
2011	0,705
2013	0,8347
2016	0,8526

Comme il a été dit dans la partie méthodologie, plus le résultat obtenu pour le coefficient Kappa est proche de 1, plus ils sont fiables. Le tableau 7 montre donc que la classification a réussi et que les cartes obtenues sont fiables.

- Matrices de confusions

La qualité de la classification est estimée par les données montrées par cette matrice de confusion, qui indiquent, pour chaque classe, les confusions apparues lors du processus de classification. Elle permet donc de mesurer la précision d'un résultat de classification en comparant un résultat de classification avec la « vérité terrain ».

Cette vérité terrain peut se présenter sous la forme de « région d'intérêt – vérité terrain » ou d'une « image-vérité terrain » (Midekor & Wellens (GEeau), 2013 et DENIS, 2016).

Tableau 9 : Matrice de confusion basée sur le nombre de pixel année 2011

	Couleurs								
Classes		EAU	LAVAKA	VEGETATION	SABLE	RIZIERE	ROUTE	TAVY et DEFRICHEMENT	Total
	Non classifie	5	1	55	1	6	1	93	162
EAU	bleu	58	0	0	0	0	0	43	101
LAVAKA	rouge	0	134	0	0	0	0	3	137
VEGETATION	vert	0	62	4547	3	5	2	192	4811
SABLE	jaune	0	47	14	84	0	6	53	204
RIZIERE	cyan	0	19	184	52	613	7	682	1557
ROUTE	Grenat	0	9	315	20	11	49	217	621
TAVY	mauve	22	4	147	0	8	5	4222	4408
Total		85	276	5262	160	643	70	5505	12001

Tableau 10 : Matrice de confusion basée sur le nombre de pixel année 2013

	couleurs								
Classes		RIZIERE	LAVAKA	VEGETATION	SABLE	ROUTE	TAVY et DEFRISEMENT	EAU	Total
	Non classifie	1	0	13	0	0	3	3	20
RIZIERE	Cyan	242	0	0	0	0	0	0	242
LAVAKA	Rouge	0	145	0	0	0	0	0	145
VEGETATION	Vert	0	0	886	4	5	4	2	901
SABLE	Jaune	6	0	8	23	0	3	0	40
ROUTE	Grenat	0	0	8	0	32	0	0	40
TAVY	Mauve	0	26	12	5	4	751	0	798
EAU	Bleu	0	0	0	0	0	0	83	83
Total		249	171	927	32	41	761	88	2269

Tableau 11 : Matrice de confusion basée sur le nombre de pixel année 2016

	couleurs								
Classes		EAU	LAVAKA	RIZIERE	ROUTE	SABLE	TAVY et DEFRISSEMENT	VEGETATION	Total
	Non classifie	9	0	12	4	2	18	14	59
EAU	Bleu	67	0	0	0	0	0	0	67
LAVAKA	Rouge	0	212	0	0	0	0	0	212
RIZIERE	Cyan	0	0	2171	0	0	13	147	2331
ROUTE	Grenat	0	0	0	58	3	7	11	70
SABLE	Jaune	0	8	7	4	266	9	30	324
TAVY/DEFRISSEM	Mauve	16	74	3	14	5	1439	3	1554
VEGETATION	Vert	9	3	150	49	12	129	2316	2677
Total		101	297	2343	129	288	1615	2521	7294

Les trois tableaux des matrices de confusion affichent la somme de chaque nombre de pixel d'une manière générale dans la zone d'étude. Il est à noter, une diminution flagrante au niveau de la classe TAVY ou défrichement et une nette augmentation sont aussi à noter pour les classes lavaka, rizière et sable. L'application de télédétection dans le domaine environnemental occupe un intérêt capital dans ce mémoire de fin d'étude, plus précisément, dans le domaine de la gestion des risques. Ces intérêts sont la localisation des zones sensibles et l'observation de la progression (évolution) des menaces.

III.4. CALCUL DE LA PERTE EN TERRE

III.4.1. Etudes des conditions climatiques de la région

Les données énumérées dans le présent travail ont été acquises auprès de la station météorologique à Ampasapito (voir annexe IV). Il s'agit des données recueillies par la station Synoptique d'Ambohitsilaozana située dans la sous-préfecture d'Ambatondrazaka. Les graphes suivants montrent l'évolution pluviométrique des années 2011-2013-2016 (années de référence pour cette étude).

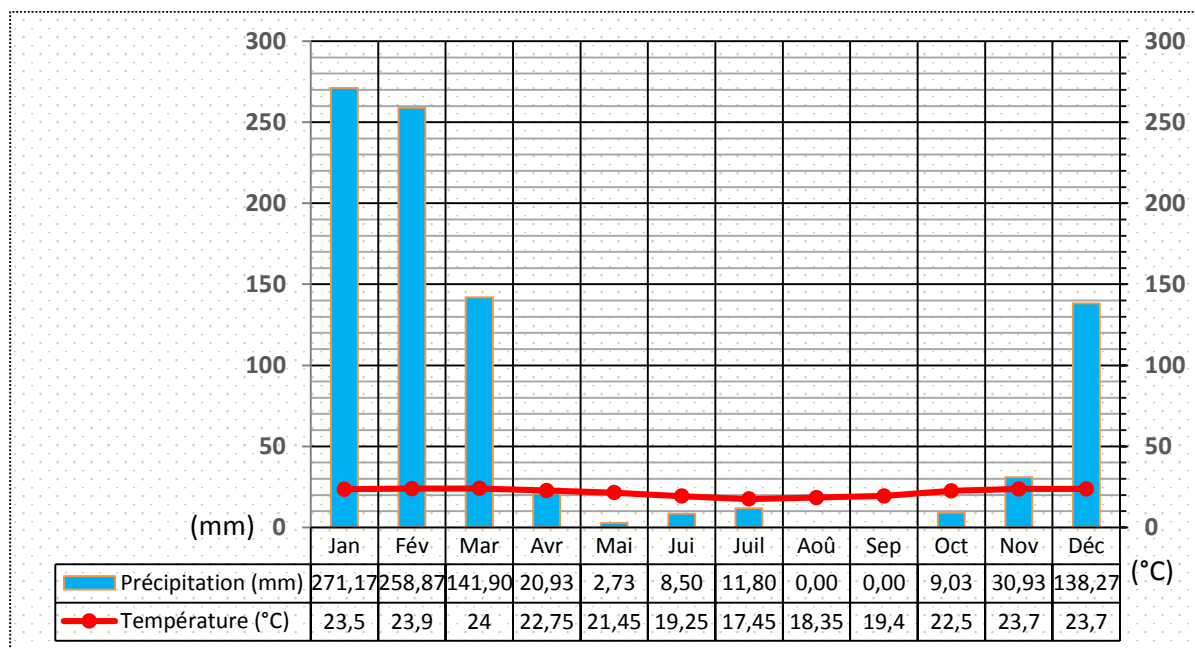


Figure 24 : Courbe ombrothermique de la Région 2011-2013-2016 (Source : Station Agronomique du Lac Alaotra Ambohitsilaozana, donnée station météorologique Ampasapito)

Selon ces informations, la température moyenne de la région est assez constante ces dernières années (2011-2013-2016) mais une augmentation de la période d'insolation annuelle (moyenne) est enregistrée (2085 heures par an). En observant la courbe ci-dessus, il existe deux saisons bien tranchées : tous les paliers situés en dessous de la courbe thermique correspondent

à des mois secs d'Avril en Octobre, caractérisée par un déficit d'eau (qui ne dépasse pas de 40mm et tous les paliers situés au-dessus de la courbe thermique de Novembre en Mars correspondent à des mois humides.

Remarque : si les deux lignes se confondent, les mois en cause sont déjà secs et les pluies estivales sont de nature orageuse ou cyclonique. C'est à partir de ces données que l'estimation de la perte en terre au niveau du bassin versant va être effectuée.

III.4.2. Résultat de l'estimation de la perte en terre par calcul direct

L'application de cette méthode est effectuée à partir de mesures directes sur terrain et/ou sur image de Google earth. Ici il est question de faire une estimation de la perte en terre de la ravine (figure 4) en aval, qui travers les rizières. Selon les investigations : (voir figures 12 et 13)

- LONGUEUR de la ravine : 930 m
- PROFONDEUR moyenne de la ravine : $2 + 0.1/2 = 1.05\text{m}$
- LARGEUR moyenne de la ravine : $7 + 2 = 4.5\text{ m}$.

D'après la formule : VOLUME de perte en terre de la ravine (m^3) = LONGUEUR (m) x
PROFONDEUR moyenne (m) x LARGEUR moyenne (m)

Donc : VOLUME de perte en terre (m^3) = $930\text{ m} \times 1.05\text{m} \times 4.5\text{ m} = 4394.25\text{ m}^3$

VOLUME de la perte en terre de la ravine (m^3) = 4394.25 m^3

III.4.3. Résultat de l'estimation de la perte en terre par l'équation universelle (WISCHMEIER et SMITH, 1978)

Concernant l'indice d'agressivité climatique (R), il a été dit que : $R = \sum E \times I_{p30} / 100$

Tableau 12 : Indice R pour l'année 2011

	h (mm)	Nj (j)	h (cm)	NH (Heures)	Ip (cm/h)	Eu (t.m/ha)	E (usa)
formules	données pluviométrique		h	Nj x 24	H	201+89logIp	Eu x H
			10		Nh		
mois							
Janvier	380,9	20	38,09	480	0,079354	112,0617	4268,43
Février	345,6	21	34,56	504	0,068571	106,4167	3677,763
Mars	256	10	25,6	240	0,106667	123,4946	3161,461
Avril	62,8	3	6,28	72	0,087222	115,7158	726,6953
Mai	5	4	0,5	96	0,005208	6,786191	3,393095
Juin	5,6	3	0,56	72	0,007778	22,28614	12,48024
Juillet	0	1	0	24	0	0	0
Août	0	1	0	24	0	0	0
Septembre	0	1	0	24	0	0	0
Octobre	0	1	0	24	0	0	0
Novembre	5,6	2	0,56	48	0,011667	37,95826	21,25663
Décembre	103,3	11	10,33	264	0,039129	84,73218	875,2834
Somme							12746,7624

Donc pour l'année 2011, $I_{p30} = 0,106667 / 2 = 0,053333$

Tableau 13 : Indice R pour l'année 2013

	h (mm)	Nj (j)	h (cm)	NH (Heures)	Ip (cm/h)	EU (t.m/ha)	E (usa)
formules	donnés pluviométrique		h	Nj x 24	H	201+89logIp	Eu x H
			10		Nh		
mois							
Janvier	218,6	20	21,86	480	0,046	90,60	1980,48
Février	289,0	16	28,9	384	0,075	110,01	3179,42
Mars	36,7	8	3,67	192	0,019	57,04	209,34
Avril	0	2	0	48	0	0	0
Mai	3,2	4	0,32	96	0,003	10,46	3,35
Juin	17,9	6	1,79	144	0,01	40,41	72,33
Juillet	31,4	8	3,14	192	0,02	51,01	160,18
Août	0,0	0	0	0	0	0	0
Septembre	0,0	0	0	0	0	0	0
Octobre	27,1	4	2,71	96	0,028	72,11	195,42
Novembre	68,2	6	6,82	144	0,047	92,11	628,21
Décembre	275,5	15	27,55	360	0,077	110,66	3048,68
Somme							9477,4129

Donc pour l'année 2013, $Ip_{30} = 0,077 / 2 = 0,038$

Tableau 14 : Indice R pour l'année 2016

	h (mm)	Nj (j)	h (cm)	NH (heures)	Ip (cm/h)	EU (t.m/ha)	E (usa)
formules	donnés pluviométrique		h	Nj x 24	H	201+89logIp	Eu x H
			10		Nh		
mois							
Janvier	213,8	11	21,38	264	0,081	112,85	2412,69
Février	142,1	15	14,21	360	0,039	85,07	1208,84
Mars	133,3	7	13,33	168	0,079	112,06	1493,72
Avril	0	0	0	0	0	0	0
Mai	0	0	0	0	0,000	0,00	0,00
Juin	2,2	2	0,22	48	0,00	1,85	0,41
Juillet	4,1	3	0,41	72	0,01	10,24	4,20
Août	0	0	0	0	0	0	0
Septembre	0	0	0	0	0	0	0
Octobre	0	0	0	0	0,000	0,00	0,00
Novembre	19,4	5	1,94	120	0,016	50,57	98,10
Décembre	36	4	3,6	96	0,038	83,09	299,12
Somme							5517,0798

Donc pour l'année 2016, $Ip_{30} = 0,081 / 2 = 0,0404924$

Concernant les données pluviométriques, en faisant la moyenne pour les hauteurs de pluies des années 2011-2013-2016, les valeurs respectives de 97,07mm- 80,63 mm- 45,91mm sont obtenues. Ces données montre donc une nette diminution de la hauteur de pluie annuelle pour l'année 2016 tout comme l'énergie cinétique des pluies de cette année qui fonction de cette dernière.

Tableau 15 : Résultats de l'application de l'USLE

Les résultats concernant l'estimation quantitative de l'érosion hydrique de Manerinerina sont représentés dans le tableau suivant.

INDICES		FORMULES	RESULTATS
K		Sols ferrugineux tropicaux.	0,157 t.h/MJ.mm
LS		$LS = 143/100 [0,76 + (0,53 \times 30) + (0,076 \times 30^2)]$	121,6358
C		Savane arborée et arbustive.	0,3
P		Une valeur arbitraire pour Madagascar.	1
R	R ₁	$12746,7624 \times 0,053333 / 100$	6,7983 usa
	R ₂	$9477,4129 \times 0,038 / 100$	3,6264 usa
	R ₃	$5517,0798 \times 0,04049242/100$	2,2339 usa
A	2011	$2,24 \times 6,7983 \times 0,157 \times 121,6358 \times 0,3 \times 1$	87,2426 t/ha.an
	2013	$2,24 \times 3,6264 \times 0,157 \times 121,6358 \times 0,3 \times 1$	46,5381 t/ha.an
	2016	$2,24 \times 2,2339 \times 0,157 \times 121,6358 \times 0,3 \times 1$	28,6690 t/ha.an

Les valeurs de la perte en sol pour les années 2011, 2013, 2016 sont de 87,2426 t/ha.an, 46,5381 t/ha.an et 28,6690 t/ha.an qui correspondent respectivement à 35,2466 t/acre.an, 18,8014 t/acre.an, 11,5822 t/acre.an. Ainsi A pour 2011 et 2013 sont supérieurs à 15 t/acre/an et pour 2016 A est comprise entre 10-15. Selon le tableau 3, ces valeurs de la perte en sol A pour 201 et 2013 sont classées parmi l'érosion de sol « grave » et pour 2016 A est classée «élevé».

Il peut être dit alors que le bassin versant dominant le périmètre de Manerinerina est en état de dégradation très avancé.

III.5. ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Les résultats obtenus dans ce présent travail concernant l'EIE est la « méthode matricielle» adoptée par l'ONE (RAONINJATOVOHERIVONJY H., 2016).

III.5.1. Identification des impacts

Les résultats d'identification des impacts sont représentés par le tableau n°15 ci-dessous.

Tableau 16 : Analyse des impacts

Les impacts négatifs : d'après ce tableau, les Impacts négatifs immédiats sont les plus imminents (colorés en gris) et concernent l'ensablement, la formation des « BEDANA », les pertes en terre, le lessivage, le défrichement de la couverture végétale et la production de charbon de bois. L'impact positif : parmi les dix désignations citées, seul l'apport en éléments nutritifs causé par l'érosion à petite échelle (colorés en bleu ciel) présente un impact positif.

Sources d'impacts	Milieu récepteurs	Impacts		
		désignations	codes	types
Eau de ruissellement	Zone de culture	Ensablement	IP1	-Négatif -Indirect -Immédiat
	Zone de dépôt	Formation des « BEDANA »	IP2	-Négatif (en solution) -direct -Immédiat
Erosion	Montagne et colline (en amont)	LAVAKA	IP3	-Négatif -Direct -Différé
		Perte en terre	IP4	-Négatif -direct -immédiat
	En amont et en aval	Lessivage	IP5	-Négatif (à grande échelle) -direct -immédiat
Erosion (à petite échelle)	Zone de culture	Apport en éléments nutritifs	IP6	-positif
Diminution de la qualité du sol	Zone de culture	Diminution de la productivité du sol	IP7	-Négatif -Direct -Différé
Feu de brousse	Zone en amont	Défrichements de la couverture végétale	IP8	-Négatif -Direct -Immédiat
Défrichements de la couverture végétale	Climat	Sècheresse	IP9	-Négatif -Indirect -Différé

Population locale	Zone forestière locale (en amont) et climat	Production de charbon de bois	IP10	-Négatif -Direct -Immédiat
-------------------	---	-------------------------------	------	----------------------------------

En observant le tableau 15, il est à noter que la majorité des sources d'impacts ont un effet immédiat sur l'environnement. Les solutions à court terme ne doivent donc pas être minimisées dans les futurs projets écologiques menés dans la région. En effet, il est impératif de stopper la progression de ces fléaux dégradants pour éviter que des dégâts irréparables sur l'environnement comme la stérilité des terrains de cultures se multiplient.

III.5.2. Evaluation des impacts

Tableau 17 : Importance des impacts.

Il s'agit d'établir une catégorisation de l'importance des impacts suivant l'équation:

$$I = (D) + (E) + (A) + (O).$$

IMPACTS	Code	D	E	A	O	Total	IMPORTANCE
Ensablement	IP1	3	2	2	3	9	Moyenne
LAVAKA	IP3	3	2	2	2	9	Moyenne
Lessivage	IP4	3	2	2	2	9	Moyenne
Diminution de la productivité du sol	IP7	3	3	2	3	11	Majeure
Défrichements de la végétation	IP8	3	2	3	3	11	Majeure
Sècheresse	IP9	3	2	3	3	11	Majeure
Production de charbon de bois	IP10	3	2	2	2	9	Moyenne

En complémentarité avec le tableau 15, les impacts d'importances majeures sont mis en exergue à partir du calcul d'impact I (voir le tableau 4 dans la partie méthodologie).

Les importances identifiées comme étant moyenne (bleu ciel) signifient que leurs répercussions sur le milieu peuvent être atténuées par des mesures environnementales et ceux identifiées comme étant majeure (gris) peuvent difficilement être mitigées. Le tableau 16 est impératif dans le cas d'un éventuel futur projet de lutttes pour classifier les impacts et planifier, de l'ordre de la majeure vers moyenne, la réalisation des moyens de lutttes.

CHAPITRE IV. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

Dans cette quatrième partie du travail, il est question de discuter des différents problèmes et de donner des recommandations adéquates en considération du souci d'équilibre entre dégradation, protection et la production.

IV.1. DISCUSSIONS

IV.1.1. Données pertinents sur érosion hydrique (2011-2016)

Selon les résultats obtenus, l'érosion en nappe (45%) et l'érosion en lavaka (30%) sont les plus rependues dans la zone. La classification supervisée des images satellites par la télédétection montre une nette augmentation de la classe végétation (en 2016) contrairement à la classe tavy/défrichement et la classe Lavaka qui présentent une nette diminution. Ces données ont été confirmées par les résultats numériques, d'abord à travers le pourcentage en végétation avec un écart de 13,6% entre l'image de 2013 et l'image de 2016. Ensuite, l'image de 2016 montre une nette diminution de 17,79% par rapport à celle de 2013 pour la classe tavy/défrichement. Parallèlement, il a été démontré que le bassin versant dominant le périmètre de Manerinerina est en état de dégradation très avancé, A pour 2011 et 2013 sont classées parmi l'érosion de sol « grave » et pour 2016 A est classée « élevée ».

Le district de Moramanga, avec une surface de 37 960 ha cultivée et une production rizicole de 81 595 tonnes soit un rendement de 2,15 t/ha fait partie de l'un des foyers de productions dans ce domaine (PRD, 2007). Mais le système de production en place est sérieusement menacé par la dégradation environnementale ce qui entraîne une diminution progressive de la production agricole ces dernières années.

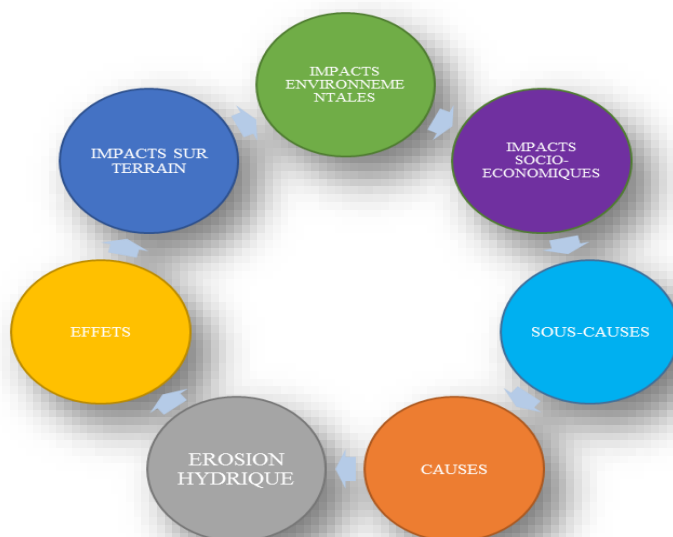
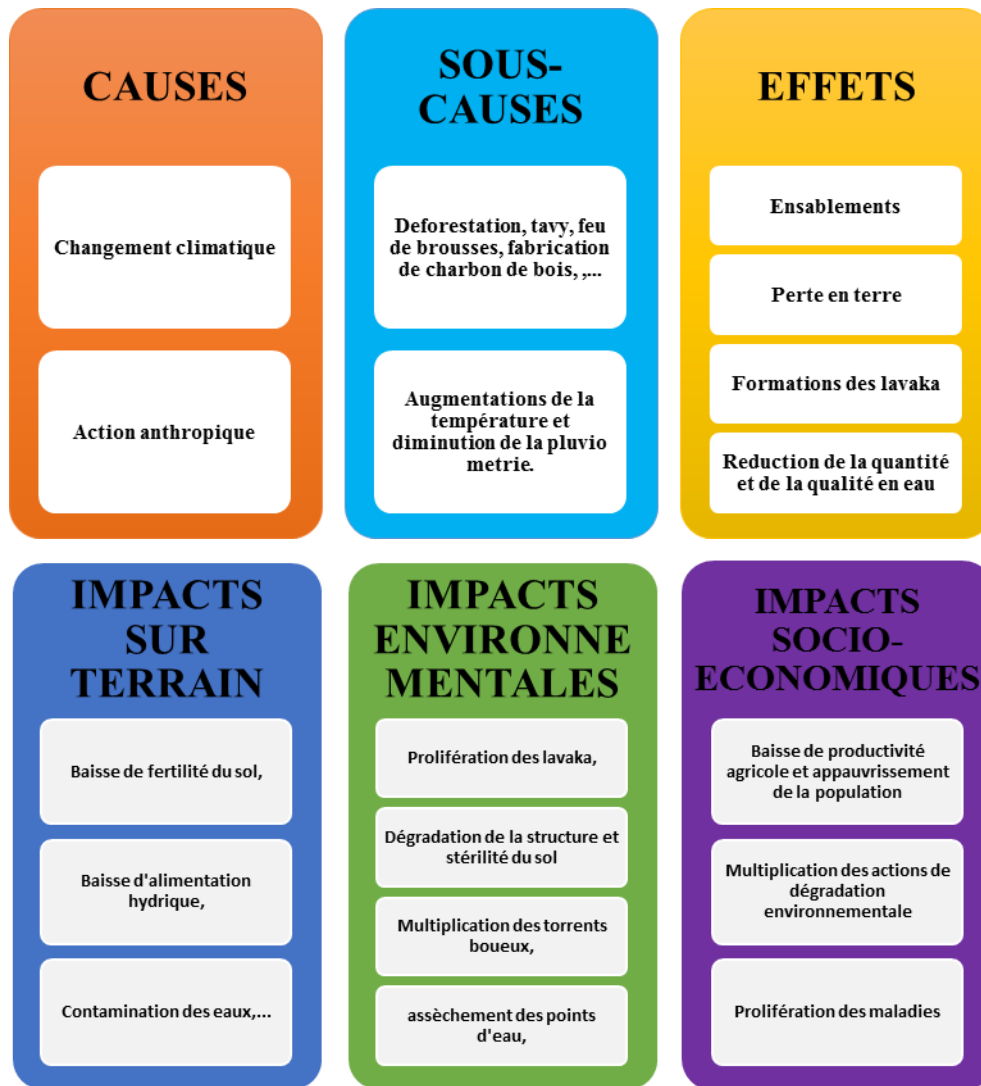


Figure 25 : Cycle régissant le phénomène érosion hydrique



IV.2. Etude dans le temps du phénomène érosion hydrique

D'abord pour le facteur climatique, avant 2005, les précipitations moyennes annuelles sont de 1 500 à 2 000 mm avec des brumes toute l'année et un hiver à pluies fines et fréquentes (PRD Alaotra Mangoro, 2005). Mais depuis 2011, il existe deux saisons bien tranchées, correspondent à une période humides (Novembre en Mars) avec une précipitation moyennes de 170 mm et une période secs (Avril en Octobre) caractérisée par un déficit d'eau qui ne dépasse pas de 40mm. Il apparaît que le réchauffement se manifeste par la diminution de la précipitation moyenne annuelle

Ensuite pour l'action anthropique, il a été enregistré que entre 1990-2000, 2 374 Ha de forêts défrichées et près de 4 434 ha entre 2000-2005 (Source : Monographie de l'Est, 2001). Alors en 2016, pour la classe tavy/défrichement (ensemble tavy, Déforestation et Feux de brousses), Manerinerina présente un taux de 640,56 ha de végétation défrichée, ce qui est largement supérieur à la moyenne nationale. Il est aussi a noté que le taux de couverture végétale d'Andaingo (Manerinerina) est de 47,83%. Il est donc légèrement en-dessous de 50

%, un niveau pour lequel, l'écosystème est déjà considéré comme en état de dégradation plus ou moins avancé (DERAD, 2005).

Puis pour les lavaka, dans la région d'Alaotra, les images de landsat en 2007 permettent d'identifier 4 735 lavaka. Seule 13% se trouvent à l'état stable et Le taux de l'occupation s'élève à 1,5 % sur l'ensemble dans la région (selon FOFIFA/INSTAT/Cornell). Manerinerina, la zone d'étude, avec un taux de l'occupation de 1,74% (une superficie de 48,65ha) et plus de 10 lavaka fait partie, en 2016, des classes de communes à taux de lavaka très élevé.

Enfin, des enquêtes menées par les organismes FOFIFA/INSTAT/Cornell avant 2007 ont montré un taux d'érosion supérieurs à 35% de bas-fonds ont été enregistré pour la commune d'Andaingo. En 2016, après traitement d'image satellite de la zone, l'analyse des statistiques des classes donne un taux d'érosion supérieurs à 20 %. Une baisse de 15% du taux d'ensablement est enregistrée ces dix dernières années. Cette baisse s'explique par la diminution de l'agressivité climatique et les actions écologiques des ONG dans la région.

IV.3. RECOMMANDATIONS

Cette partie est consacrée à la recommandation de différentes stratégies de conservation du sol et aux luttes contre l'érosion hydrique. Ce sont des solutions techniques à moyen et long terme car leurs effets ne sont palpables que vers la cinquième année d'application. Les recommandations proposées ont pour objectifs de :

- réduire l'intensité des phénomènes érosifs ;
- réduire les apports solides atterrissant vers les bas-fonds;
- lutter contre la prolifération des lavaka.

IV.3.1. Stabilisation par le reboisement et l'embroussaillage

La pratique des techniques de reboisement est un facteur principal de conservation et de protection des sols contre l'érosion. En partant des normes mise en vigueur et des stratégies de gestion.

- Rôles des végétaux

Les plantes interviennent de façons multiples à la résistance à l'érosion :

- par leurs racines, elles favorisent l'infiltration de l'eau dans le sol et réduit le ruissellement de surface;
- par leur résistance mécanique au ruissellement, elles constituent un obstacle qui ralentit la vitesse de l'écoulement superficiel favorisant ainsi l'évaporation et l'infiltration;

- par interception, elles jouent le rôle d'un écran protecteur contre l'action dynamique des pluies (effet "splash").

- Types de végétations les plus fréquemment utilisées

Le reboisement se fait avec des espèces végétales qui peuvent s'adapter aux conditions écologiques de ce milieu.

Tableau 18 : Liste des espèces les plus fréquemment utilisées dans la lutte antiérosive. Source : inspiré de RAHARINAIVO, 2008.

ESPECES		Principaux usages
Nom scientifique	Nom vernaculaire	
Agroforesterie		
<i>Acacia mangium</i>	Mimozà	Bois rond, énergie, fertilité
<i>Acacia auriculiformis</i>	Mimozà	Bois rond, énergie, fertilité
<i>Acacia holosericea</i>	Mimozà	Fertilité, brise vent, embroussaillement, bois de chauffe
<i>Acacia leptocarpa</i>	Mimozà	Fertilité, bois de chauffe
<i>Albizia lebbeck</i>	Bonara	Fertilité, fourrage
<i>Crotalaria grahamiana</i>	Crotallaire, Aika	Fertilité
<i>Grevillea banksii</i>	Grevillea blanc	Fixation talus, haie vive
<i>Leuceana leucocephala</i>	Bonara mantsina	Fertilité, embroussaillement, bois de chauffe
<i>Lantana camara</i>	Radriaka	Haie
<i>Sesbania sesban</i>	Maivanaty	Fertilité, embroussaillement
Fourrage		
<i>Brachiaria ruziensis</i> ou <i>brizantha</i> ou <i>humidicola</i>	Vilona	Fourrage, plante de couverture
<i>Stylosanthes guianensis</i>	Vilona	Fourrage, plante de couverture
Foresterie		
<i>Cinnamomum camphora</i>	Ravintsara	Bois, huile essentielle

<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Kininina	Bois de chauffe, bois de construction, brise vent
<i>Tectona grandis</i>	Kesika	Bois d'œuvre, bois de construction

Il est à noter que certains de ces espèces (*Grevillea banksii*, Ravintsara, ...) citées dans ce tableau ont déjà été utilisés par la population locale par l'intermédiaire des projets de réhabilitations menés par les différents ONG. Mais pour obtenir plus d'efficacité, quelques mises à jour sont de rigueur concernant les techniques mises en place.

IV.3.2. Stabilisation par des aménagements artificiels

Le traitement ou la correction des lavaka consiste à les stabiliser par des techniques mécaniques simples accompagnées par des techniques donnant la primauté au biologique. Le lavaka peut se stabiliser naturellement quand sa tête atteint le sommet de la colline où il se produit et que le couvert végétal à l'intérieur est suffisamment épais pour empêcher le départ des produits d'effondrement vers l'aval. En d'autres termes, il s'agit d'accélérer l'évolution des lavaka pour atteindre le stade de stabilité.

➤ En amont du lavaka

Tout d'abord, une végétalisation (exemple : *Grevillea banksii*) de la bordure des lavaka pour retenir la terre et pour éviter le glissement du talus doit être faite. Ensuite il faut mettre en place des fossés de diversion ou de protection au sommet pour éviter tout apport d'eau supplémentaire dans le lavaka. Les canaux seront placés assez loin des bords du lavaka et les eaux seront rejetées vers des zones non érodables.

Au cas où il y a des arrivées d'eau sur les flancs, il faut établir un exutoire de canaux dit « de diversion ». Les eaux drainées vers un exutoire choisi doivent être freinées par des fascines pour éviter une érosion néfaste sur le chemin de l'eau.

➤ A l'intérieur du lavaka ou du ravin

• Rectification du ravin

Elle se fait par la mise en place d'une succession de petits barrages en bois (fascines) dont le nombre dépend de la longueur et de la pente du ravin pour empêcher le départ des sédiments vers la sortie.

Le barrage principal est mis en place à la sortie du ravin, à sa partie la plus rétrécie. C'est un barrage en bois fait avec des poteaux de 1m à 1,20m de hauteur, de 10 à 15cm de diamètre enfoncés dans la terre pour lui assurer un bon ancrage et favoriser ainsi l'atterrissement naturel des dépôts solides en amont. Un autre type de barrage principal est constitué de 2 rangées de fascines remplies de pierres à l'intérieur.

Les barrages secondaires sont construits en aval du barrage principal et sont disposés l'un en aval de l'autre au fur et à mesure de leur remplissage par les sédiments non stoppés par le barrage principal. Le type de barrage secondaire choisi est constitué de fascines en bambous qui sont les plus économiques et présente l'avantage de s'enraciner et de se développer très vite rendant le barrage plus durable. (Source : ANDRIAIMBOLASOA, 2016)

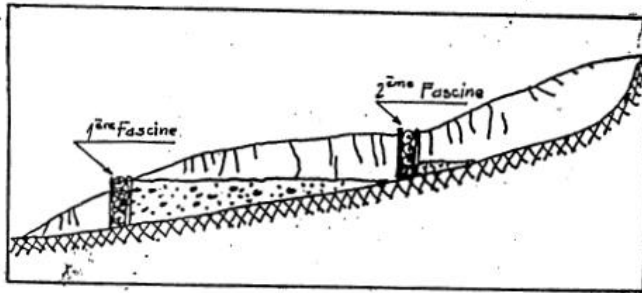


Figure 26 : Vue longitudinale de la disposition des fascines

- l'embroussaillage à l'intérieur du lavaka

Cette action se fait sur les parties retenues par les fascines par l'intermédiaire :

- d'espèces à croissance rapide comme : *Arong madagascariense*, *Lantana camara*, *Grevillea bunksii*. ;
- et d'autres espèces pour tester leur pouvoir de fixation comme le vétiver, le *Casuarina*, l'*Euclyptus grandis*.

IV.3.3. Méthode des bandes d'arrêt

- Terrasse de culture

Cette technique est mise en place pour les lavaka très actifs dont la profondeur est plus de 10 m à l'origine de l'ensablement des rizières. La paroi du lavaka doit être terrassée dans l'objectif de réduire les effets de la chute d'eau. Cette tête est aménagée en terrasse suivant les courbes de niveau.

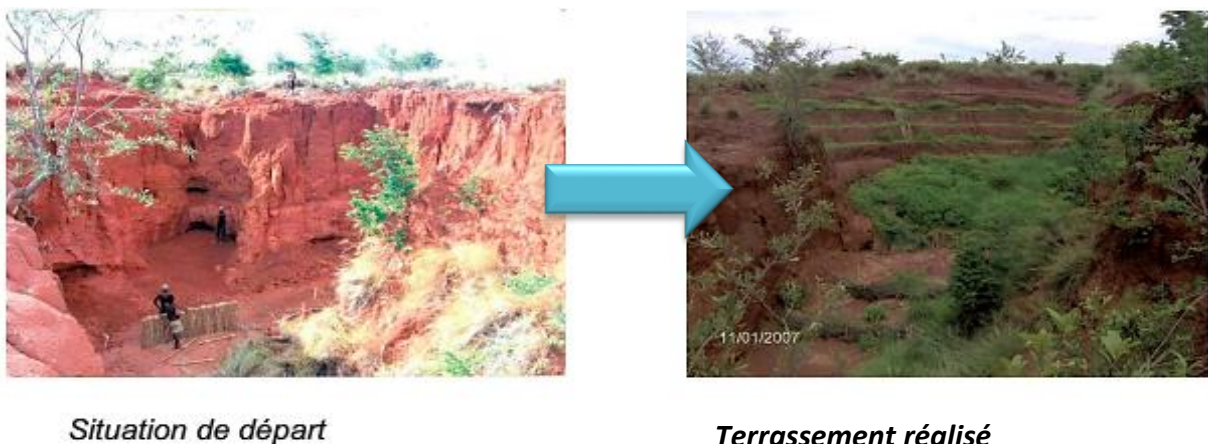


Figure 27 : Terrasse de culture. Source : Solofo RAHARINAIVO, 2008.

- Méthode de PLAÉ : pour cette fin, diverses espèces, légumineuses ou graminées, des plantes fourragères (*Crotalaria*, *Tephrosia*, *Cajanus cajan*, *Pennisetum*,...) sont utilisées comme des haies. Ces haies antiérosives sont installées suivant les courbes de niveau et plus particulièrement sur la zone en amont de la ravine ou du lavaka à traiter mais également pour fixer l'accumulation de sable en aval des ravines.

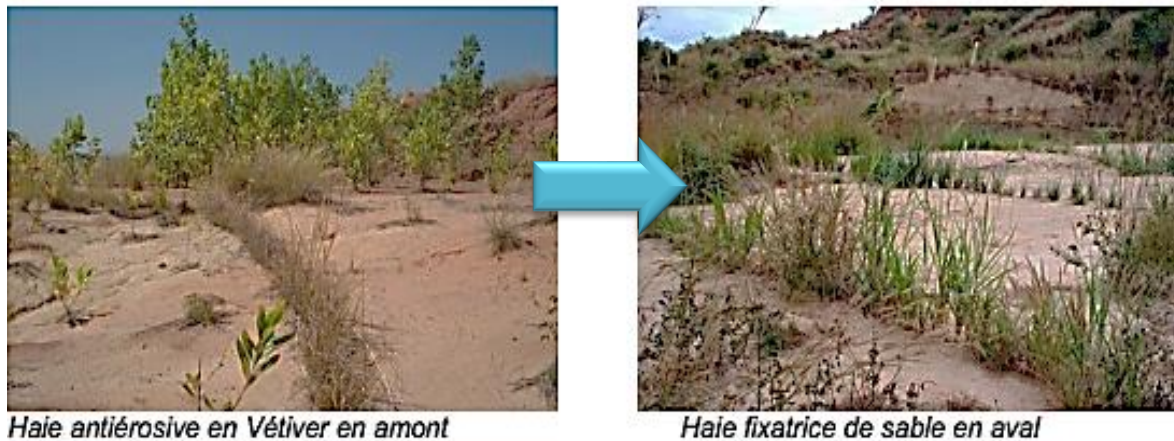


Figure 28 : Haies antiérosives. Source : Solofo RAHARINAIVO, 2008.

IV.3.4. Mise en place de l'arbre des objectifs

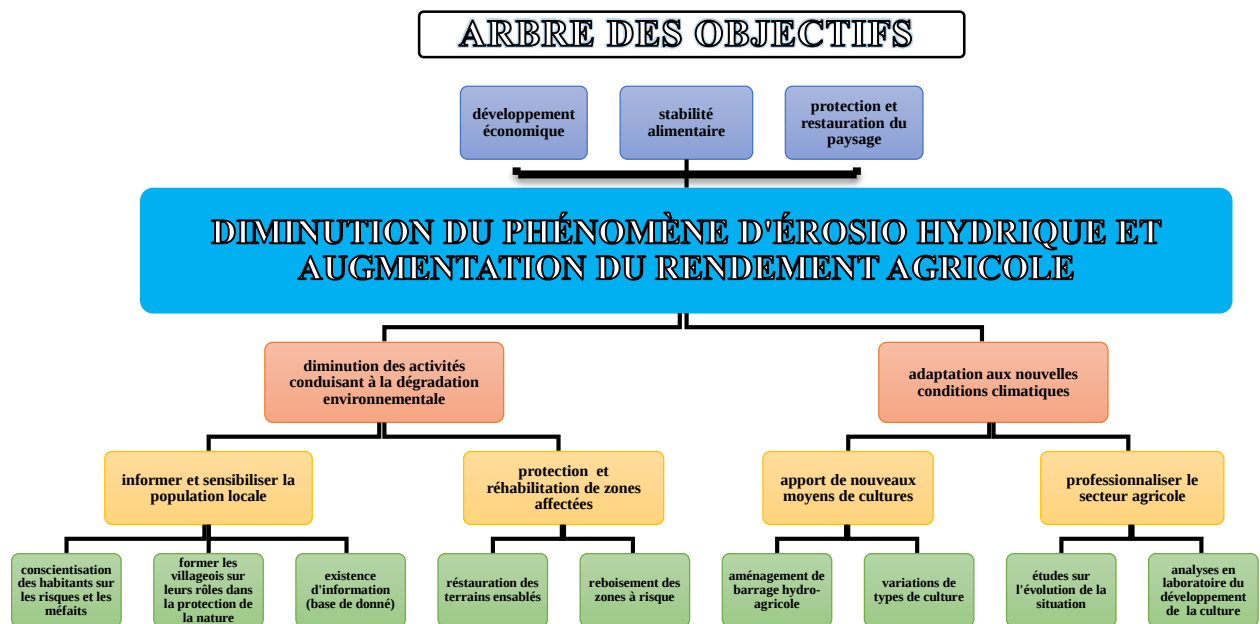


Figure 29 : Arbre des objectifs

La lecture de l'arbre des objectifs ci-dessus se fait par l'illustration ci-dessous. Cette est une étape indispensable lors d'un éventuel traitement lié au problème d'érosion dans la zone.



CONCLUSION

Ce présent mémoire a pour finalité principale de faire une analyse dans le temps et dans l'espace de l'évolution de l'érosion hydrique de la zone pilote Manerinerina (commune d'Andaingo). L'analyse de la localité montre la présence de différentes formes d'érosion hydrique qui évoluent, avec le temps, en lavaka constituant le stade ultime. La nature et le mode d'occupation du sol, la géométrie des versants, les précipitations atmosphériques ainsi que la pression anthropique sont les facteurs favorisant le phénomène « érosion hydrique ».

L'apport de la télédétection (Envie version 4.5), à partir des images satellitaires LandSat 8 de l'an 2011-2013-2016, les cartes de l'occupation du sol ont été réalisés. Leurs importances résident dans le fait qu'elles permettent de classifier et d'identifier les zones à risque. Quant au Système d'Information Géographique (ArcGIS 10.1), il permet l'analyse thématique et le transfert de données. L'utilisation du logiciel Google Earth a permis de faire une visualisation globale de la zone et d'interpoler les valeurs des indices de pente.

Le modèle universel de WISCHMEIER a permis de calculer les pertes en terre causées par l'érosion dans la zone d'étude. Selon le calcul effectué, les valeurs $A1 = 87,24267$ tonnes par hectare en 2011 alors qu'en 2016 $A3 = 28,6690556$ tonnes par hectare. Une nette réduction en termes de perte en terre est donc enregistrée d'après ces résultats. L'explication à cette réduction réside au niveau de la diminution de la valeur de l'indice d'agressivité des pluies R qui est de 6,7983 usa en 2011 alors qu'en 2016 elle est de 2,2339 usa. L'autre explication est que les actions écologiques menées par les ONG ont porté leurs fruits. L'érosion hydrique est un phénomène qui est difficile à stopper et dans la lutte contre ce fléau, des aménagements par des méthodes appropriées pour atténuer les effets néfastes sont indispensables. Les méthodes ont pour but la stabilisation des ravins et la correction des lavaka pour limiter les pertes en terre des versants.

Sur le côté pratique, l'intérêt de ce présent travail réside par exemple le riz l'aliment de base de la population et occupe une dimension socioculturelle importante. Mais ces dernières années une inflation du riz a été enregistrée. L'érosion qui entraîne l'ensablement des rizières est l'un des causes de cette inflation. Il est donc impératif de traiter ce problème pour préserver notre mode de vie actuelle. Pour plus d'efficacité, une approche socio-économique pour conscientiser les populations locales doivent être entreprises, ainsi la pérennité des résultats serait garantie. Cette participation dans la réalisation du projet est la base pour une voie vers un projet de développement durable.

BIBLIOGRAPHIES

ANDRIAIMBOLASOA Belzard, 2016, « La stabilisation de lavaka dans la région du lac Alaotra Madagascar ».

DENIS, A., 21 janvier 2016, « Travaux pratiques de teledetection ».

Evelyne Payet, Pascal Dumas et Gwenaëlle Pennober, 2012-l'article « Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant de Madagascar, le Fiherenana », USLE Madagascar.

GEF, Juillet 2013 « Protection des falaises et lacs sources de la riviere de Mangoro dans le fokontany de Moratelo, commune rurale d'Andaingo, district de Moramanga, région Alaotra-Mangoro, Madagascar », projet Endriky ny Zavaboahary Ankehitriny ny Kaja Ala (E.Z.A.K.A).

Inventaire des Fivondronana de Madagascar, 2001.

LACOMBE, J.-P., 2007/2008 « Initiation au traitement d'images satellitales » -Travaux dirigés : Cahier 2.

Midekor (Observatoire de l'Eau) , A., & Wellens (GEeau), J., 2013 « INITIATION A ENVI » du 22 au 24 Octobre 2013 Ouagadougou, Burkina Faso.

Moise Tsayem Demaze, 2011 « La télédétection en tant qu'outil de mesure de la réduction de la déforestation (REDD) ». REVUE TELEDETECTION, RECHERCHE ET APPLICATION, , volume 9 (3-4), pp.245- 257.

ONE, 2006, « Profil environnemental régional de la région Alaotra Mangoro », Rapport dans le cadre du sous contrat 1180-000-ONE JARIALA/ONE, Office National pour l'Environnement, 40p.

PGRM, TUCKER, R.D., PETERS, S.G., ROIG, J.Y., THEVENIAUT, H., DELOR, C. Juin 2012, « Notice explicative de la carte géologique et métallogénique de la République de Madagascar », à 1/1 000 000, p 35-107.

UPRD Alaotra Mangoro – 2005. [Http://www. UPRD.org/MG/](http://www.UPRD.org/MG/)

RAHARINAIVO S., 2008, « Les techniques de Correction des Lavaka acquis à Marovoay ».

RAONINJATOVOHERIVONJY Hajaridera (ONE), 2015-2016, cours Etude d'Impact environnemental, quatrième année PSAEECO.

Riquiert J., 1954 ; Ch. ROBEQUAIN, 1953 ; J. TRIGART en 1963 ; « Etude sur les LAVAKA », p 169-419.

ROOSE. E J, Août 1975 ; « Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest » , O.R.S.T.O.M, p 13 - 39.

ROOSE. E J, 1975 ; « Quelques techniques antiérosives appropriées aux régions tropicales », p 2 - 5.

2016, Station Agronomique du Lac Alaotra Ambohitsilaozana ; rapport d'observation météorologique annuel.

Wischmeier w h, smith D, 1978, "Prediction rainfall erosion losses a guide to conservation planning" s.l: agriculture handbook, p 58-537.

WEBOGRAPHIES

<http://www.ricehub.org/MG/>

<http://www.youtube.com/OBVAJ>

<Http://www.planet-terre.enslyon.fr/>

<Http://www.Thèsemalagasyenligne.com>

<Http : //www.wikipedia.org/>

<http://www.UPRD.org/MG/>

ANNEXES

Annexe 1 : Représentation de la sous-préfecture de Moramanga..	I
Annexe 2 : Tableau résumant le projet antérieur (Juillet 2013)..	II
Annexe 3 : Le coefficient d'occupation du sol en fonction du type d'occupation du sol.	III
Annexe 4 : Pluviométrie de la région.....	III
Annexe 5 : Prévision météorologique d’Andaingo pour les 30 prochaines années.	IV
Annexe 6 : Carte géologique de la commune d'Andaingo.....	V
Annexe 7 : Carte d'érosion correspondant 2011-2013-2016 pour analyse digital.....	VI

Annexe 1 : Représentation de la sous-préfecture de Moramanga. Source : Inventaire des Fivondronana de Madagascar, 2001.

SOUS-PREFECTURE	COMMUNES	SUPERFICIE (km ²)	Pourcentage (%)
MORAMANGA		9450	100
	Moramanga	1356	14
	Ambohibary	820	9
	Ampasimpotsy	300	3
	Andasibe	300	3
	Anosibe – Ifody	140	1
	Morarano gara	882	9
	Belavabary	187	2
	Sabotsy Anjiro	611	6
	Ambohidronono	205	2
	Beforona	347	4
	Ambatovola	443	5
	Lakato	704	7
	Amboasary	310	3
	Fierenana	452	5
	Mandilaza	480	5
	Antanandava	250	3
	Beparasy	278	3
	Andaingo	835	9
	Antaniditra	142	2
	Ampasipotsy	300	3
	Vodiriana	108	1

Annexe 2 : Tableau résumant le projet antérieur (Juillet 2013). Source : Endriky ny Zavaboahary Ankehitriny ny Kajy Ala (E.Z.A.K.A) Juillet 2013

Problématiques	Actions principales	Effets et impacts attendus
Dénudation des zones de la falaise d'Ankay : favorisation de la formation des Lavaka	- Plantation de Grevillea Banksii, sur une superficie de 15Ha	- Stabilisation et arrêt de la formation des Lavaka - Extension des zones gérées et embroussaillées de Grevillea dans les autres zones sensibles.
Lacs d'Antoby, Amparihimaromaso et Amasehidambo avec leurs biodiversités menacés de disparition à cause de l'ensablement/envasement et de leur exploitation sauvage ; rivières d'Amparihilava, Andranolava et Befefy bouchées	- Embroussaillage des bassins versants. - Curage de 600m de canal d'évacuation en aval du lac, mise en place de 300m de diguette - Application d'un dynam-pokonolona et de la législation en vigueur sur l'exploitation des ressources halieutiques	- Lacs et rivières avec leur biodiversité épargnée par l'ensablement et l'envasement. - Biodiversité des lacs conservées et gérées de façon rationnelle.
Terrain de culture endommagée par l'ensablement et l'envasement	- Restauration des parcelles endommagées	- 69 Ares de parcelles endommagées restaurées et cultivables

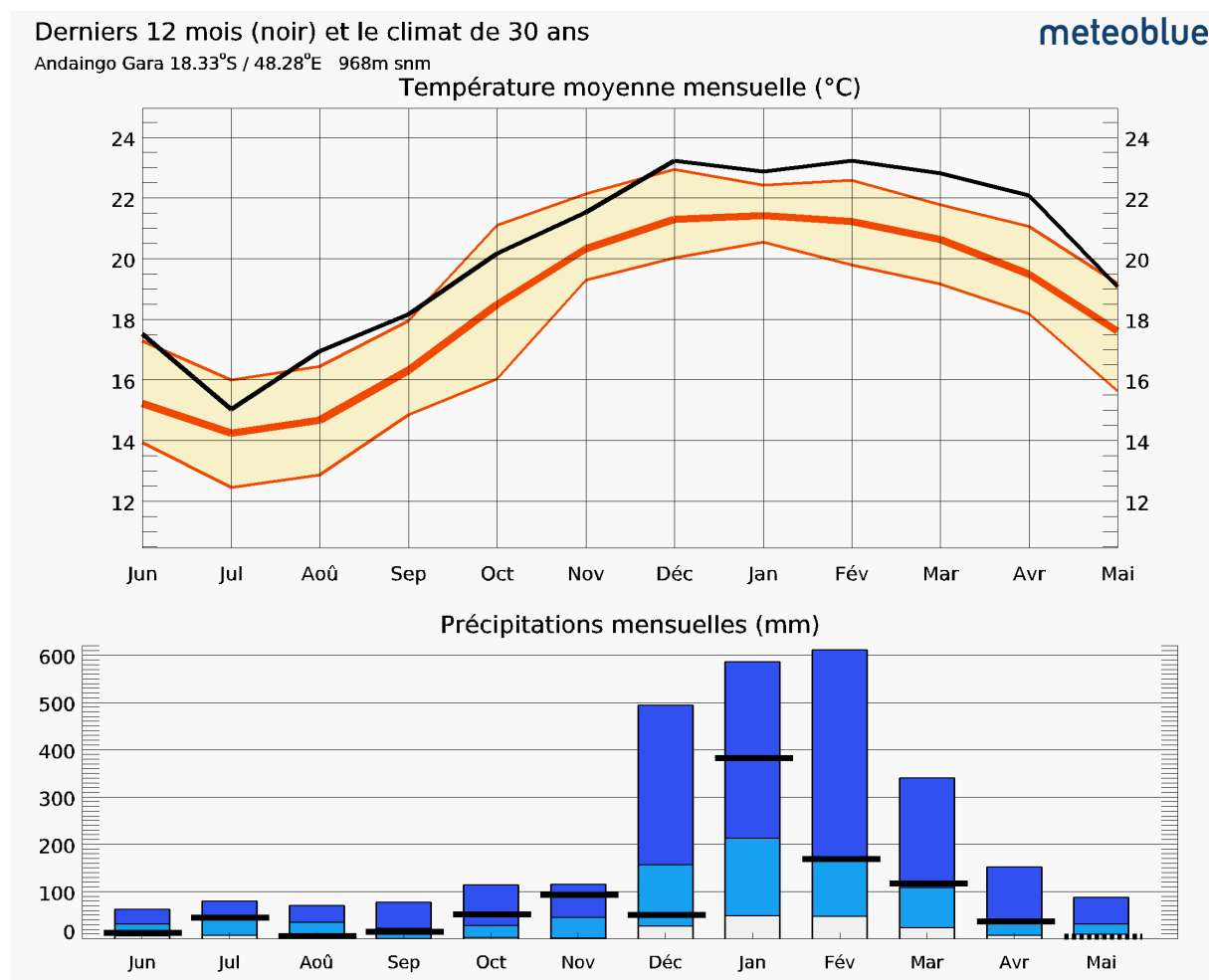
Annexe 3 : Le coefficient d'occupation du sol en fonction du type d'occupation du sol. (ROOSE, 1975)

Type d'occupation du sol	Facteur C
Sol nu	1
Forêt dégradée	0,7
Savane arborée et arbustive	0,3
Savane herbeuse dégradée	0,6
Mosaïque de culture	0,5
Mangrove	0,28
Surface bâtie	0,2
Zone reboisée	0,18
Rizière	0,15
Forêt dense	0,001
Plan d'eau	0

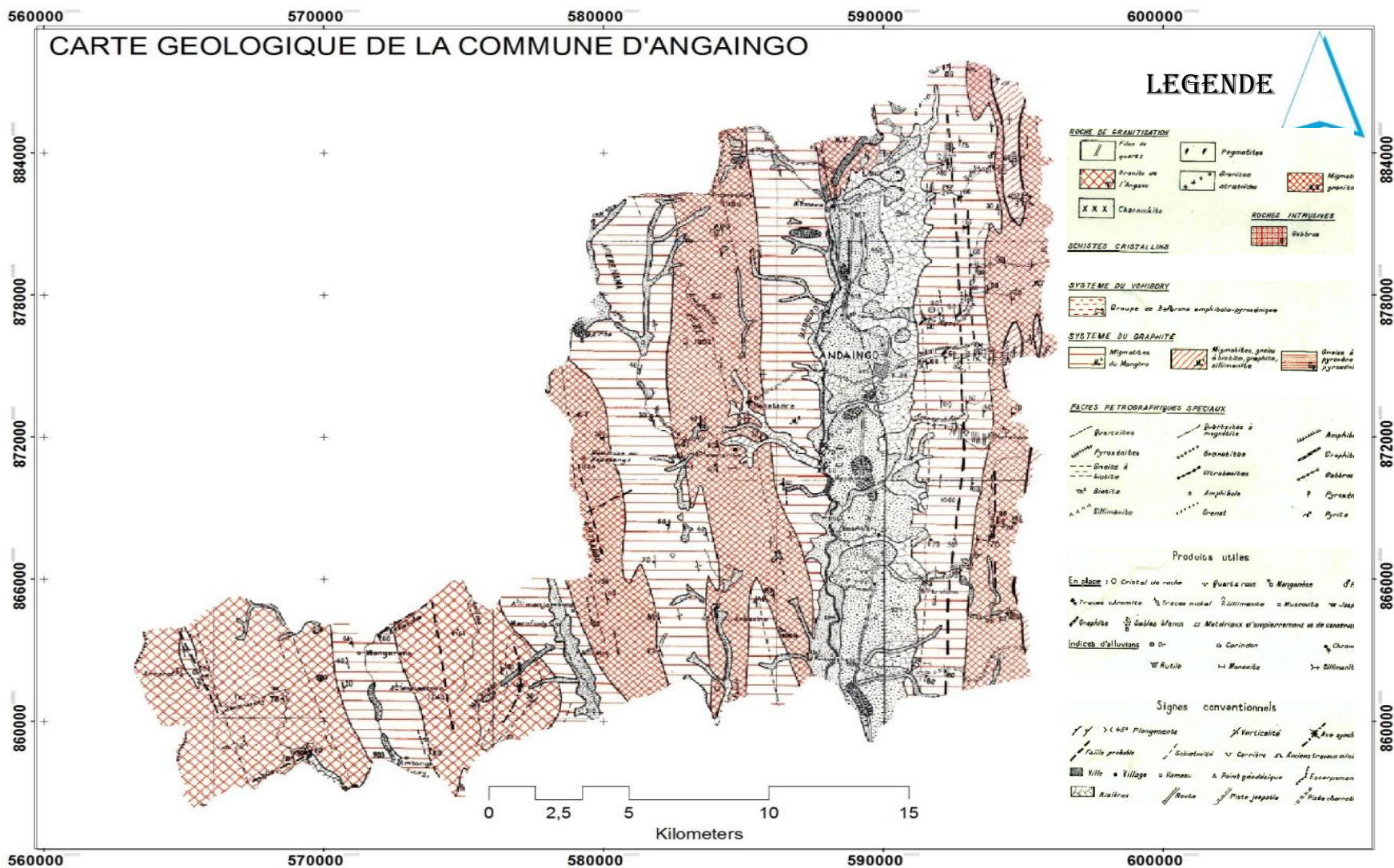
Annexe 4 : Pluviométrie de la région. Source : Station Ambotsilaozana

MOIS	Nombres de Jours de pluies			PLUVIOMETRIE		
	2011	2013	2016	2011	2013	2016
Javier	20	20	11	380,9	218,6	214
Février	21	16	15	345,6	289,0	142
Mars	10	8	7	256	36,7	133
Avril	3	2	0	62,8	0	0
Mai	4	4	0	5	3,2	0
Juin	3	6	2	5,6	17,9	2
Juillet	1	8	3	0	31,4	4
Août	1	0	0	0	0,0	0
Septembre	1	0	0	0	0,0	0
Octobre	1	4	0	0	27,1	0
Novembre	2	6	5	5,6	68,2	19
decembre	11	15	4	103,3	275,5	36
moyenne	6,50	4,00	3,92	97,07	80,63	45,91

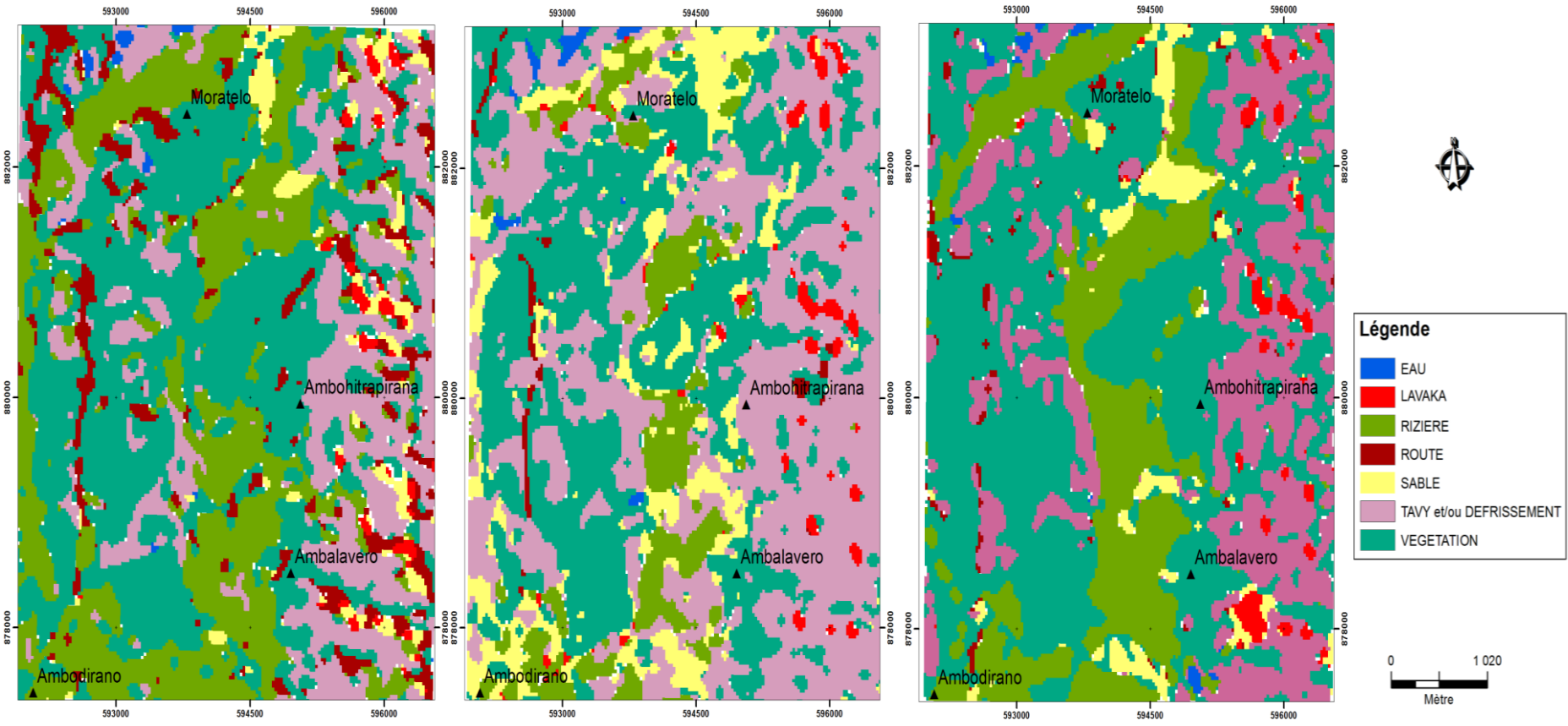
Annexe 5 : Prévision météorologique d'Andaingo pour les 30 prochaines années. Source : m teoblue



Annexe 6 : Carte géologique de la commune d'Andaingo. Source : Service Géographique à Madagascar (1963)



Annexe 7 : Carte d'érosion correspondant 2011-2013-2016 pour analyse digital.



Auteur : ANDRIANJAFIMALALA Tiana Patrick

E-mail : andrianjafypatrick08@gmail.com

Contact : +(261) 34 61 246 40

Encadreur :

- Madame RANDRIANALY Hasina Nirina

- 18 Tableaux, 29 Figures et 57 Pages



Titre : EVALUATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE CAS DE LA LOCALITE DE
MANERINERINA D'ANDAINGO (REGION ALAOTRA MANGORO)

RESUMÉ

Manerinerina est une localité à vocation agricole avec un taux d'érosion très élevé. Ce présent travail a pour finalité de trouver un équilibre entre la dégradation, la protection et la production. Une méthodologie basée sur l'analyse d'images satellites, l'évaluation de la perte en terre et Etude d'Impact Environnemental (EIE) a permis de mettre en exergue cet objectif. Ce faisant, des images (landsat 8, BD 100, Google earth), des données pluviométriques de la station d'Ambotsilaozana et des données issues d'enquêtes et d'observation sur terrain sur le facteur érosion ont été adoptés. Les cartes de risque d'érosion ou cartes de lavakisation ont permises de classer et d'identifier avec précision les zones stable et celles menacés pour proposer un système de protection et/ou de réhabilitation efficace.

Mots clés: érosion, modelés, lavaka, télédétection, Manerinerina.

ABSTRACT:

Manerinerina is an agricultural community with a very high erosion rate. This work aims to find a balance between degradation, protection and production. A methodology based on satellite image analysis, land loss assessment and Environmental Impact Assessment (EIA) has highlighted these objectives. In doing so, we adopted images (landsat 8, BD 100, Google earth), rainfall data from the Ambotsilaozana station and data from surveys and field observations on the erosion factor. Erosion risk maps or lavakation maps allow to classify and precisely identify stable and threatened zones to propose an effective system of protection and / or rehabilitation.

Key words: erosion, modeled, lavaka, remote sensing, Manerinerina.