

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

DEPARTEMENT DES EAUX ET FORETS

Diplôme d'Etudes Approfondies en Sciences Agronomiques

(DEA)

Option Foresterie Développement Environnement

Promotion : FANAMBY

Année : 2011-2012

« Développement d'un système de suivi par télédétection des lavaka » : cas du bassin versant de Sahamaloto, région Alaotra Mangoro.

Présenté par :

RANDRIANASOLO Sylvain Mamy

Soutenu le : 06 décembre 2013

Devant le jury composé de

Président :

Pr. RAKOTOZANDRINY Jean de Neupomuscène

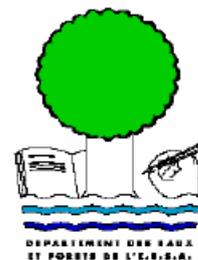
Rapporteur(s) :

Dr RAKOTO RATSIMBA Harifidy

Examineur(s) :

Pr .RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostome

Pr RAZANAKA Samuel



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

DEPARTEMENT DES EAUX ET FORETS

Diplôme d'Etudes Approfondies en Sciences Agronomiques

(DEA)

Option Foresterie Développement Environnement

Promotion : FANAMBY

Année : 2011-2012

« Développement d'un système de suivi par télédétection des lavaka » : cas du bassin versant de Sahamaloto, région Alaotra Mangoro.

Présenté par :

RANDRIANASOLO Sylvain Mamy

Soutenu le : 06 décembre 2013

Devant le jury composé de

Président :

Pr. RAKOTOZANDRINY Jean de Neupomuscène

Rapporteur(s) :

Dr RAKOTO RATSIMBA Harifidy

Examineur(s) :

Pr. RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostome

Pr RAZANAKA Samuel

11 10 16AM

REMERCIEMENTS

Ce mémoire a été élaboré grâce à la contribution de nombreuses personnes. L'occasion m'est ici offerte d'adresser mes sincères remerciements à tous ceux qui ont prêté leurs concours dans la réalisation et l'élaboration de ce mémoire. Toute ma gratitude va sans distinction à :

- **Pr RAKOTOZANDRINY Jean de Neupomuscène** qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider ce mémoire malgré ses lourdes responsabilités au sein de l'Université d' Antananarivo.

- **Pr .RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostome** pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être les juges de ce travail et en donnant leurs judicieux conseils pour son amélioration.

- **Pr RAZANAKA Samuel**, qui a voulu examiner ce mémoire et a accepté d'être le jury.

- **Dr RAKOTO RATSIMBA Harifidy**, qui a rendu possible la soutenance de mon travail. Je tiens à souligner l'importance de ses conseils et critiques dans l'accomplissement de cet ouvrage.

- **Pr RAMAMONJISOA Bruno Salomon**, Coordinateur de la formation Troisième Cycle, pour ses conseils durant mes études de DEA à l'ESSA. Qu'il trouve ici l'expression la plus chaleureuse de ma gratitude.

Un grand remerciement à la Direction de l'ESSA, à tous les enseignants et à tout le personnel administratif et technique du Département des Eaux et Forêts, et particulièrement aux enseignants du Cycle DEA en Foresterie, Développement et Environnement, pour les aides et confiance qu'ils m'ont octroyées pendant la préparation de ce mémoire et durant mes études à l'ESSA.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance envers toute ma famille qui m'a toujours soutenu avec beaucoup d'amour et d'encouragement pendant toutes ces longues années d'étude et surtout durant l'élaboration de ce travail.

Je dédie cette mémoire, à mes parents, vos vœux et souhait désormais devenu réalité, toute ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements ;

A toute la famille, à tous mes amis.

RESUME

L'eau fait essentiellement la différence entre un paysage désertique et celui couvert d'une végétation luxuriante. Parfois, la condition climatique notamment l'agressivité pluviale pourrait provoquer des catastrophes comme l'érosion et les mouvements de masse suite au ruissellement. Les problèmes d'érosion sont fréquents en Afrique, mais l'importance relative des différents processus varie d'une région écologique à une autre. Ainsi à Madagascar, l'érosion en nappe est modeste, même sur forte pente, tandis que le ravinement et les mouvements de masse déplacent des volumes considérables de terre arable dans les zones de production agricole. Actuellement, l'étude de développement d'un système de suivi par télédétection des lavaka nécessite l'utilisation des modèles empiriques pour déterminer l'importance relative des masses déplacées et le type d'aménagement anti-érosif à mettre en place sur le site érodé en fonction des paramètres tels que le climat, le sol et la couverture végétale. Tel est le cas du bassin versant de Sahamaloto, qui approvisionne en eau le premier grenier à riz de Madagascar, périmètre irrigué de la plaine de Lac Alaotra, berceau de nombreuses civilisations, le bassin versant de Sahamaloto est affecté depuis longtemps par la dégradation de ses forêts par le surpâturage, la pratique des feux de brousse et de l'exploitation abusive forestière. Cette étude a décrit les démarches et les principaux résultats obtenus comprendront un thème de généralités pour mieux situer l'outil de suivi par télédétection d'un lavaka, afin de donner une précision sur la terminologie utilisée et d'avancer un descriptif sommaire des lavaka ainsi, la clé d'interprétation et de la répartition des lavaka sur le bassin versant a été suivi comme démarche utilisée pour la mise en place d'une base de données à référence spatiale dans un SIG qui sera l'analyse et la méthodologie utilisée pour la réalisation d'une interprétation cartographique des lavaka à partir des images de télédétection afin d'établir une situation générale et d'identifier les facteurs mis en jeu au cours de leur formation, d'apporter des réponses et des éclaircissements aux hypothèses émises en utilisant les méthodes d'interprétation et des données appropriées y afférant.

Mot clé : bassin versant, lavaka, érosion, télédétection, SIG, Sahamaloto, région Alaotra Mangoro

ABSTRACT

Water essentially makes the difference between a desert landscape and the one covered with lush vegetation. Sometimes, conditions climatic notably the pluvial aggressiveness could provoke disasters as the erosion and movements of mass following the ruissellement. Problems of erosion are frequent in Africa, but the relative different process importance varies an ecological region to another. So to Madagascar the erosion in tablecloth is modest, even on strong slope, while the ravinement and movements of mass displace the considerable volumes of arable earth in zones of agricultural production. Currently, the survey of development of a follow-up system by remote sensing of lavakas requires the empiric model use to determine the relative out of place mass importance and the anti - erosive planning type to put in place on the site eroded according to parameters as the climate, soil and the plant cover. Such is the case of the basin pouring Sahamaloto, that supplies in water the first attic to rice of Madagascar, perimeter irrigated of the plain of Lake Alaotra, numerous civilization cradle, the basin pouring Sahamaloto is affected for a long time by the deterioration of his/her/its forests by the surpaturage, the practice of the fires of bush and the forest abusive exploitation. This survey described steps and the main results gotten will understand a theme of generalities to situate the tool of follow-up better by remote sensing of a lavaka, in order to give a precision on the used terminology and to advance a descriptive summary of lavakas so, the key of interpretation and the distribution of lavakas on the basin pouring has been followed like gait used for the setting up of a data base to spatial reference in a SIG that will be the analysis and the methodology used for the realization of a cartographic interpretation of lavakas from pictures of remote sensing in order to establish a general situation and to identify factors put in games during their formation. The survey will end by the typology of lavakas with analysis diachronique of picture satellite and Quickbird picture that will permit to understand the working in lavaka and to propose a method of stabilization adapted in order to limit damages. Of research previous have been led in order to bring answers and enlightenments to the given out hypotheses while using methods of interpretation and the suitable data there relating.

Key words: watershed, lavaka, erosion, remote sensing, GIS, Sahamaloto, region Alaotra Mangoro

FAMINTINANA

Manana ny tombony ny rano amin'ny fikaohana ny riaka ny nofon-tany any amin'ny tany karakaina tsy zavamaniry raha oharina any amin'ny tany rakotra ala maintso mavana. Nefa ny fepetra amin'ny fiovaovan'ny toetr'andro mety mitarika loza goavana sy fahasimban'ny nofon_tany amin'ny fikaohan'ny riaka. Ny olan'ny fikaohan'ny riaka ny nofon-tany aty Afrika dia midadasika arakaraka ny toerana sy ny firenena misy azy .Ny eto Madagasikara kosa ny fikaohan'ny riaka ny nofontany any ambanin'ny tany sy ny tany misopirana dia tsy dia mihetsika firy .amin'ny fitondrana ireo nofon-tany voakaoka mivarina any amin'ireo tanimbary mahavokatra be. Ny fisian'ny lavaka manambara ny fikaohin'ny nofontany eto Madagasikara dia fisehoan-javatra voajanahary nitranga teto ampovoan-tany ela be hatrizay. Ny fampiasana ny sarintany azo avy zanabolana hijerena manokana ny fikaohan'ny ny nofon-tany anaty ala, an-tampontanety no anisan'ny antony lehibe mampihena izay tsy izy ny vokatra vokarin'ny tantsaha malagasy amin'ny ankapobeny. Io fikarohana io dia mampiseho amin'ny endrika samihafa aty amin'ny tany mafana no be orana indrindra ety ampovoan-tany izay miovaova, mahatonga ny fiforonan'ny lavakas sy tevana izay mivoatra eny amin'ny kisilasilan'ny sahandriaka ary anisan'ny mahagaga ireo mpandalina sy mpikaroka ara tontolo iainana taratry ny fivoaran'ny fahasimban'ny sahandriaka izay ampiasaina ny sarintany azo avy zanabolana ity fikarohana ity izay atao ao sahandriakan'I Sahamaloto, avaratra andrefan' ny distrika Amparafaravola izay mampiseho ihany koa ny fiforonan'ny fikaohan'ny nofontany an-tanety amin'ny fampiasana ny teknolojia mifamgaro mba hijerena ny fivoaran'ny lavaka.

Teny famantarana: sahandriaka, lavaka, fikaohana, zanabolana, sarin-tany, Sahamaloto, faritra Alaotra Mangoro

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
RESUME	1
ABSTRACT	2
FAMINTINANA	3
LISTE DES TABLEAUX	6
LISTE DES FIGURES.....	7
ABBREVIATIONS.....	8
I. INTRODUCTION.....	9
II. MATERIELS ET METHODES.....	10
II.1.Problématiques	10
II.2.Hypothèses.....	11
II.3.Approche méthodologique.....	12
II.3.1. Quelques définitions utiles.....	12
II.3.1.1. Définition d'un bassin versant	12
II.3.1.2. Erosion en lavaka.....	13
II.3.2. Caractéristiques des lavaka.....	14
II.3.2.1. Caractéristiques morphométriques.....	14
II.3.2.2. Caractéristiques morphologiques.....	15
II.3.2.3. Définition par typologie des lavaka	17
II.3.3. Classification des images.....	19
II.3.3.1.Données de télédétection utilisées	19
II.3.3.2.Segmentation et extraction des sols nus de l'image.....	21
II.3.3.3.Typologies de l'érosion en lavaka	22
II.3.3.4.Validation de la cartographie à partir des images satellitaires.....	22
II.3.3.5.Cadre opératoire de recherche	23

II.3.4.Limites de travail de recherche.....	24
III. RESULTATS	25
III.1. Typologie des lavaka.....	25
III.2. Identification des lavaka.....	27
III.3. Lavaka, géomorphologie et le Modèle Numérique de terrain (MNT).....	31
III.4. Evolution de dégradation par typologies des lavaka	36
III.5.Facteurs géologiques par typologies des lavaka.....	37
IV. DISCUSSIONS.....	42
V. CONCLUSION	46
REFERENCES	48
ANNEXES.....	I
<i>Annexe 1 : Différentes parties d'un lavaka</i>	<i>I</i>
<i>Annexe 2: Lavaka classique de type cirque ou ravin.....</i>	<i>I</i>
<i>Annexe 3 : Lavaka digité</i>	<i>I</i>
<i>Annexe 4 : Ensablement et l'érosion en lavaka dans la région Alaotra Mangoro.....</i>	<i>III</i>
<i>Annexe 5 : Erosivité dans la région Alaotra Mangoro</i>	<i>IV</i>
<i>Annexe 6 : Situation de l'érosion en lavaka dans la région Alaotra Mangoro</i>	<i>V</i>
<i>Annexe 7 : Extrait de la carte pédologique dans la région Alaotra Mangoro</i>	<i>VI</i>
<i>Annexe 8 : Situation administrative et données socio économique du bassin versant de Sahamaloto</i>	<i>VII</i>

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Stade d'évolution d'un modèle de formation d'un lavaka	19
Tableau 2 : Caractéristiques des images disponibles	19
Tableau 3 : cadre opératoire de recherche	23
Tableau 4 : Classification et occupation du sol (année 1994) avec identification des lavaka	28
Tableau 5 : Classification et occupation du sol (année 2011) avec identification des lavaka	28
Tableau 6 : Classification par typologie des lavaka 1994	36
Tableau 7 : Classification par typologies des lavaka 2011	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Diagramme de la classification basée pixel.....	24
Figure 2: Caractère géomorphologique des lavaka.....	26
Figure 3 : Caractéristiques radiométriques des lavaka (extrait d'image quickbird, 0,5m de résolution)	26
Figure 4 : Caractéristiques radiométriques des lavaka anciens, présence de végétation (extrait d'image Quickbird, 0,5m de résolution).....	27
Figure 5 : Classification et occupation du sol (année 1994) avec identification des lavaka.	29
Figure6 : Classification et occupation du sol (année 2011) avec identification des lavaka.	30
Figure 7 : Modèle Numérique de terrain (année 1994) avec identification des lavaka.....	32
Figure 8 : Modèle Numérique de terrain (année 2011) avec identification des lavaka.....	33
Figure 9 : Carte des pentes (année 1994) avec identification des lavaka	34
Figure 10 : Carte des pentes (année 2011) avec identification des lavaka	35
Figure 11 : Montrant la carte géologique du bassin de Sahamaloto avec typologie des lavaka (1994).....	40
Figure 12 : Montrant la carte géologique du bassin de Sahamaloto avec typologie des lavaka (2011)	41

ABBREVIATIONS

FOFIFA: Foibe Fikarohana momba ny Fambolena

BVPI : Bassin Versant et Périmètre Irrigué

BM : Banque Mondiale

FTM : Foibe Taosarintanin'i Madagasikara

TM : Thematic Mapper

SIG : Système d'Information Géographique

ESSA : Ecole Supérieur des Sciences Agronomiques

ONE : Office National pour l'Environnement

MNT : Modèle Numérique de Terrain

I. INTRODUCTION

Madagascar a été l'un des pays le plus touchés par l'érosion en lavaka engendrant un départ de sédiments d'environ 400 tonnes par hectares et par an. Ce taux peut atteindre dans certains bassins versants 1000 tonnes par hectares et par an (*FOFIFA, 1997*). Par conséquent, l'érosion a été un problème touchant la quasi-totalité des bassins versants malgaches, en particulier ceux des régions montagneuses au centre de l'île. Les pertes en terre, ont été estimées entre 3 à 4 mm/an (*Banque mondiale, 1987*) soient dix fois supérieures à celle de la moyenne africaine (0,5 mm/an) et mondiale (0,4 mm/an). Parmi les diverses formes d'érosion connues, les lavaka sont les plus sévères, laissant des excavations profondes en forme d'éventails sur le flanc des collines. Ils sont particulièrement très abondants, témoignant la dégradation du sol de ces régions centrales de Madagascar. Les lavaka peuvent causer aussi un dégât important dans le paysage de colline et par conséquent, l'enclavement de nombreuses zones à forte potentialité économique. Pendant la période pluvieuse, les pertes en terres et l'ensablement des zones basses ont occasionné fréquemment l'inondation et, peuvent ainsi affecter toute la chaîne de la production rizicole. La maîtrise de l'érosion en lavaka revêt donc une grande importance sur le plan économique. La lutte systématique ne peut pas être menée sans une bonne compréhension de leur mise en place. Cependant, les facteurs intervenant ainsi que les processus de l'érosion suscitent encore beaucoup de question et font l'objet d'interprétations diverses. Le rôle des nappes phréatiques captives et les mécanismes de déclenchement ne sont pas suffisamment connus. De plus la notion de lavaka est encore floue, il semble qu'il y a généralement confusion entre lavaka et ravinement. La plupart des études antérieures n'ont pas abouti à une cartographie régionale des lavaka pour connaître leur répartition spatiale. Afin de comprendre ce phénomène, en particulier sa dynamique et son évolution dans l'espace, il est nécessaire – d'abord aboutir à une définition précise du bassin versant et de combler la lacune tant en terme d'approche que de connaissance pour établir un outil d'analyse et de suivi des lavaka dans un paysage en amont. Puis, il est nécessaire - de cartographier les zones utilisées en aval à partir des images satellites, à l'échelle d'un bassin - pour voir les corrélations entre la carte des lavaka et celles des facteurs supposés. L'approche utilisée a été basée essentiellement sur l'utilisation des données de télédétection dans le cadre d'un système d'information géographique (SIG). La télédétection est actuellement un moyen permettant d'effectuer des observations à la fois précises et sur de grandes surfaces. La diversité des capteurs a permis d'approfondir la connaissance des caractéristiques spectrales et morphologiques des lavaka. La variété des traitements peut faciliter l'interprétation et la compréhension de leur l'environnement. Une part importante des observations se fera donc à l'aide de données de télédétection complétées par des observations précises de terrain et le SIG. Les systèmes d'information géographiques ont constitué un

meilleur moyen de compléter, combiner et comparer les diverses observations issues des données de télédétection.

Cette étude a décrit les démarches et les principaux résultats obtenus comprendront un thème de généralités pour mieux situer le développement d'un système de suivi par télédétection d'un lavaka, afin de donner une précision sur la terminologie utilisée et d'avancer un descriptif sommaire des lavaka. Une étude contextuelle rappelant, la clé d'interprétation et de la répartition des lavaka sur le bassin versant a été suivi comme démarche utilisée pour la mise en place d'une base de données à référence spatiale dans un SIG qui sera l'outil d'analyse et de cartographie employée dans le cadre de cette étude. Il est enchaîné par un thème qui expliquera la méthodologie utilisée pour la réalisation d'une interprétation cartographique des lavaka à partir des images de télédétection afin d'établir une situation générale et d'identifier les facteurs mis en jeu au cours de leur formation. L'étude se terminera par la typologie des lavaka avec l'analyse diachronique d'image satellite et image Quickbird qui permettra de comprendre le fonctionnement en lavaka et de proposer une méthode de stabilisation adaptée afin de limiter les dégâts. Des travaux de recherche préalable ont été menés afin d'apporter des réponses et des éclaircissements aux hypothèses émises en utilisant les méthodes d'interprétation et analyses des données appropriées y afférant. Le présent mémoire comportera les parties suivantes, d'abord la première partie concernera les détails technique de matériels et méthodes, ensuite la deuxième partie qui va présenter les résultats et interprétation des ces recherches et enfin les discussions et recommandations.

II. MATERIELS ET METHODES

II.1.Problématiques

Parmi les formes d'érosion les plus actives, les lavaka, qui sont des formes de ravine, sont les plus spectaculaires et les plus fréquents sur les Hautes terres malgaches. Si la description géomorphologique des lavaka (*Anonyme, 1997*) est relativement bien établie, aucune étude quantitative n'a encore été réalisée et, hormis une valeur estimative et ancienne de la perte en terre (*Bailly, 1976 ; Rakotoson, 1999*), aucun modèle sur leur formation n'est disponible. Leur impact sur les plans social et économique est considérable car les lavaka sont souvent à l'origine de l'ensablement des rizières (*Chabaliér et Rakotomanana, 1996*). Or, le riz constitue la base de l'alimentation des Malgaches et les greniers à riz, comme c'est le cas dans les régions d'Alaotra au centre-est, et le rive Ouest ou de Marovoay à l'ouest de Madagascar, sont particulièrement affectés par ce phénomène. Une étude récente (*Ramerison, 1998*) a montré la valeur très élevée de la perte en terre cultivable dans le lac Alaotra afin de tenter de quantifier les phénomènes d'érosion par les lavaka et de les modéliser pour proposer des mesures correctives. La plupart des études effectuées jusqu'ici sur les lavaka, se sont basées sur l'utilisation des photographies aériennes. Or, la télédétection satellitaire peut

contribuer largement au besoin en matière de répartition des lavaka. Il serait ainsi intéressant d'étudier les possibilités qu'offre l'outil de télédétection à extraire le paramètre lavaka avec des techniques opportunes d'évaluer l'apport d'un couplage entre image Quickbird et imagerie satellitaire Landsat TM pour mieux caractériser le paramètre lavaka. Le recours aux Systèmes d'Information Géographique (SIG) pourra ainsi faciliter l'analyse intégrée des données géoréférencées spatiales qui ont apporté en effet des informations riches, précises et à jour parmi ces études en a fait référence. Cette étude se présente ainsi comme une opportunité d'examiner le potentiel des méthodes d'interprétation de télédétection combinées avec celles d'un SIG pour évaluer et modéliser le processus d'érosion en lavaka. C'est dans ce sens que la recherche a été amenée à poser la problématique. ***Comment mettre en place un système de suivi de l'évolution des lavaka par télédétection au niveau du bassin versant de Sahamaloto ?***

II.2.Hypothèses.

Les lavaka sont des formes d'érosion très répandues à Madagascar, témoignant de la dégradation du sol dans les Hautes terres Centrales de Madagascar-. Pendant la saison des pluies, il y a eu destruction du paysage et les sédiments provenant de l'érosion provoquent l'ensablement des rizières et des infrastructures hydrauliques. Un rapport de *la Banque Mondiale (1987)* a souligné la gravité des dégâts dus aux lavaka sur le plan socio-économique. La réduction des surfaces rizicoles risque de compromettre l'autosuffisance alimentaire de Madagascar et d'accentuer la pauvreté. Les facteurs intervenant ainsi que les processus de l'érosion sont encore mal connus et font l'objet d'interprétations diverses (*Besairie, 1952; Lautel, 1952 ; Brenon, 1952; Riquier, 1954; Petit et al., 1965 ; Raunet, 1984 ; Andriamampianina, 1985 ; Wells ,1991 ; Raharijaona , 1999; Roose ., 2000*). Il est clair que ce sont les sols à carapace épaisse qui sont érodés, sous l'effet de facteurs déclenchant dans les versants à pentes fortes. La plupart des études antérieures ont été limitées à l'identification des lavaka et n'ont pas établi de cartographie régionale pour en connaître la répartition spatiale (*Riquier, 1954; Wells, Andriamihaja et Rakotovololona, 1991*).

Les paramètres physiques d'un paysage du bassin versant déterminent la genèse d'un lavaka. Les conditions géomorphologiques, géologiques, climatiques, hydrologiques et la végétation sont alors primordiales à considérer dans la présente étude. D'autres paramètres ont pu entrer en jeu, telles les caractéristiques des sols ou l'action d'un agent érosif. En ce sens, l'action anthropique ne peut être négligée. Il est alors primordial de démontrer les possibilités qu'offre les méthodes de télédétection, avec celles d'un SIG pour étudier le processus d'érosion en lavaka .L'observation a été faite sur les imageries satellitaires Quickbird qui a montré la plus forte concentration en lavaka qui est une source d'informations précieuse dans le cadre de travaux de recherche sur l'érosion. Dans ce sens, l'hypothèse suivante est émise :

Hypothèse 1 : L'observation par des images de télédétection à moyenne résolution et haute résolution permet de voir l'évolution des lavaka. Des possibilités sont offertes par les images du capteur TM et Quickbird, bien que seuls les lavaka d'une certaine dimension soient visibles sur les images. Divers traitements sont toutefois nécessaires, telle la fusion des canaux pour une meilleure résolution spatiale. Ce qui amène l'auteur à poser :

Hypothèse 2 : Les facteurs topographique et géologique ont une influence sur l'évolution des lavaka. La topographie a aussi joué un rôle prépondérant dans l'étude de l'érosion qui est à l'origine de la concentration ou la diffusion de l'écoulement superficiel. De plus, l'inclinaison du versant peut modérer ou accélérer la vitesse de l'écoulement. L'eau de ruissellement est plus active lorsqu'elle acquiert une vitesse plus grande. Or, cette vitesse croît avec la raideur de la pente. Plus une pente est raide, plus le terrain est sensible à l'érosion superficielle. Un terrain à pente faible perd moins de matériaux au cours d'une averse. Les collines convexes et les versants restent le théâtre de l'érosion en lavaka qui paraît aujourd'hui très active. La courbure d'une pente dépend à la fois de la géologie du terrain et au paléoclimat qui régnait dans la zone. Le granite et la migmatite se présente sous formes de colline à pente plus ou moins rectiligne avec l'affirmation de dénivellation avec les niveaux de base actuelle (bas fonds, plaines).

II.3. Approche méthodologique

Avant d'entamer les travaux de recherche sur l'évolution de dégradation sur l'érosion en lavaka, il a été indispensable de connaître au préalable quelques définitions utiles qui concerne l'origine, du terme, « bassin versant », « lavaka » ainsi que les définitions équivalentes dans la littérature afin d'éviter toute confusion.

II.3.1. Quelques définitions utiles

II.3.1.1. Définition d'un bassin versant

D'après *Krôner, 1991*, la définition d'un « *bassin versant* » a changée selon qu'il s'intéresse à l'eau de surface ou à l'eau souterraine. Toutefois, ces deux compartiments du cycle de l'eau sont pris en compte dans la gestion intégrée de l'eau par bassin versant, étant donné qu'ils sont intimement liés. Le but est de définir le concept de bassin versant dans le contexte de la gestion intégrée de l'eau, d'expliquer les nombreuses fonctions qu'il assure et en quoi il constitue l'unité naturelle pour planifier la gestion de l'eau et des écosystèmes associés.

En hydrologie, le terme « *bassin versant* » (ou bassin hydrographique) a désigné le territoire sur lequel toutes les eaux de surface s'écoulent vers un même point appelé exutoire du bassin versant *Itongo (M), 1998*. Ce territoire est délimité physiquement par la ligne suivant la crête des montagnes,

des collines et des hauteurs du territoire, appelée ligne des crêtes ou ligne de partage des eaux. L'homologue souterrain du bassin versant est appelé bassin versant souterrain. Il désigne la zone dans laquelle toutes les eaux souterraines s'écoulent vers un même exutoire ou groupe d'exutoires. Par conséquent, en gestion intégrée de l'eau, le bassin versant est défini non plus seulement comme une surface, mais comme un volume d'espace. Il comprend non seulement le territoire sur lequel toutes les eaux de surface s'écoulent vers un même exutoire, mais aussi tout ce qu'il contient, c'est-à-dire les eaux de surface, les eaux souterraines, les sols, la végétation, les animaux ainsi que les humains.

Plus l'exutoire d'un bassin versant est situé en aval sur une rivière, plus le bassin versant qui s'y rapporte est grand. De plus, un bassin versant englobe nécessairement la totalité du bassin versant (sous bassin) qui alimente un point quelconque situé dans le premier bassin versant. Les bassins versants sont ainsi imbriqués les uns dans les autres, depuis l'amont du bassin versant de la rivière Sahamaloto divisé en deux principaux sous bassins selon l'axe amont aval (Haute Sahamaloto, et Basse Sahamaloto). Chaque tributaire d'une rivière a un bassin versant qui lui est propre, lequel constitue un sous bassin du bassin versant de la rivière en question.

Dans cette étude, la définition d'un bassin versant suivante est adoptée comme délimitation naturellement de paysage muni de ligne de crête en amont succédé par la topographie en aval accompagné de l'exutoire.

II.3.1.2. Erosion en lavaka

L'origine du terme a été dans la langue malgache et vient de la racine sanscrite Lu qui signifie diviser, détruire, annihiler. Lu est devenu lava, lavaka signifiant l'action de couper, de découper, de mettre en morceaux (*Dama-Ntsoa, 1951*). C'est un concept reconnu en géomorphologie. La traduction française peut être trou, fosse, creux, cavité, excavation (*Flacourt, 1907*), mais il est préférable de garder en français le terme d'origine lavaka considéré comme masculin, invariable.

Diverses définitions du terme ont été proposées : « Ce sont des ravinelements violents, formes beaucoup plus déchiquetées, plus âpres, blessures où la roche apparaît vif, viennent s'imprimer dans les formes plus amples, sur une entaille de plusieurs dizaines de mètre dans le versant, liées à l'érosion naturelle » (*Tricart, 1953*). « C'est un nom malgache qui désigne une grande excavation en forme de cirque, creusée dans le flanc d'une colline provient d'une exagération du processus d'érosion en ravins ou gully érosion des Américains » (*Riquier, 1954*). « C'est un type de ravinement linéaire, creux jusqu'au contact de la roche saine » (*Dresch, 1962*). « C'est une dépression ouverte, forme voisine des niches d'altération ou de tête de vallon » (*Bourgeat, 1972*).

« Ce sont des ravins de 10 à 30 m de profondeur, très élargis en amont, rétrécis en aval, à parois supérieures verticales et disséquées en badlands à l'intérieur, localisés sur des versants convexes et à fortes dénivelées et affectant les épaisses altérations argilo-sableuses gorgées d'eau à leur base » (*Raunet, 1984*). « Les lavaka de Madagascar, le voçorocas de Brésil sont des ravines développées

dans une couverture d'altérites compactes, avec versant abrupt évoluant aussi par sapement, écoulement et solifluxion » (*Georges, 1990*).

D'après ces quelques définitions, le terme de lavaka semble recouvrir plusieurs formes sensiblement différentes les unes des autres (ravins, ravines, badlands, érosion régressive, cirque, solifluxion etc.). Cette imprécision est la source de confusions à l'usage du terme dans la littérature. Plusieurs définitions font appel au concept de ravin et de ravinement dont il nous semble indispensable d'en rappeler brièvement leur définition.

Voici donc une définition de lavaka considérée dans cette étude, une sorte de ravin profond, élargi (50 à 300 mètres) en poire en amont, très rétréci en aval, où l'exutoire est souvent réduit à un très mince et profond goulot d'un mètre de large. (lavaka = forme de grand trou sous forme de plaie qui attaque le paysage d'un bassin versant quelconque, équivalent d'un épiderme : bassin versant de surface ; derme : nappe phréatique).

II.3.2. Caractéristiques des lavaka

Le "lavaka" a pu prendre différentes formes selon les paramètres du terrain. Les paramètres déterminant sont généralement la propriété physico-chimique du sol et la topographie du terrain.

II.3.2.1. Caractéristiques morphométriques

Les lavaka ont pu faire plusieurs dizaines de mètres de profondeur pour une largeur et une longueur de plusieurs centaines de mètres (*Brenon, 1953*). Les plus nombreux sont toutefois les 'petits' lavaka mais des lavaka dont le volume fait 500 000 m³ sont, selon l'auteur, des cas communs peuvent atteindre des dimensions difficilement imaginables pour qui n'en aurait jamais vu : jusqu'à 300 mètres de largeur et deux kilomètres de longueur. Dans la synthèse des travaux menés à Madagascar sur l'érosion en 1953, *Tricart* rapporte, à propos des travaux de *Riquier et Brenon*, que les dimensions des lavaka sont en fait très variables : certains, récents, n'ont que quelques mètres de profondeur et une dizaine de mètres de longueur. L'ordre de grandeur rencontré le plus souvent est de 150 à 200 mètres de long, 100 à 200 mètres de large avec une dénivellation de 30 à 40 mètres.

Helisoa en 1983 a entamé sur des zones-témoins à Ambatondrazaka, à partir des cartes et des prises de vues aériennes au 1/10 000, les premières mesures systématiques de lavaka. Quatre facteurs morphométriques ont été pris en compte : la longueur, la largeur, la superficie et la profondeur des lavaka. Cette dernière mesure est en fait une estimation, établie d'abord avec une barre de parallaxe mais ces premiers résultats ont été entachés de fortes inexactitudes car la mesure concerne de petites profondeurs. Cette caractéristique a donc été estimée en fonction de quelques repères sur les prises de vues aériennes (une case représentant environ 3 mètres, un eucalyptus, une dizaine de mètres...). Ainsi

les volumes d'ablation (en m³), le taux d'ablation (m³/m²) et la hauteur d'ablation annuelle (m/an), développés dans la partie dynamique érosive.

II.3.2.2. Caractéristiques morphologiques

Riquier et Segalen en 1948, 1949 ont expliqué la forme caractéristique des lavaka par la composition du sol. Ils distinguent d'une part, les lavaka sur gneiss qui ont des parois verticales à cause de la présence d'argile de type kaolinique favorable à la formation de fentes de dessiccation et, d'autre part, les lavaka sur basalte qui n'ont pas de parois verticales, en pente douce et avec des talus inclinés. Le creusement se fait alors par de multiples rigoles et l'érosion n'en est pas moins intense. Ils expliquent cette différence par le fait que la structure du sol est plus meuble que sur les gneiss et que la zone de départ est beaucoup moins épaisse.

Selon **Brenon 1952** les lavaka sont définis comme des cavités ovoïdes, à parois verticales dont le fond se raccorde au goulot de sortie selon une pente sableuse douce. Il est prolongé par un cône de déjection suivi d'un canal qui concentre les eaux du lavaka et qui se situe souvent dans un lit souvent encaissé de un à deux mètres. Les évolutions morphologiques des lavaka peuvent être très variées selon l'épaisseur des argiles latéritiques, leur perméabilité (qui dépend de leur nature), des conditions climatiques et du modelé initial où ils se développent.

« La multiplication des lavaka sur un versant provoque des recoupements et l'apparition d'une sorte de concurrence pour les eaux souterraines. Les lavaka les plus déprimés, parfois grâce à un abaissement du front de latéritisation, capturent la nappe et peuvent se développer plus rapidement, tandis que l'arrêt des processus de soutirage peut provoquer la stabilisation des lavaka voisins». (**Tricart, 1953**).

D'après les travaux de **Brenon et Guigues 1952**). Il est important de souligner que les aspects dimensions, processus et vitesse d'évolution sont intimement liés, même si pour des raisons didactiques on les appréhende séparément.

Riquier (1954, 1958), le profil transversal des lavaka est en V ou en U selon son stade d'évolution, la vitesse de déblaiement des matériaux ou encore la présence ou non d'une source.

C'est lui qui en premier tente une classification des lavaka :

- d'après leurs formes en plan : elles peuvent être bulbeuses, dendritiques, composées, ovalaires ou encore en éventail ; ces caractéristiques de forme les différencient bien des ravines qui sont linéaires, parallèles ou ramifiées).
- d'après leur forme selon un profil transversal.

Il ajoute en 1958 que c'est la topographie initiale et/ou la cause initiale qui décidera de la forme du lavaka : s'il se développe dans une tête de vallée en hémicycle, ou s'il prend naissance dans une dépression, le lavaka évoluera en éventail ; si le départ du lavaka se fait à partir d'un sentier le long d'une crête, il aura une forme plus linéaire.

La diversité des formes de lavaka observées ainsi que leur juxtaposition sur les versants rend l'analyse complexe.

Le Bourdieu (1972) distingue deux types : les lavaka élémentaires et les lavaka composés.

- Les premiers ont une forme allongée avec un exutoire plutôt étroit et un cône de déjection plat, où se sont déposés les éléments sablo-argileux. Selon **Guigues (1951)** ces formes se subdivisent encore en deux sous-catégories : les lavaka semi-fermés dont la base ne communique pas avec le bas du versant –il lui est relié par une ravine – et les lavaka ouverts où la base est au niveau du fond de vallée et de même largeur que sa tête. Ces derniers semblent dus à un glissement au bas du versant, résultat d'un sapement par un cours d'eau.

- Les lavaka composés sont en général plus large et plus complexe que les lavaka élémentaires ; leur forme ramifiée est liée à la juxtaposition de deux ou plusieurs lavaka élémentaires. Ce sont d'énormes cirques avec une forme bien définie, l'imbrication peut se faire soit par les cotés soit à l'extrémité du versant. C'est le cas le plus fréquent à Madagascar, notamment à l'est et à l'ouest du lac Alaotra dans ce secteur faillé.

Guigues et Riquier signalent des murs verticaux entre les lavaka coalescents ; ceux-ci sont appelés à disparaître. Il semble que ces lavaka se développent selon les mêmes processus que les lavaka élémentaires. La seule différence est la grande vitesse à laquelle ils se forment puisqu'ils sont souvent dans des zones vulnérables (grande épaisseur des argiles d'altération), ainsi que leur grande taille puisqu'il y a davantage d'eau de ruissellement dans le relief en creux.

Helisoa en 1983 a travaillé sur des zones témoins de façon très précise. Ont été étudiés la fréquence et la dimension des lavaka en fonction de la nature du substrat, le rôle de la pente dans la répartition de ces formes ; une typologie des modes et formes d'évolution a également été réalisée, ainsi que des taux d'ablation en volume de matériaux.

Elle définit trois formes caractéristiques de lavaka déterminant une typologie :

- les lavaka élémentaires, possédant (lavaka à mi-versant) ou non (lavaka de bas de versant) un chenal d'évacuation, qui évoluent principalement en longueur ; ils peuvent être soit, de forme classique (longiligne et massive), soit, de forme moins généralisée avec deux chenaux,
- les lavaka coalescents ou composés, dont l'évolution se fait préférentiellement de façon latérale, et les lavaka adossés (qui ont atteint la ligne de crête),
- les lavaka digités qui peuvent résulter de l'évolution de lavaka élémentaires..

Les trois types de lavaka décrits par **N.A. Wells, B. Andriamihaja**, ont les caractéristiques de forme suivantes :

- Les lavaka 'toe-slope', de bas de versant, sont plus larges à l'exutoire que les autres types de lavaka. Ils ont un fond plat raccordé au niveau de base de la vallée principale. Leurs bords sont très pentus et ils peuvent être multilobés.

- Les lavaka 'mid-slope, sur un point particulier du versant, ont une forme générale en coeur ou en larmes. Ils sont larges à l'amont et étroits à l'aval. Ce type de lavaka représente 80 à 96 % des lavaka rencontré à Madagascar.

- Les lavaka 'valley-forming', qui se développe sur l'ensemble du versant, sont plus rares. De manière générale, ils sont plus longs que les autres types de lavaka ; ils peuvent être à la fois droits ou sinueux, étroits ou plus larges.

Toutefois, une combinaison de ces formes s'observe aussi sur le terrain : des lavaka adjacents peuvent devenir coalescents, soit par leur tête, soit de façon latérale. Lorsque les lavaka sont très grands, il est alors difficile de reconnaître les formes originelles. Par ailleurs, ces formes évoluent selon le stade de développement des lavaka. Le ratio largeur de la tête du lavaka et largeur maximale reste assez constant, ce qui montre que le lavaka se développe en premier lieu dans leur partie supérieure, de façon disproportionnée par rapport à la partie inférieure

Les lavaka mid slope représente morphologiquement en général dans le bassin versant de Sahamaloto.

II.3.2.3. Définition par typologie des lavaka

Les lavaka à l'état actif : par définition sont des phénomènes en cours de progression vers l'amont de la colline avec peu de végétation qu'ils sont caractérisés par la présence d'un talus instable, par des traces de mouvements de masse récents et par des indices d'approfondissement progressif de l'enceinte du lavaka. Le recul vers l'amont de la colline est estimé entre 0,5 et 10 m/an (**Brenon, 1952, Dresch, 1962**). Des ravins vifs dus au ravinement entaillent le plancher et les parois.

Les groupes ou associations de lavaka actifs sont des formes de recoupement résultant du développement de plusieurs lavaka. Sur des versants constitués d'une épaisse couche d'altération gorgée d'eau à leur base, leur multiplication provoque une concurrence au captage des eaux souterraines. Ainsi, plusieurs scénarios d'interaction sont possibles en considérant le niveau initial des lavaka par rapport au niveau instantané de la surface piézométrique. Il naît ainsi une variété de formes, allant d'une forme multilobée à un système très complexe composé de plusieurs lavaka.

Les lavaka avec végétation : sont stabilisés ou en cours de stabilisation lorsqu'il y a arrêt du sous-tirage, tarissement des sources et dénudation de la roche saine au fond du lavaka en état apparent d'inactivité, mais ils peuvent être réactivés par un changement des conditions du terrain sous l'effet des précipitations, de séismes ou de modification de surface de terrain par les activités biologiques notamment anthropiques. Ainsi le cycle recommence, le lavaka passe d'un état de stabilité précaire à l'état actif et ainsi de suite, jusqu'à l'arrêt complet de toutes activités.

. L'enceinte des lavaka passe d'un état de ravinement généralisé à l'état très peu raviné. Le comblement de l'enceinte du lavaka s'effectue en plusieurs étapes :

- colmatage des creux à très faible pente par décantation des boues et de sables fins en suspension dans l'eau ;
- remblaiement du chenal par des matériaux abandonnés par le courant ;
- obturation de l'exutoire ou exhumation de la roche saine ;
- étalement des sédiments sur l'ensemble de l'enceinte.

La stabilisation s'accompagne d'une colonisation progressive de la végétation sur les diverses parties des lavaka avec des taux d'occupation très différents en fonction des parties considérées (**Hoeblich, 1984**). Sur les parois verticale, le taux de recouvrement est faible (2%) et la couverture végétale est formée essentiellement des graminées et des lichens. Les éboulis et les rebords des chenaux d'écoulement constituent une zone de colonisation peu dense (30%). Les différentes espèces herbacées et ligneuses forment des broussailles dans l'enceinte des lavaka. Le cône de déjection des lavaka a un recouvrement végétal très important (80%). La végétation constitue une sorte de bouchon à la sortie du chenal, ce qui modifie l'équilibre des pentes en favorisant le stockage de sédiments à l'intérieur de l'enceinte. La rétention des sédiments et l'obturation de l'exutoire accélèrent le comblement de l'enceinte et le relèvement du niveau de base .Il en résulte le ralentissement et l'arrêt définitif du creusement avec l'adoucissement de la pente. Le caractère vif des parois s'estompe progressivement et le lavaka est noyé par des dépôts détritiques. Les eaux de ruissellement, faute de pente suffisante, ne sont plus capables d'évacuer les matériaux entassés à l'intérieur de l'enceinte, ce qui provoque finalement le colmatage de l'enceinte du lavaka. Les lavaka stabilisés sont caractérisés par leur profil longitudinal en gradins avec des parties surcreusées concave alternant avec des ressauts. Ils tendent vers l'équilibre dans chaque section comprise entre deux rapides. Ce profil d'équilibre se conserve très longtemps tant qu'il n'y a pas intervention d'un facteur favorisant la reprise de l'érosion.

Les lavaka anciens sont tous stables dus à un équilibre dynamique naturel ou artificiellement créés par des travaux de stabilisation mécanique ou biologique .En effet, les différentes méthodes de datation donnent une estimation d'âge comprises entre 8000 et 35000 **ans** (**Aubert, 1970 ; Bourgeat et Ratsimbazafy, 1975**). La palynologie a donnée des âges compris entre 6000 et 8000 ans (**Randriamanantanenina, conférence 1985**). Les lavaka sont donc tous du Quaternaire récent. Au stade de stabilisation totale, les lavaka sont pratiquement vidés de leur matière rocheuse, réduits à des parois de faible hauteur (parois latérales), de pente douce, et le bassin de réception insignifiant. Ils se présentent comme une large dépression à fond arrondie avec une parfaite symétrie (profil en auge), en dehors des irrégularités locales. L'eau peut s'écouler normalement, mais ne peut, ni creuser, ni transporter des matériaux. Ils ont une forme en plan assez caractéristique avec une petite plaine centrale plate, souvent cultivée en riz, de forme quasi circulaire, avec un exutoire.

Tableau 1 : Stade d'évolution d'un modèle de formation d'un lavaka

Stade d'évolution	Stade à l'état actif	Stade à l'état stabilisé	Stade ancien
Sous tirage	Intense	Peu ou nul	Nul
Mouvement de masse	Successif complexe	Quelque éboulement	Nul
ravinement	Creusement	Abondant	Très peu
Profil longitudinal	Complexe	En escalier à régulier	Régulier
Apport en sédiment	Maximal	Modéré presque nul	Très peu
Evolution des parois	rapide	lente	Nulle
exutoire	Creusement	Réduite	Etroite
Couvert végétal	Peu de végétation	Végétation dense	rizières

II.3.3. Classification des images

II.3.3.1. Données de télédétection utilisées

Le problème a été de savoir quels types d'images satellite de télédétection à utiliser pour obtenir une bonne cartographie des lavaka. Pour ce faire, ils ont besoin de faire la comparaison des images de lavaka de tailles et d'orientations différentes, dans différents contextes, afin d'extraire des données à la disposition. Certaines images ont été associées ou traitées (composition colorée, recherche des surfaces nues par l'indice de brillance du sol). Les données satellitaires utilisées sont décrites dans le tableau ci après.

Tableau 2 : Caractéristiques des images disponibles

Type d'image	Date d'acquisition	Heure d'acquisition	Type de capteur	Nombre de canaux	Niveau de correction géométrique	Tachèle
Landsat	14 /12/94	06 :05 :38	TM	7	1G	30
	26/10/11	06 :39 :52	TM	7	1G	30
Quickbird	2004	06 : 25 : 34	HR	4	2G	0,5

Les images TM de Landsat sont acquises vers 6 h 30 et la géomorphologie est bien marquée par les ombres. Cependant, la tachèle à 30 m n'est pas suffisamment précise pour observer des détails,

notamment les petits lavaka. Les images satellite Quickbird, à tachèle de 0,5 m, améliorent sensiblement la résolution spatiale. Ces images couvrent de vastes surfaces à moindre coût, et l'échantillon des lavaka cartographiés paraît suffisamment représentatif pour chercher des corrélations avec d'autres données. C'est la raison pour laquelle a été choisie d'effectuer la cartographie à l'échelle régionale à partir des images Quickbird. Les lavaka s'expriment sur les images satellitaires par un aspect de creux. L'expression géomorphologique dépend de l'orientation des parois par rapport aux capteurs, de l'angle d'incidence et de la luminosité

D'après **Puech., (2005)**, en utilisant de l'imagerie de télédétection, les éléments de caractérisation de l'érosion sont principalement acquis à partir des données optiques. La tendance actuelle vise à l'amélioration des résolutions spectrales des capteurs. L'analyse des formes est basée sur la reconnaissance par objet.

Un retour vers la prise de vue aéroportée pour la reconnaissance et l'analyse des formes est donc recommandée. **Bonn., (1992)** préconisent l'extraction des fractions de sols nus par une analyse en convolution spectrale. Dans cette étude la classification automatique est appliquée dans le modèle numérique de terrain, est privilégié aussi dans la cartographie de dégradation dans le bassin versant de la Sahamaloto pour tester une expérience nouvelle en matière de vectorisation de l'image. Tout d'abord, l'extraction, à partir d'une image satellite TM avec une fenêtre de travail correspondant aux limites du bassin versant de la Sahamaloto a été procédée. Comme cette image est déjà ré-échantillonnée à 30 m, aucun autre prétraitement n'a été nécessaire. Seules les trois bandes spectrales TM3 / B, TM4 / V et TM5 / R ont été conservées, car elles étaient les seules bandes disponibles. L'image de TM du bassin a ensuite été importée dans ENVI 4.3, puis géopositionnée à partir de quatre points de contrôle localisés sur la carte topographique (**Bonn., 1992**). La classification est l'opération qui permet de saisir automatiquement les sols nus dans la zone d'étude sans passer par la reconnaissance visuelle des zones érodées en lavakas ni la numérisation à l'écran. Deux catégories de classification ont été utilisées dans cette étude. La classification non supervisée a été appliquée pour avoir des éléments de référence à l'analyse et la classification supervisée pour le traitement numérique de l'image.

Classification non supervisée

La classification a débuté par l'observation des bandes brutes. Ils ont ensuite élaboré plusieurs compositions colorées pour sélectionner celle qui offre le plus de contrastes. Le rehaussement de l'image a été obtenu à l'aide d'un étalement dynamique afin de mieux conserver la répartition des valeurs radiométriques dans l'intervalle de 0 à 255. Au lieu d'une analyse en déconvolution spectrale qui aurait pu être efficace (**Bonn., 1992**), le logiciel a préféré de calculer l'indice de végétation normalisé (Normalized Difference Vegetation Index) avec les bandes spectrales TM3 et TM4 pour

faire ressortir l'érosion. Une image en valeurs réelles transformée pour afficher les NDVI en noir et blanc suivant 256 niveaux a été ainsi obtenue. L'indice de végétation fait ressortir deux classes d'objet : sol et végétation. Les sols sont représentés par des valeurs proches de 0 et les couvertures végétales par des valeurs comprises entre 0 et 1, en fonction de leur densité et de la catégorie de couvert. Mais, ce sont encore les bandes brutes améliorées qui donnent les meilleurs contrastes. La composition colorée à 8 bits : TM3B / TM4V et TM5R, soit 215 couleurs a été ensuite créée. Celle-ci fait ressortir la végétation (essentiellement des plantations) en vert ou en jaune, en fonction de la densité et du stade phénologique des catégories de couvert. Plus ils sont secs, plus les sols nus ressortent en rouge à cause de leur forte réflectance dans toutes les bandes spectrales et ce, principalement, dans le moyen infrarouge.

Ensuite, le comportement radiométrique des surfaces de la composition colorée afin de définir leur signature spectrale, sachant que, dans l'image, la valeur de réflectance des sols nus varie entre 29 et 182 dans TM5R a été étudié. L'analyse radiométrique a été réalisée en créant un lien interactif entre la composition colorée et les bandes brutes. ENVI 4.3 classe les objets de l'image et les regroupe en populations identiques en fonction des pics. Suivant la finesse du niveau de généralisation, ENVI 4.3 affiche 5, 7 ou 21 classes. Ces classes ont été analysées et comparées à la composition colorée en vue de leur identification. Puisque toutes les classes n'ont pu être identifiées, six ont été retenues (forêt, savane, culture, rizière, sol nu et ombre) et ont été servies de base pour la nomenclature de la classification supervisée.

Classification supervisée

Les parcelles d'entraînement ont été délimitées en fonction de leur uniformité locale apparente. Leurs tailles sont petites, de l'ordre de 30 pixels de côté en moyenne, car l'image présente des unités peu étendues et variées. Le choix des zones d'entraînement a été effectué en fonction des données de référence fournies par la classification non dirigée, par des plages de couleurs suffisamment uniformes, par des objets identifiés sur le terrain et par l'interprétation visuelle de la composition colorée. Les classifications barycentrique et par maximum de vraisemblance ont été testées. La classification par maximum de vraisemblance considérant que toutes les classes ont une probabilité a priori identique et présentant des résultats proches de la réalité a été retenue.

II.3.3.2.Segmentation et extraction des sols nus de l'image

Différentes couches vectorielles (contour du bassin versant, sols nus) ont été générées dans ArcMap 9.2. Entre autres, le contour du bassin versant de la Sahamaloto a permis la localisation de la zone

d'étude sur les images traitées. La suite des traitements visait à extraire les sols nus parmi lesquels on espère trouver les zones érodées. Pour isoler la classe des sols nus, dans laquelle figure les lavakas, les manipulations ont été effectuées dans ENVI 4.3 en deux étapes - l'application d'un masque sur l'image classifiée- la création d'une image en noir et blanc. Tout d'abord, première étape l'application d'un nouveau plan sur lequel est classifiée par la segmentation de l'image. Cette image en suivant la limite du bassin versant est masquée. Deuxième étape la création d'une image en noir et blanc. Le détails du processus consisté à créer un nouveau plan matriciel. À toutes les classes d'objet autres que « sols nus », la tonalité noire de valeur 0 et aux sols nus la tonalité blanche de valeur 1 ont été appliquée. Une image classifiée et filtrée en noir et blanc a obtenue qui ne laisse apparaître que les sols nus. L'image résultante a été vectorisée dans ENVI 4.3. Une nouvelle image en noir et blanc dans laquelle les limites des sols nus sont des polygones et les surfaces de sols nus, des régions multipolygones auxquelles sont associées des données attributs est ainsi obtenues. Au total, 269 polygones, y compris la limite du bassin versant et celle de l'image de TM, ont été vectorisés.

II.3.3.3. Typologies de l'érosion en lavaka

La carte représentant les sols nus vectorisés a été superposée dans ArcMap 9.2 au fond topographique à 1 / 50 000 ème. En fonction de la topographie, les sols nus peuvent correspondre soit à des alluvions sableuses dans le lit des cours d'eau, à des chemins, ou à des lavakas parmi lesquels on a pu distinguer quatre classes. En s'aidant de la carte topographique, tous les polygones de sols nus représentant les alluvions sableuses des cours d'eau ou les chemins ont été effacé, pour ne garder que les lavakas. La carte finale des sols nus a obtenue qui représente les catégories de lavaka du bassin versant de la Sahamaloto. À l'aide d'ArcMap 9.2, les différentes propriétés de chaque classe de lavaka sont affichées. Ensuite, la mise à jour des colonnes attributs en ajoutant un nouveau champ « surface » afin d'enregistrer les surfaces correspondant à chacune des catégories de lavaka a été effectuée pour procéder l'analyse thématique de l'érosion.

II.3.3.4. Validation de la cartographie à partir des images satellitaires

Depuis une vingtaine d'années, la télédétection spatiale a été appliquée dans divers domaines : suivi de la végétation, détection des lavaka et mesure de la dégradation forestière (*Achard., 2002*), amélioration de la carte géologique. Parallèlement avec la mise a disposition des données de télédétection, l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) s'est considérablement répandue (*Tsayem , 2002*). Pour évaluer la validité de la cartographie à l'aide des images satellitaires, une carte de référence à partir des cartes topographique à l'échelle 1/50 000 ème a été établi. Pour mieux cerner, la différence entre les lavaka anciens et actifs, qui a distinguée des formes

intermédiaires - lavaka stabilisés avec des végétations en partie réactivés - et ajouté des ravinelements et des formes intermédiaires entre lavaka et ravinement. L'identification est basée principalement sur la pente, la hauteur des parois et la largeur du plancher. En raison de la difficulté à mettre dans une même géométrie les cartes de la zone d'étude faites respectivement à partir des images satellitaires, des échantillons pris au hasard ont travaillé. La comparaison de ces objets tels qu'ils se présentent sur les différentes images et tels qu'ils peuvent être cartographiés. Les données satellites, pour être exploitables, nécessiteront des traitements préalables visant à les rendre conformes à une projection cartographique donnée. Enfin les enquêtes socio-économiques et les relevés de terrain compléteront l'analyse. Ainsi, la méthodologie mise en œuvre comporte les étapes principales : Les traitements préliminaires, la classification des images et la production des cartes. Avec l'utilisation des images satellites Quickbird qui a permis d'identifier et de numériser les typologies des lavaka au niveau du bassin versant de Sahamaloto. Les informations sont gérées également par les logiciels SIG ArcMap, Arcview, ENVI, afin d'accompagner le croisement des données vecteurs (superpositions des couches d'informations) repérés dans le même système de coordonnées. **(Figure 1)**

II.3.3.5. Cadre opératoire de recherche

Tableau 3 : cadre opératoire de recherche

Question	Hypothèses	Indicateur	Méthodologie
Comment mettre en place un système de suivi de l'évolution des lavaka par télédétection au niveau du bassin versant de Sahamaloto ?	L'observation par des images de télédétection à moyenne et haute résolution permet de voir l'évolution des lavaka	La dimension par typologies des lavaka constatés	Analyse thématique des cartes
	Les facteurs topographique et géologique ont une influence sur l'évolution des lavaka	Les facteurs observés sur carte et sur terrain	Superposition des couches topographique et géologiques avec les lavaka

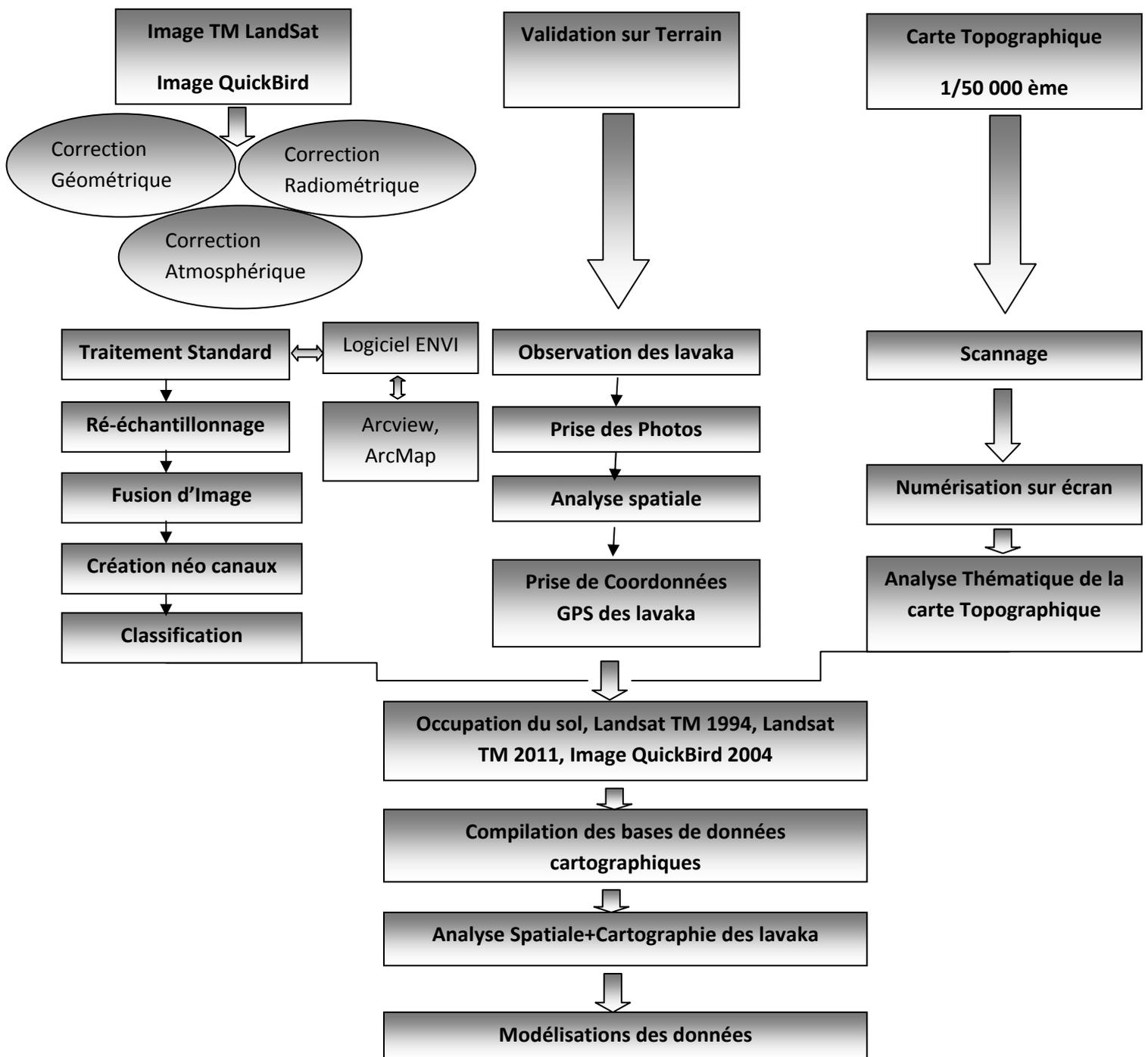


Figure 1: Diagramme de la classification basée pixel

II.3.4.Limites de travail de recherche

. D'un point de vue méthodologique, l'utilisation de deux images satellites différentes Landsat TM et Quickbird pour vérifier la typologie des lavaka ont montré des avantages et inconvénients durant l'analyse et l'interprétation. Pour l'image satellite Quickbird a été une résolution de 0,5m près dans les bandes spectrales. Ceci a montré que pour obtenir une meilleure précision, il a été préférable d'utiliser

l'image Quickbird dans les différents travaux d'analyses spatiaux. Toutefois, le traitement des images à très haute résolution n'est pas évident, il vaut mieux procéder à la numérisation de l'image pour avoir un résultat dans le domaine de classification des lavaka. Pour l'image satellite de capteur TM, des possibilités aussi sont offerts bien que seuls les lavaka d'une certaines dimensions globales soient visibles sur les images.

Mais en général, pour l'interprétation des images satellites, il a été très difficile de cerner la visualisation et des précisions des lavaka en détails avec l'image satellite TM par rapport l'image satellite Quickbird à cause de la différente résolution spatiale.

Image satellite TM (1994 et 2011) : 30m x 30m de résolution

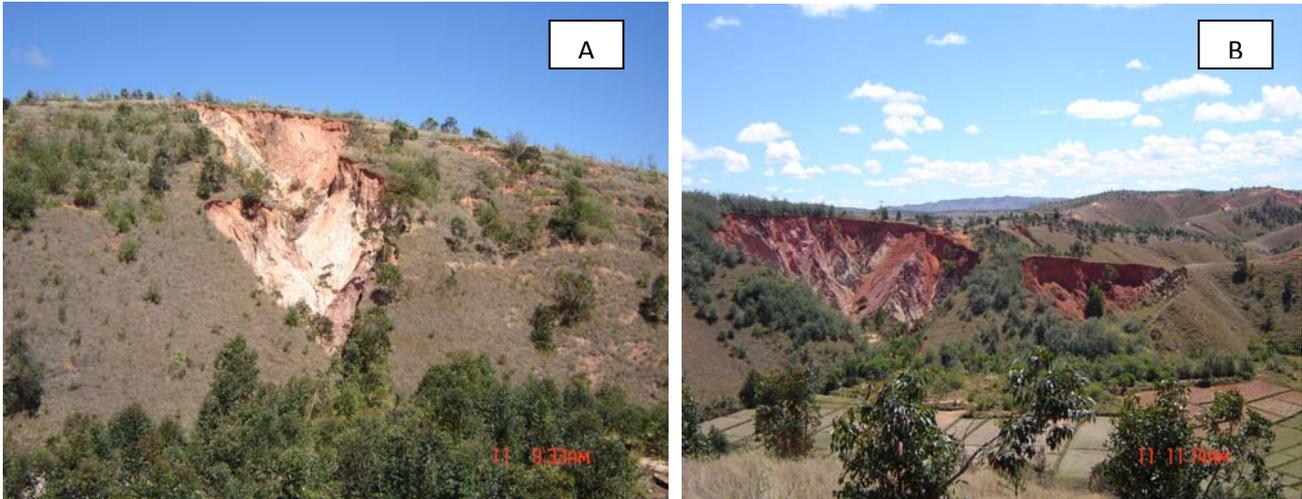
Image Quickbird (2004) : 0,5m x 0,5 m de résolution

III. RESULTATS

III.1. Typologie des lavaka.

D'après les connaissances et l'analyse du point de vue thématique, les **figures 2 et 3** ont confirmé certains résultats antérieurs réalisés par le projet *Bvpi (2004)*. Ce dernier a distingué les études anciennes avec des études récentes expliquant la genèse des lavaka. Les études anciennes ont rattaché le lavaka à la période actuelle en se basant sur des explications portant sur les propriétés mécaniques et physiques des sols, le caractère contrasté du climat et l'action excessive de l'humain sur le milieu naturel. Les théories récentes se fondent sur des études de témoins d'anciennes variations climatiques sur les Hautes terres malgaches. Des relations entre les lavaka et ces variations climatiques ont pu alors être établies. De par ces théories, les lavaka sont présentées comme une forme d'érosion dynamique d'évolution des versants, dont la formation est déterminée par des conditions physiques bien définies. La succession dans le temps de ces conditions physiques a contribué à la formation de différentes générations de lavaka séparées par des périodes climatiques inaptes à la formation de ceux ci. De leur côté, l'humain a accéléré le processus de formation des lavaka. Par ailleurs, le rôle incontestable des facteurs physiques dans la genèse des lavaka et la contribution de l'humain dans son processus de formation qui a appuyé aussi les explications qui se fondent sur les variations climatiques, bien qu'ayons pu réaliser l'étude. En effet, beaucoup de lavaka d'âge différente ont été observé sur terrain. Les lavaka anciens ont reflétés un relief moins prononcé que les lavaka récents et ils sont entièrement colonisés par la végétation, stabilisés et inactifs. Ils peuvent facilement être actifs dès qu'une des conditions favorisant le processus de lavaka se présente. Les lavaka récents aux formes jeunes sont très actifs et dépourvus de couverture végétale, ce qui ont confirmé les observations antérieures sur les diverses générations de lavaka. Les conséquences néfastes sur la présence de

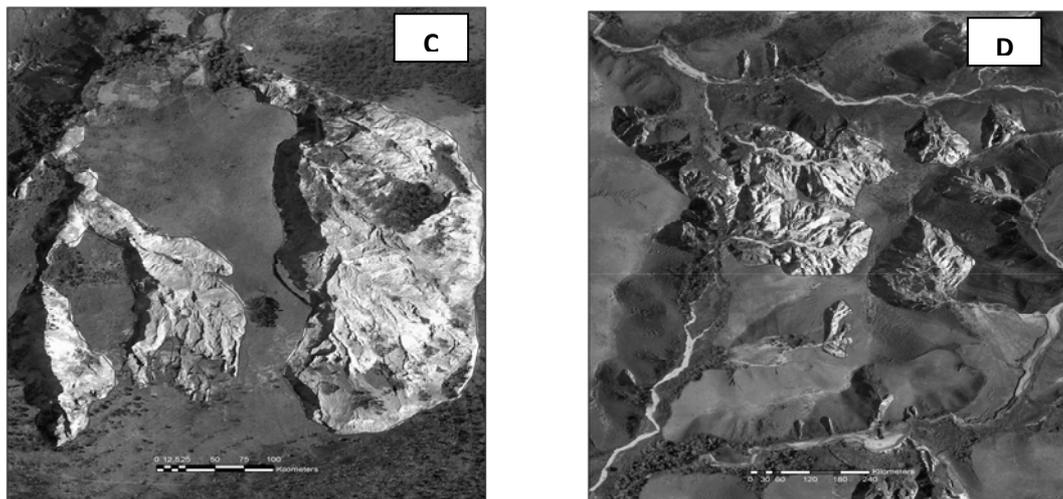
plusieurs lavaka actifs en amont du bassin versant ont entraîné beaucoup de dégâts en aval par l'apport de sédiment en provenance de ce bassin au niveau de la retenue d'eau de Sahamaloto est de l'ordre de 1 000 m³/km²/an. Autrement dit, chaque année la retenue d'eau a perdu une capacité de l'ordre de 300.000 m³. A ce rythme, dans 40 ans la retenue d'eau de Sahamaloto sera totalement comblée.



A : lavaka à l'état actif jeune, à un lobe en forme creux arrondi, à paroi verticale (15 km à l'ouest de CR Ambohitrarivo).

B : lavaka à l'état actif évolué à deux lobes fortement ravinés (Sud ouest du barrage de Sahamaloto)

Figure 2: Caractère géomorphologique des lavaka



C : lavaka à l'état actif et ravinements.

D : lavaka à l'état actif sous forme de coalescence.

Figure 3 : Caractéristiques radiométriques des lavaka (extrait d'image quickbird, 0,5m de résolution)

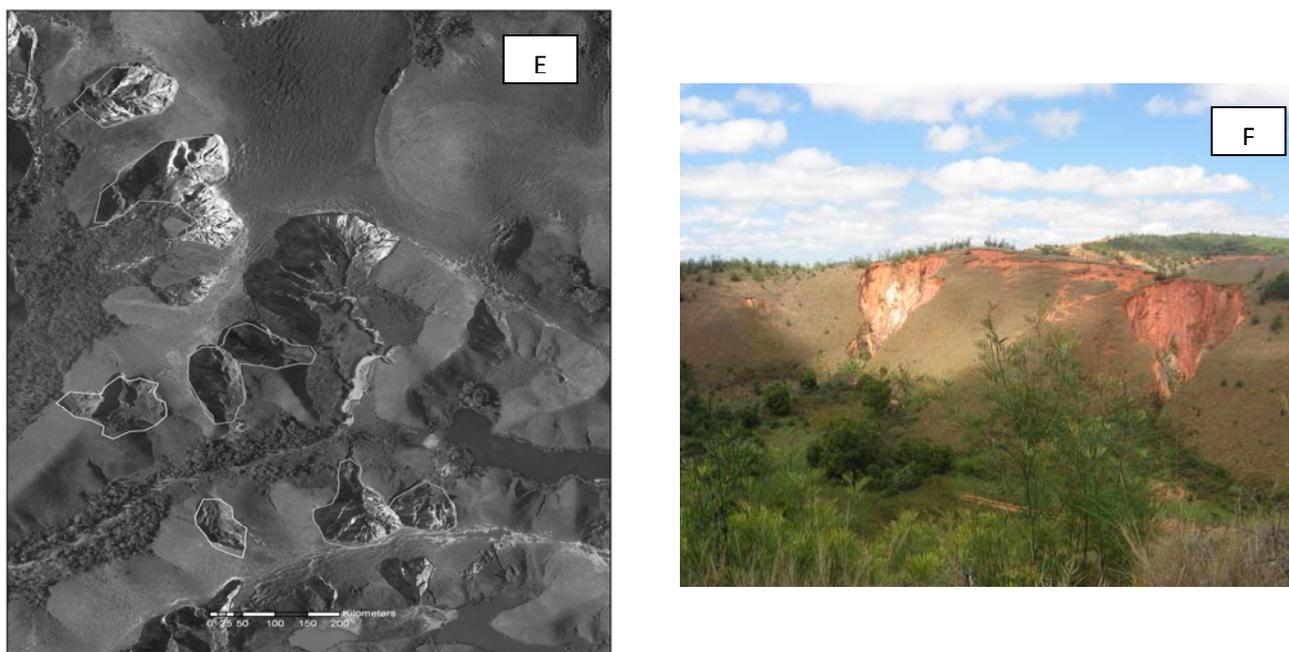


Figure 4 : Caractéristiques radiométriques des lavaka anciens, présence de végétation (extrait d'image Quickbird, 0,5m de résolution)

III.2. Identification des lavaka

Les résultats des premiers traitements numériques appliqués aux images satellite TM de 1994 et TM de 2011 (**tableaux 3 et 4**) qui ont indiqué clairement que l'image TM, datant du mois de Décembre, prise au début de la saison des pluies, offre une meilleure visualisation des objets pour identifier les lavaka, en particulier, le pôle végétal. La comparaison des parcelles d'érosion de 1994 et celles de 2011 a montré des confusions entre érosion et végétation. Cela apparaît quand il y a stabilisation des lavaka par la végétation. Quoi qu'il en soit, il est à remarquer que dans l'ensemble, les parcelles d'érosion et les sols nus sont bien identifiés par les méthodes utilisées. Il fut relativement aisé d'identifier visuellement les lavaka sur les images satellite Quickbird 2004, en se fondant sur les travaux de terrain. La carte d'occupation des sols, obtenue par photo-interprétation, a permis de repérer les zones occupées par les lavaka. Dans les (**Figure 5 et 6**) a remarqué une répartition inégale de cette forme d'érosion en ravine déterminée dont la plupart est localisé au Nord Ouest de la zone d'étude. Dans le bassin versant de Sahamaloto, 644 lavaka ont pu être identifiés par leur forme. Il est constaté que 251,44 Ha de terrain soit 42,98% sont occupés par les lavaka en 1994 sur les 585,09 Ha et 225,62 Ha de terrain soit 38,56 % sont gagnés par les lavaka en 2011 dans le bassin versant de la Sahamaloto. Cette proportion est considérable si l'on tient compte du relief collinaire à altitude entre 800 m et 1000 m de la région. Certains lavaka sont anciens, parfois stabilisés par des végétaux, d'autres ont été en cours d'évolution avec de nombreuses rigoles, formes primaires dans la genèse des lavaka, ont été observées. La réalité de terrain a validé ce constat par l'observation et l'analyse des

structures d'érosion sur place. Les transformations numériques, telle la production d'indices de brillance, de végétation, de rougeur, ainsi que l'analyse en composantes principales, ont permis une bonne identification des lavaka. Mais l'identification automatique des lavaka demeure malgré tout difficile à cause des risques de confusion avec les paramètres sol et végétation. Les lavaka anciens sont en effet totalement recolonisés par la végétation. Ils sont faciles à spécifier à cause de leur dimension, de leur morphologie et de leur exutoire qui est plus large que pour les lavaka récents. visibles, de petite taille et se confondent avec les sols nus. Dans tous les cas, la géomorphologie intervient beaucoup dans l'identification du lavaka. Les formes d'érosion par les lavaka peuvent donc étudiées par télédétection car ces dernières sont identifiables sur l'image. Mais il y a toutefois des limites dans le traitement numérique car il est parfois nécessaire de relever manuellement les lavaka (**tableau 3 et 4**).

Tableau 4 : Classification et occupation du sol (année 1994) avec identification des lavaka

Occupation du sol (1994)	Superficie en (m²)	Superficie en (ha)	Taux en (%)
Forest	90 084,00	9,0084	1,54 %
Marais	488 204,00	48,8204	8,34 %
Rizière	123 284,00	12,3284	2,11 %
Savane et sols nus	2 634 589,00	263,4589	45,03 %
Lavaka	2 514 442,00	251,4442	42,98 %
Plan d' Eau	333,00	0,0333	0,01 %
Total	5 850 936,00	585,0936	100,00 %

Tableau 5 : Classification et occupation du sol (année 2011) avec identification des lavaka

Occupation du sol (2011)	Superficie en (m²)	Superficie en (ha)	Taux en (%)
Forest	119 674,00	11,9674	2,05 %
Marais	625 390,00	62,539	10,69 %
Rizière	370 148,00	37,0148	6,33 %
Savane et sols nus	2 479 240,00	247,924	42,37 %
Lavaka	2 256 153,00	225,6153	38,56 %
Plan d'Eau	332,00	0,0332	0,01 %
Total	5 850 937,00	585,0937	100,00 %

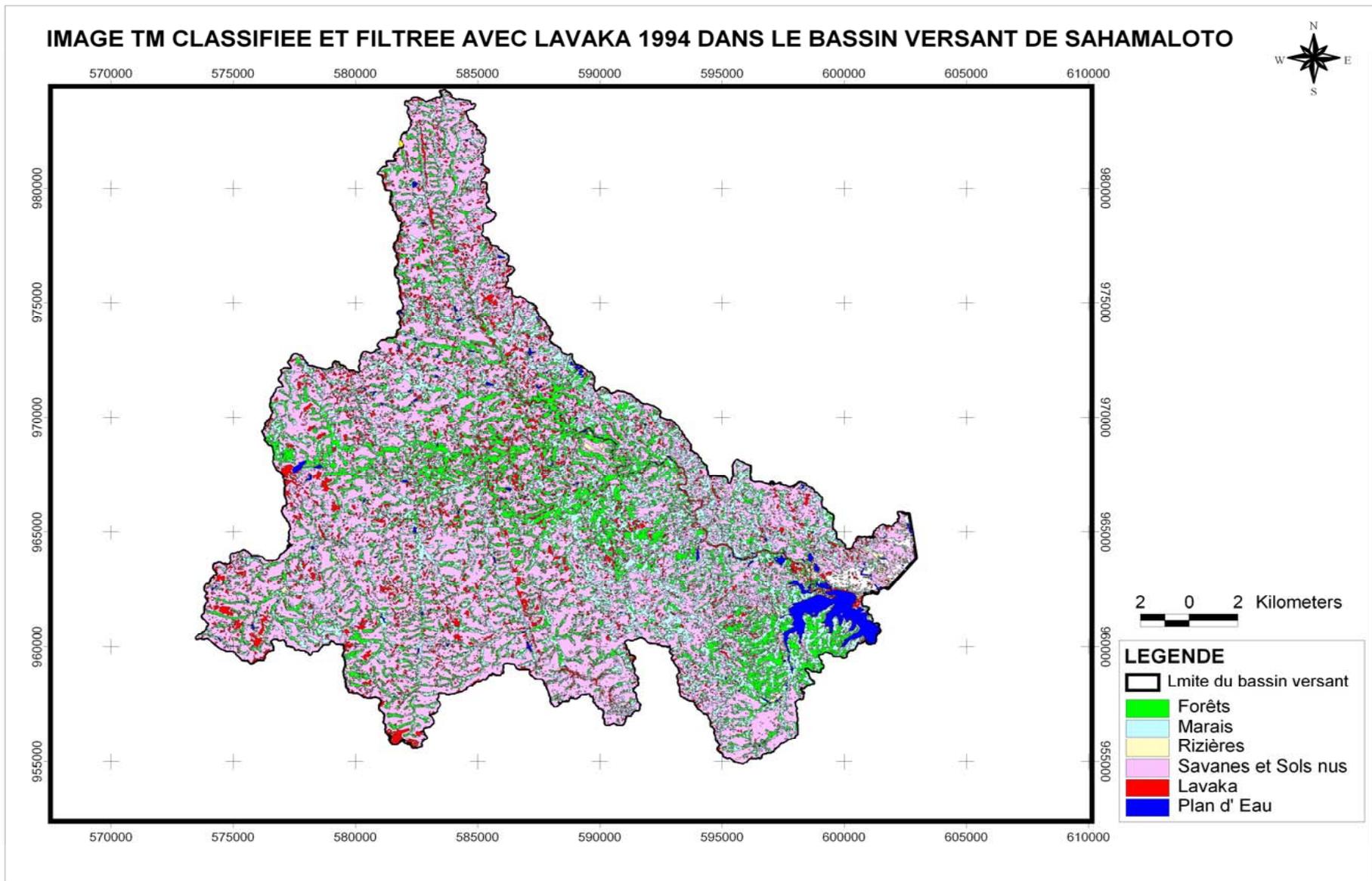


Figure 5 : Classification et occupation du sol (année 1994) avec identification des lavaka.

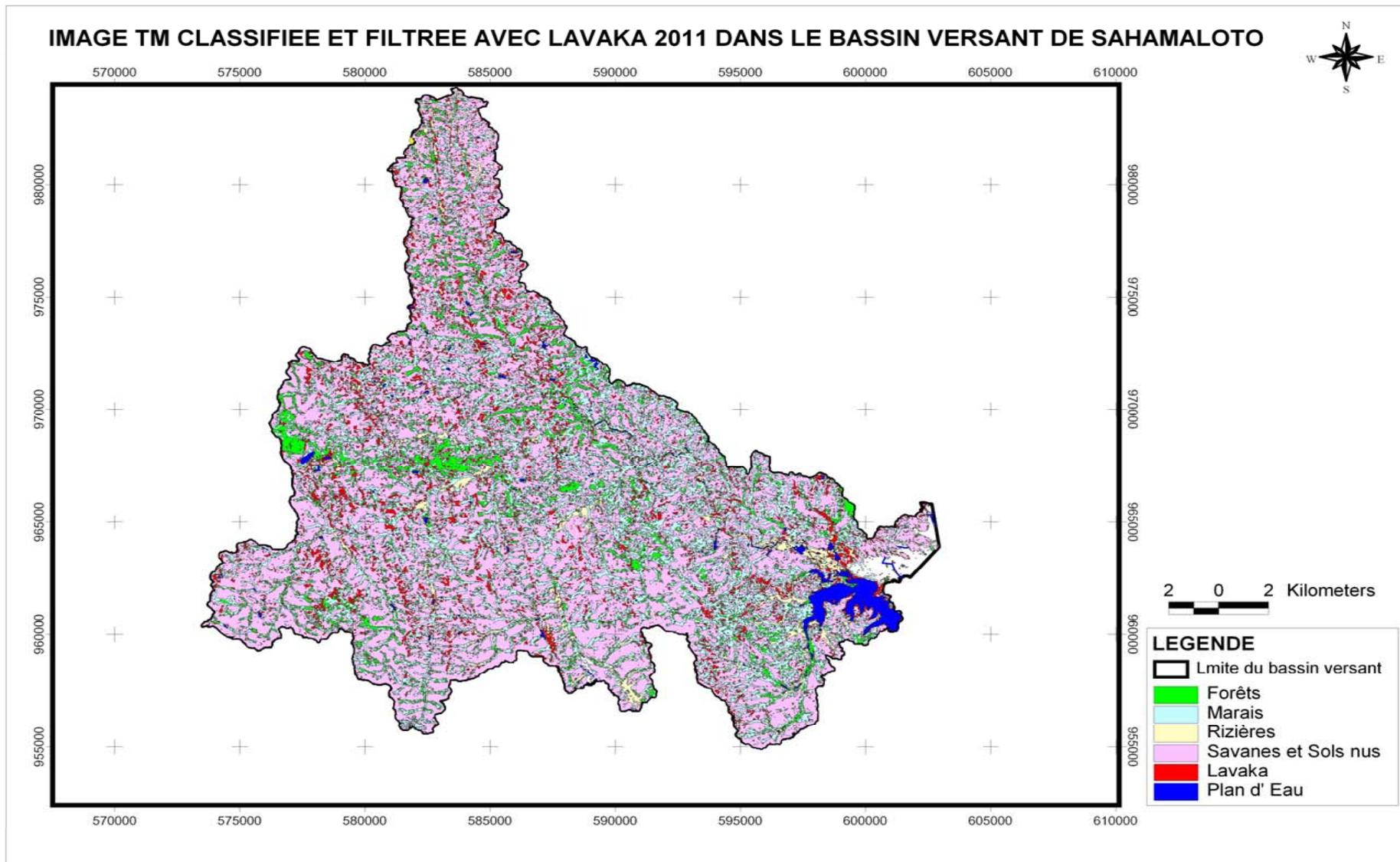


Figure6 : Classification et occupation du sol (année 2011) avec identification des lavaka.

III.3. Lavaka, géomorphologie et le Modèle Numérique de terrain (MNT)

Plusieurs étapes ont procédé à une opération de classement pour constituer une couche d'information résultante de type booléen (**figures 7, 8**) pour chacun des critères avec les facteurs à analyser, procéder par croisement de paires : altitude-lavaka ; pente –lavaka ; MNT-lavaka ; géologie- lavaka. Les propriétés de plusieurs paramètres ont été obtenues par des opérations de masquage et dérivées du MNT : pente, courbure verticale des couches et distance par rapport au réseau hydrographique

Le MNT, est issu de la digitalisation des cartes topographiques à l'échelle au 1/50 000 ème n'a pas permis d'apprécier de façon satisfaisante le modelé de terrain. La superposition de la carte des typologies des lavaka avec ce MNT a montré que certains reliefs allongés au Nord Ouest du bassin versant de Sahamaloto, sont caractérisés par des pentes fortes riche en lavaka actifs et avec végétation. L'influence de la topographie sur la susceptibilité d'un terrain à l'érosion a été incontestable. Elle a été d'ailleurs confirmée sur le bassin versant de Sahamaloto. 85% des "lavaka" se trouvent sur les pentes raides (entre 12 et 30 %) (**Figures 9 et 10**). Ils peuvent atteindre de grande surface de l'ordre de 2 514 442,00 m² . L'abondance des "lavaka" sur les pentes fortes s'explique par l'agressivité de l'eau de ruissellement sur ces terrains. Ce qui a favorisé la formation de l'érosion et de l'évolution des "lavaka" préexistants. Les terrains à pentes faibles (inférieure à 15 %) renferment peu de "lavaka ", sauf aux voisinages des linéaments tectoniques.

Les terrains à pente faible partie des collines est caractérisée par la présence des lavaka aussi sont des zones de prédilection de pâturage, la plupart du temps dénudés, sans mise en valeur aucune, avec une colonisation *d'Aristida sp* se présentant sous forme de touffes et fréquemment visité par le feu. Le processus d'érosion en nappe, vivace sur cette partie, dégènerent fréquemment en érosion en ravine quand il ya passage d'une piste humaine ou du bétail.

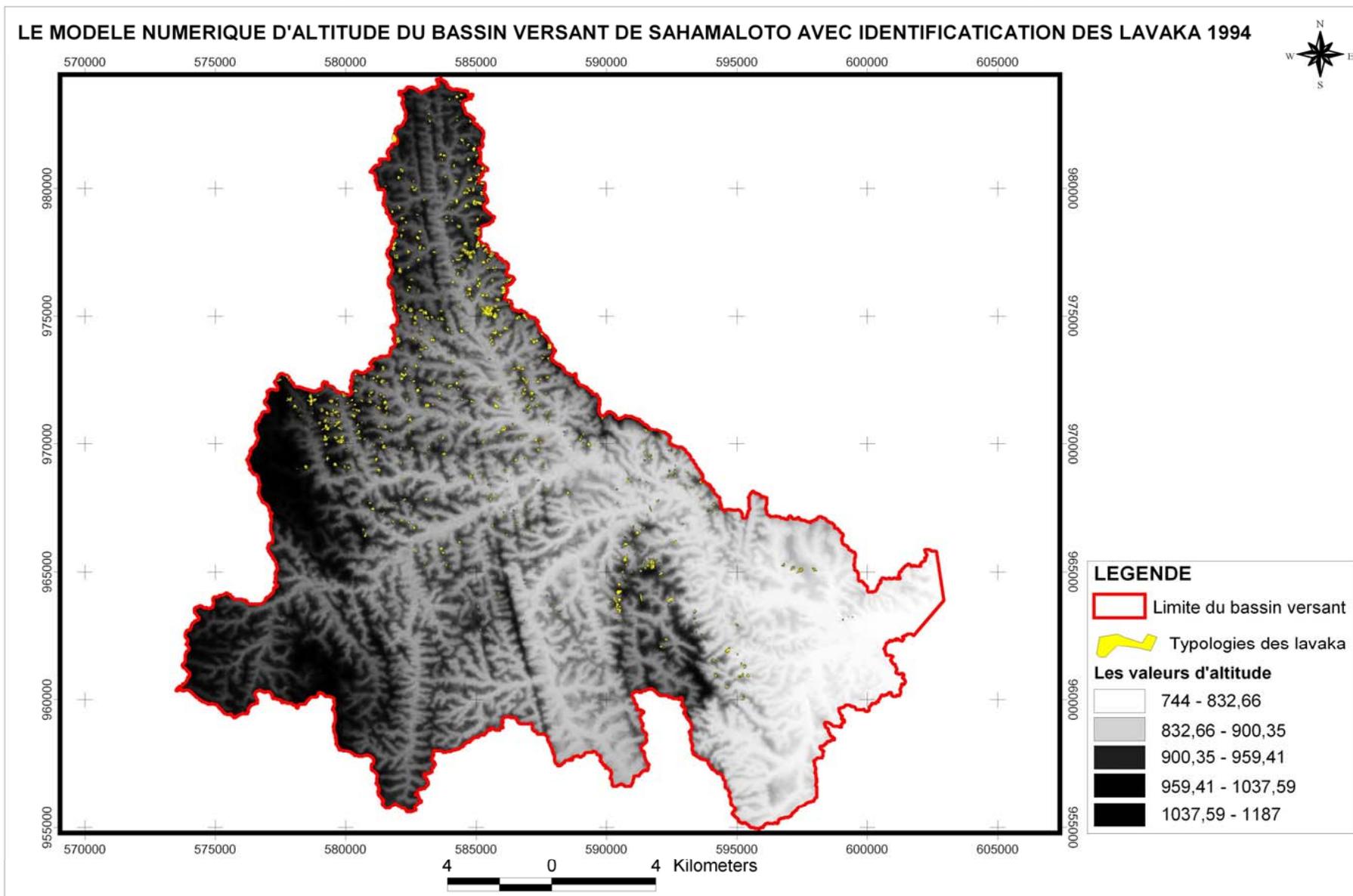


Figure 7 : Modèle Numérique de terrain (année 1994) avec identification des lavaka

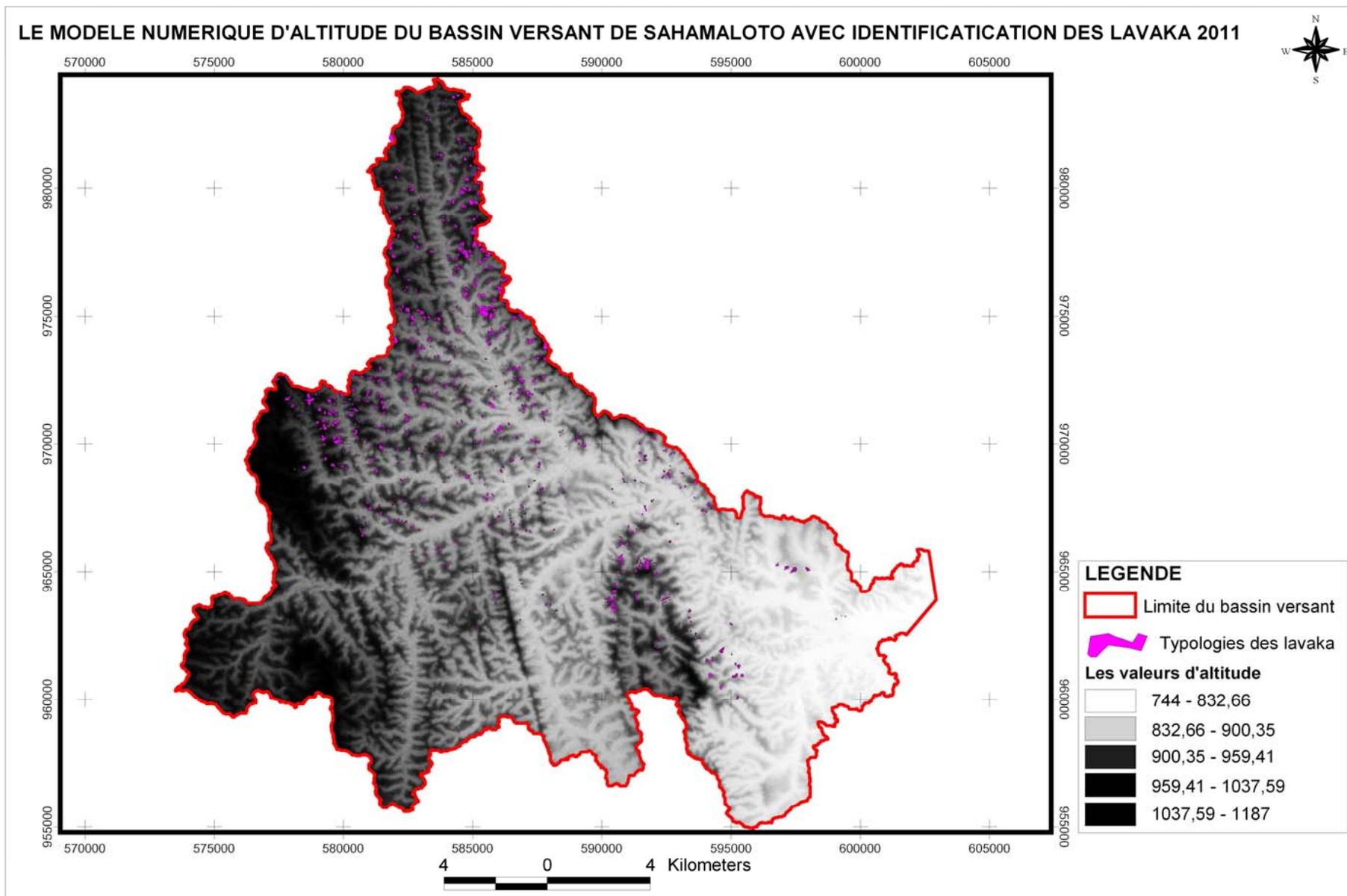


Figure 8 : Modèle Numérique de terrain (année 2011) avec identification des lavaka

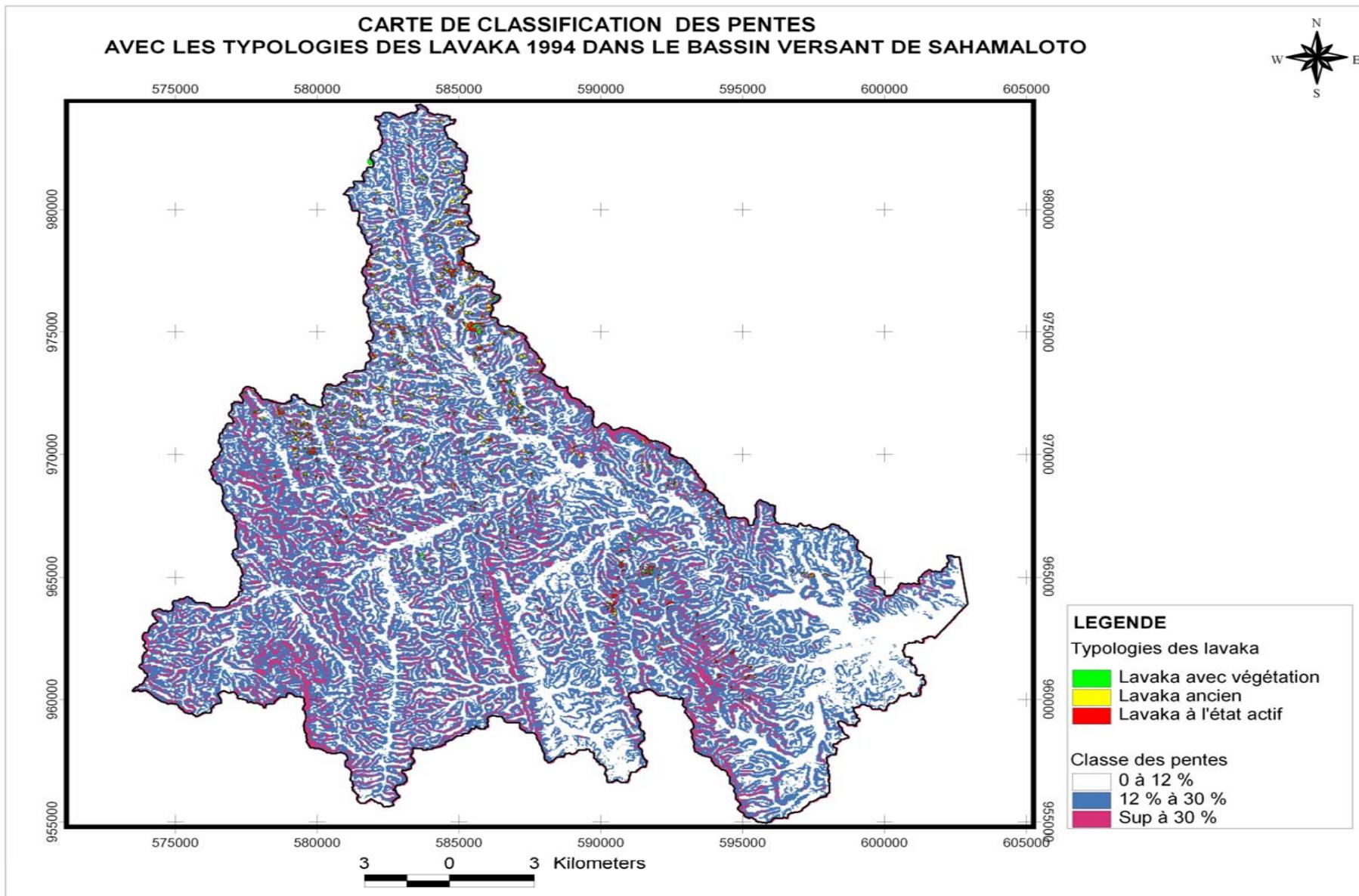


Figure 9 : Carte des pentes (année 1994) avec identification des lavaka

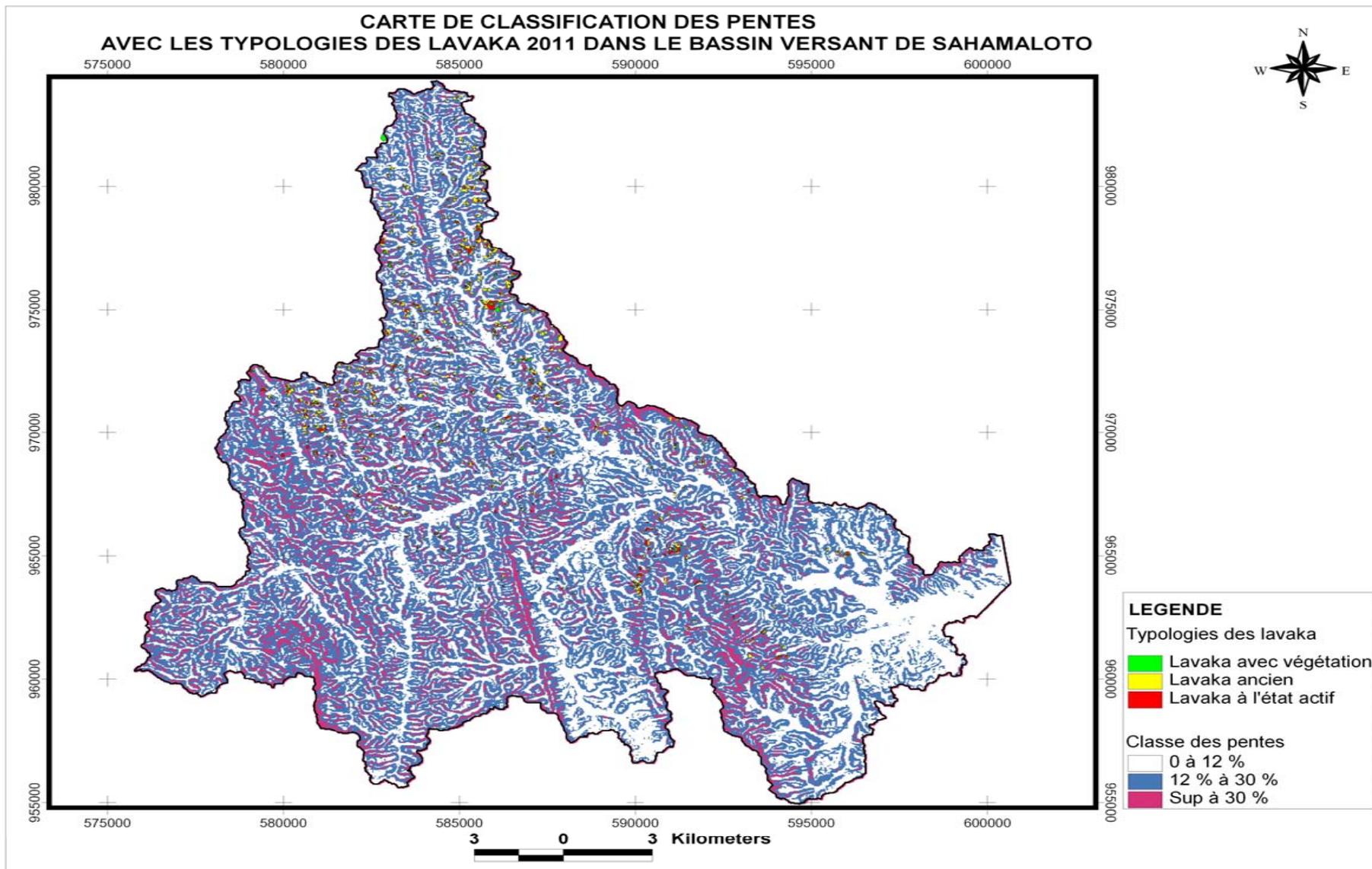


Figure 10 : Carte des pentes (année 2011) avec identification des lavaka

III.4. Evolution de dégradation par typologies des lavaka

La démarche détaillée conduit à des résultats en matière de traitement avec la comparaison d'évolution des parcelles d'érosion par typologies de lavaka entre 1994 et celle de 2011 (**tableau 5 et 6**). Les tableaux et figures ont montré que : en 1994, 42,98 % des lavaka (dont 25,03% lavaka à l'état actif ; 12,22% avec végétation ; 5,73% ancien) contre 38,56% des lavaka (dont 22,96% à l'état actif ; 11,15% avec végétation ; 4,45% ancien) en 2011.

Au plan quantitatif, les tableaux ont mis en évidence, par rapport à la situation de 1994, les lavaka du bassin versant de Sahamaloto sont passés de 1437, soit une superficie de 2 510 km² ; à 1082 en 2011, soit une superficie de 2 250 Km². Les lavaka ont donc diminué en nombre de 355 lavaka de moins, soit une diminution de 10%, et ils ont aussi diminué en superficie. Ainsi, en espace d'une vingtaine d'année de moins, l'érosion hydrique a diminué et les anciens lavaka ont pris d'une ampleur considérable de se stabiliser. Les lavaka sur le flanc des collines ont été les plus nombreux soit 25,03% des lavaka actifs identifiés en 1994 contre 22,96% en 2011. La plupart des lavaka à l'état actif peuvent être stabilisé lié aussi à l'augmentation de la superficie des forêts.

Tableau 6 : Classification par typologie des lavaka 1994

Occupation du sol	Superficie en ha	Taux en %	Nombre de lavaka
Forêt	9,01	1,54%	
Marais	48,82	8,34%	
Rizière	12,33	2,11%	
Savane et sols nus	263,46	45,03%	
Lavaka actif	146,42	25,03%	787
Lavaka avec végétation	71,48	12,22%	458
Lavaka ancien	33,54	5,73%	192
Total	585,0936	100,00%	1437

Tableau 7 : Classification par typologies des lavaka 2011

Occupation du sol	Superficie en ha	Taux en %	Nombre de lavaka
Forêt	11,97	2,05%	
Marais	62,54	10,69%	
Rizière	37,01	6,33%	
Savane et sols nus	247,92	42,37%	
Lavaka actif	133,99	22,96%	778
Lavaka avec végétation	65,21	11,15%	271
Lavaka ancien	26,42	4,45%	33
Total	585,0936	100%	1082

D'après les résultats : lavaka actif diminue, lavaka avec végétation diminue aussi, lavaka ancien aussi réduit à la moitié

III.5.Facteurs géologiques par typologies des lavaka

D'après la constatation de *Biro* (1963) qui a établi, pour les hautes terres centrales malgache une échelle d'altérabilité des roches cristallines, l'ordre de susceptibilité des roches dépend de son altérabilité. De plus sensible au plus résistante, on a:

- les roches para métamorphiques (para gneiss, migmatites schisteuses).
- Les roches moyennement altérables qui peuvent être atteintes sous un sol de quelques mètres d'épaisseur (migmatites granitoïdes).
- Les roches difficilement altérables qui donnent des affleurements sains, sous formes de boules sur les versants naturels (granites, diorites). Le bassin versant de la rivière Sahamaloto est constitué par trois principales entités géologiques. Au Nord, il y a des granites et migmatites du système de graphite de Tampoketsa; à l'Est, (système du Vohibory) et au Sud de l'alluvion et du sable.

Les "lavaka" sont très fréquents sur les granites et les migmatites du groupe de Tampoketsa. Cette formation renferme les 95% des "lavaka" actifs du bassin versant. La moyenne des surfaces drainées est énorme, de l'ordre de **2514 442 m²**. (Figure 11 et 12). Le système de Vohibory renferme le faible taux de "lavaka" actuellement en état actif dans le bassin versant. Toutes les morphologies des "lavaka" sont rencontrées dans les formations géologiques du système de granites et les migmatites du groupe de Tampoketsa. Sous forme de digitation, de cirque ou de fissure ; les "lavaka" sur les gneiss sont très profonds. Certains "lavaka" peuvent atteindre une profondeur de 75 m. La digitation est la plus fréquente, et se rencontre sur les terrains à pente forte (supérieure à 30%) et près des linéaments

tectoniques (à une distance de 1000 m des failles). Les "lavaka" sont en régression c'est à dire remontants et les têtes sont affouillées. La structure et la géologie de terrain sont les paramètres expliquant l'abondance et l'évolution rapide des "lavaka" sur les granites et migmatites. Le système du Vohibory est omniprésent sur les hautes terres malgaches et est représenté, sur le bassin versant par des granites et des migmatites (Série du Sahamaloto, groupe de Beforona). Les gneiss sont, en général à amphibole (hornblende) avec parfois de la biotite ou avec quelques niveaux de gneiss à deux micas associés à des gneiss à biotite et sillimanite. Les migmatites présentent généralement un caractère gneissique, migmatite schisteuse à faciès lit par lit. Comme les gneiss, elles sont surtout à amphibole avec parfois de la biotite. Les bancs de quartzite sont innombrables. Ils sont friables, à grain grossier ou fin. Les plus fréquents sont les quartzites blancs jaunâtres très feldspathiques et souvent micacés ou avec quelquefois aussi de la sillimanite. Les quartzites à magnétite ne présentent jamais une puissance notable (quelques décimètres à un mètre). La teneur en magnétite est souvent pauvre. Les micaschistes très rares sont à deux micas et s'intercalent avec les quartzites ou les gneiss. Cette formation contient, dans certaine localité en amont de la rivière Sahamaloto des bancs discontinus de micaschiste à biotite, de quartzite et d'orthoamphibolite. Ces bancs peuvent atteindre un épaisseur de 50 cm. La présence en grande quantité de minéraux très altérables tels que l'amphibole, la sillimanite ou le micaschiste affecte le drainage du sol. L'eau contenue dans la nappe aquifère ne peut pas circuler normalement du fait que les matériaux qui la constituent sont très fins et que l'indice de porosité est très faibles. Il y a donc forte une rétention d'eau à l'intérieur du sol. Dans la rivière en amont de Sahamaloto, la nappe phréatique est saturée en permanence toute l'année. Lors de la période des pluies, la nappe phréatique se transforme en coulée boueuse et part en grande masse en aval vers le barrage de réservoir de Sahamaloto. Ceci a été expliqué par l'évolution rapide et la grandeur de la surface des "lavaka" sur les granites et les migmatites de groupe de Tampoketsa. Les "lavaka" en forme de cirque peuvent être rencontré même sur des terrains à pente relativement faible (15%). Les terrains à faibles altitudes (700 à 800 m) contiennent des sols à "gleys" ou "pseudogleys". Les bas-fonds sont plats et peuvent toucher le fond de la vallée. Les "lavaka" en cirque sont en effets très profonds sur des pentes fortes (30 à 45%). Le fond plat et le contexte les "lavaka" en forme de cirque sur les gneiss et les migmatites du système de Vohibory confirment la théorie soutenue par *Tricart (1953) et Guilcher (1961)* sur la formation des "lavaka" par sapement de la nappe phréatique. Lorsque la nappe phréatique a atteint un certain degré de saturation, elle ne peut plus être supportée le poids de la couche sus-jacente. La destruction commence à partir de la source et pénètre peu à peu vers l'intérieur de la colline. Les matériaux peuvent partir en blocs ou en coulée boueuse. La dégradation se fait horizontalement et parallèlement à la couche aquifère. Les fissures se sont formées à l'intérieur des anciens "lavaka" dont les pentes des parois sont encore relativement raides. La forme en cuvette de ces anciens "lavaka" favorise la concentration du ruissellement de l'eau de pluie. De plus, l'emboîtement ou la formation d'un "lavaka" à l'intérieur d'un autre a été facile sur les anciens "lavaka" parce que la structure pédologique de ceux-ci a été modifiée. L'horizon humifère, plus résistant, a été tronqué. Dans le bassin

versant de la Sahamaloto, les roches à forte altérabilité sont les schistes cristallins (les granites et migmatites du système de groupe de Tampoketsa) **figure 11 et 12** a montré que 93% des "lavaka" se trouvent dans les granites et migmatites contre, seulement 7% dans le système de Vohibory et l'alluvion, sable. Les gneiss du système de Vohibory renferment peu de "lavaka" (07%) que les migmatites du système du graphite. Ces formations géologiques sont très sensibles à l'érosion. Elles concernent 80% des "lavaka », Les "lavaka" avec végétation ont favorisé la formation des "lavaka" qui ont emboîtés plus de 70% des "lavaka" actuellement à l'état actif. Les versants à pentes fortes (supérieure à 30 %) sont instables et très sensibles aux agents d'érosion et peuvent entailler de grands lavaka de volume important (150 000 m² de surface drainé).

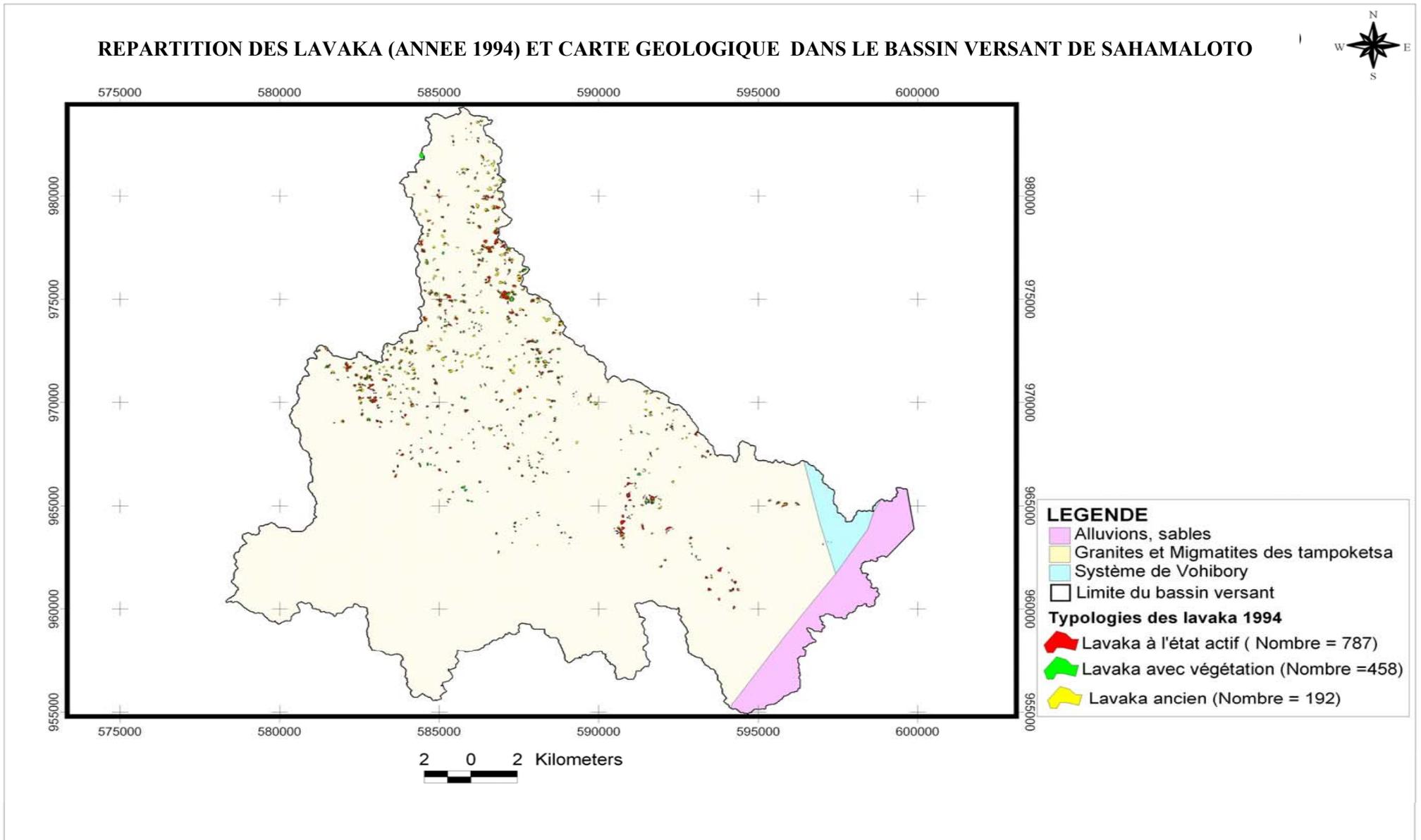


Figure 11 : Montrant la carte géologique du bassin de Sahamaloto avec typologie des lavaka (1994)

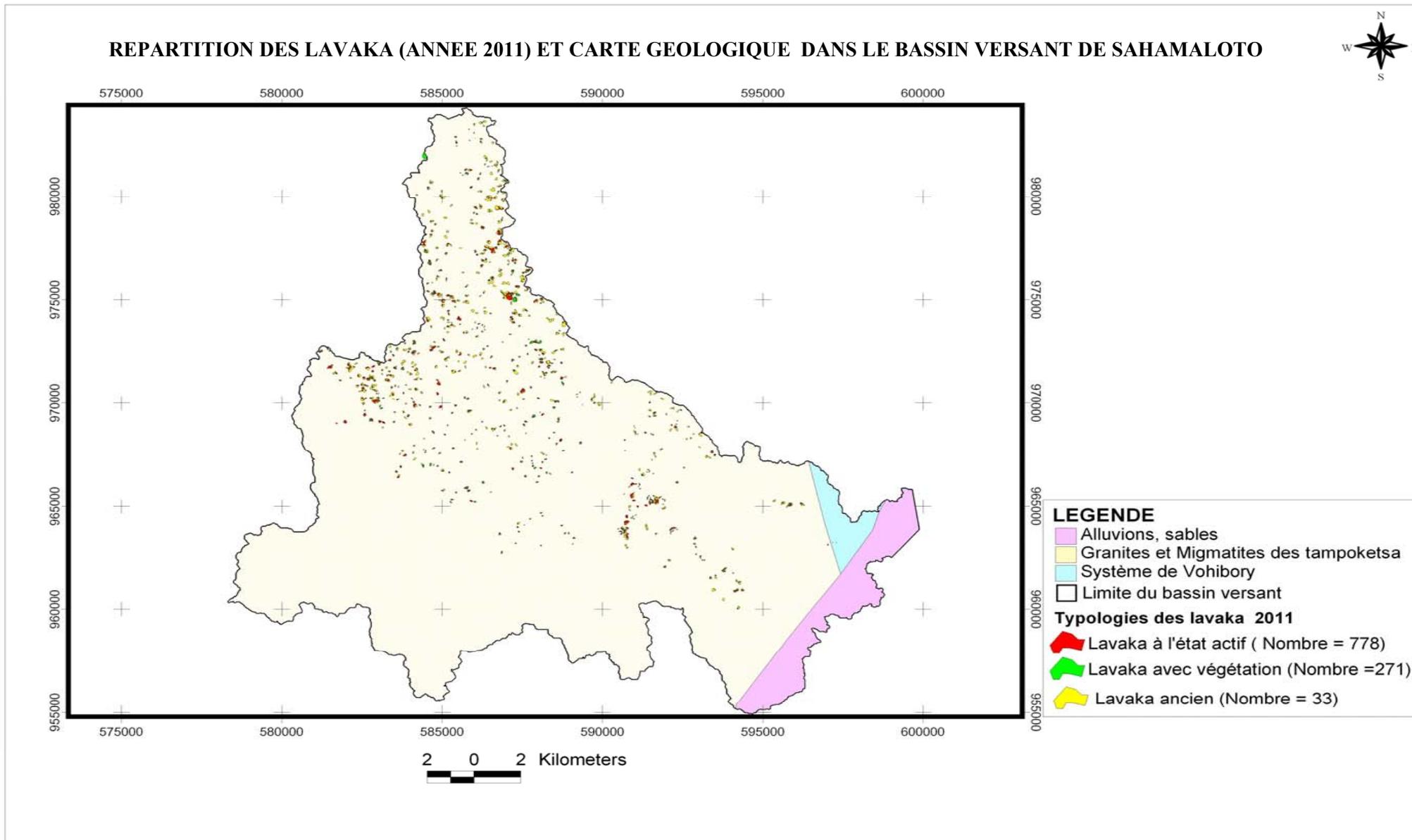


Figure 12 : Montrant la carte géologique du bassin de Sahamaloto avec typologie des lavaka (2011)

IV. DISCUSSIONS

La méthodologie et les types des cartes à utiliser dépendent du mode d'extraction des contours de périmètre de lavaka et en fonction du type d'image utilisé. L'extraction automatique (seuillage, indice des sols nus) n'a pas donné de bons résultats à cause de la variabilité de la réponse spectrale des lavaka actifs et anciens. Aucun des traitements standard n'est véritablement adapté. L'interprétation visuelle, aidée par les traitements a optée, bien qu'elle soit subjective. Par rapport à l'état actuel de cette zone du bassin versant qui ont précisé certaines idées sur la morphogenèse des lavaka. Il est constaté que la zone de départ des lavaka se situe dans des pentes supérieures à 30%. Les modélisations futures devraient confirmer ce constat, portant sur l'évolution des lavaka rattachée aux variations paléoclimatique du Quaternaire (*Mietton et al. 2003*), notamment pour les lavaka de grande dimension du bassin versant de la Sahamaloto, le milieu du Nord Ouest de ce bassin a montré que, les lavaka semblent s'être résorbés entre 1994 et 2011, alors qu'ils se sont développés dans la partie. En effet, sur terrain, que là où les lavaka sont absents, c'est-à-dire au Sud et à l'Est du bassin versant, le relief est moins accidenté. Une pente faible, inférieure à 15%, donne au relief une allure de replat. Le réseau hydrographique n'est pas dense. Cette zone correspond au domaine de la savane pseudosteppe. Une reprise de la colonisation végétale est observée, en particulier dans les lavaka. En conséquence un phénomène de stabilisation naturelle des lavaka à cet endroit est identifié. L'identification des lavaka à travers le traitement numérique des images TM et Quickbird ne fut pas aisée dans la mesure où les valeurs radiométriques des objets de l'image peuvent porter à confusion lorsque les signatures spectrales des lavaka se confondent avec celles du sol nu ou de la végétation. D'une part, la taille d'une ravine peut varier considérablement et atteindre des dimensions impressionnantes surtout s'il y a coalescence de plusieurs lavaka. D'autre part, leur précision spatiale n'est pas suffisante pour établir des corrélations fines. La cartographie des lavaka sur une zone comme un bassin versant, par interprétation des images de télédétection et dans le cadre d'une base de données cartographiques, a permis de comparer leur répartition avec celle de différents facteurs. L'approche cartographique permet d'appréhender l'importance des facteurs qui seraient à l'origine des lavaka. Cependant, elle exige l'utilisation de documents cartographiques produits à la même échelle puisque la méthode est limitée par la disponibilité des données exprimant les facteurs. Les hypothèses de départ ont été ici vérifiées car les lavaka à Alaotra rive ouest existaient bien avant la présence de l'homme. Certains auteurs pensent que la formation des lavaka peuvent alors avoir deux origines : anthropogénique et naturelle ; ou plus précisément une combinaison de deux facteurs (*Wells & Andriamihaja, 1993*), environ un quart des lavaka sont clairement et directement causés par des facteurs anthropogéniques (*Rabarimanana et al,2003*), ont conduit des recherches utilisant des SIG et ont essayé de trouver des preuves de relation entre le répartition des lavaka et d'autres paramètres tels que la lithologie, des activités inadéquates, la morphologie, l'hydrologie, la végétation et les actions de l'homme. Les

résultats de ces recherches ont montré qu'il existe une corrélation entre le nombre de lavaka et la densité de pâture (*Rabarimanana et al, 2003*). Sous le climat à saison contrastée dans cette région, les migmatites sont plus vulnérables enfin les diorites et gabbros (*Birot, 1963*) due à l'action de la nappe phréatique qui sape les horizons inférieurs (au-dessus de la roche mère en place) et agit par solifluxion amenant un affaissement des couches supérieures, dont les pentes peuvent par la suite, être reprises par l'érosion superficielle entraînant la formation d'une cavité plus ou moins digitée à parois verticales. D'autres cherchent uniquement l'origine des lavaka dans le ruissellement superficiel qui, à la faveur des rigoles, reprend les matériaux meubles de la zone d'altération et provoque des éboulements et creusements par érosion régressive. Les zones les plus touchées par ce phénomène d'érosion accélérée. Compte tenu de la diversité et la complexité des conditions du milieu naturel du bassin versant avec la géologie, la géomorphologie qui ont constituée le facteur déclencheur du processus de formation des lavaka. À cela s'ajoutent la forte altération des roches, le fort ruissellement des eaux de pluie en amont du bassin versant et l'action anthropique illustrée par les effets du piétinement des bœufs domestiqués comme terrain de pâturage par les paysans. Les résultats obtenus ont permis d'acquérir ainsi un certain nombre de connaissances par l'utilisation de la photo-interprétation par image satellitaire de voir le niveau de dégradation (1994 et 2011) et de progresser dans la compréhension de la genèse et de la dynamique des lavaka, en particulier sur l'identification des facteurs déclencheurs prédominants. Les observations sur le terrain ont facilité le traitement numérique des données. La différence entre les facteurs géologiques et les facteurs topographiques des lavaka, la géologie des hautes centrales de Madagascar, y compris la zone du bassin versant de Sahamaloto avec le socle cristallin précambrien qui a un substratum caractérisé par l'abondance des roches métamorphique et migmatique d'âge précambrien sous climat tropical actuel, les roches foliées acides (riche en quartz) tels que les migmatites et gneiss sont les principales formations qui ont subi une altération très profonde en raison de leur foliation (*Birot, 1963*). Les zones de socle folié sont donc en général les plus vulnérables à la formation et au développement des lavaka. La topographie semble que l'érosion en lavaka a diminué à l'échelle régionale en s'éloignant également du fossé d'Alaoatra, les lavaka sont tous corrélés avec des reliefs élevés dont l'altitude a été comprise entre 900 m et 1250 m, à l'exception des surfaces sous les massifs forestiers. Cette forme d'érosion semble être entretenue par l'effondrement du bassin, ce qui a entraîné une baisse de niveau de base, par conséquent dans la formation plus érodables située en contre bas, à pentes fortes ; les excavations sont plus abondantes surtout à proximité de la crête, il est clair que les effets topographiques même assez modestes sont liés aux facteurs géologiques car la topographie est dérivée de la géologie.

RECOMMANDATIONS

Le développement d'un système de suivi par télédétection des lavaka combinera diverse technique pour voir l'évolution de dégradation de l'érosion en lavaka :

- ▶ Approfondissement de la connaissance sur les points noirs d'érosion du bassin versant de Sahamaloto.

L'inventaire des principaux points noirs d'érosion de l'ensemble du bassin versant, ainsi que leur description détaillée (dimensions, dynamique, effets sur le milieu, etc.) constituera une étape préalable à la stabilisation des lavaka. L'étude de ces points noirs aura été faite à partir :

- De l'achat et l'utilisation complémentaire de photographies aériennes (pour la localisation exacte des lavaka, l'étude de la dynamique et des dimensions) ;
- Des enquêtes socioéconomiques seront effectuées auprès des villages du bassin versant (pour la localisation et la constatation des effets sur le milieu).

L'étude diachronique des lavaka permettra de voir la dynamique des lavaka qui aura pu être appréciée par comparaison de photographies aériennes prises à des époques différentes (1949). Les points noirs à traiter auront été priorisés selon leur dynamique et leurs effets sur le milieu accompagné par le type de traitement (mécanique et/ou biologique) qui est approprié à chaque point noir de définir en fonction des données obtenues pour chaque site. Le traitement des lavaka consistera à leur stabilisation et leur mise en valeur.

- ▶ Reboisement de la partie supérieure des lavaka

Le reboisement en amont des lavaka permettra d'annuler ou au moins d'affaiblir le ruissellement provenant de cette zone qui est la cause principale de la formation du lavaka. Les espèces légumineuses ont été les meilleures à proposer pour améliorer la qualité du sol. Le choix des espèces devra tenir compte les caractéristiques climatiques et édaphiques du milieu. Quelques espèces sont fréquemment utilisées à cette fin : *Sesbania sesban*, *Tephrosia vogelii*, *Leucaena leucacephala*, *Calliandra calothyrsus*, *Albizia lebeck*. Cette liste n'est pas exhaustive et les espèces citées peuvent ne pas s'adapter à l'écologie du milieu.

- ▶ Installation de fosses de protection à la tête des lavaka

Le but de cette action sera de dériver les eaux de ruissellement arrivant près du lavaka et de les diriger vers un exutoire déterminé. Le ruissellement peut être utilisé à des fins plus utiles (par exemple : irrigation des bas-fonds rizicoles des vallées). Les fosses doivent être assez larges et peu profondes, enherbés ou cimentés. Leur installation requiera une étude affinée et des travaux d'entreprise. Si les fosses seront mal installées, cela entraînera la formation de nouveaux lavaka.

▶ Relèvement du niveau de base

Les exutoires de grand lavaka peuvent être barrés par des ouvrages en gabions entraînant un stockage du sable au niveau de la base. Le niveau de base sera ainsi relevé, et le surcreusement du lit et le sapement des talus (source des éboulements) seront limités, voire évités. L'installation de ces ouvrages en gabions nécessite des travaux d'entreprise.

▶ Mise en valeur et végétalisation des lavaka et des talus

Le développement de la végétation à l'intérieur des lavaka et sur les talus permettra à la fois de stabiliser le lavaka et de fournir des produits utiles à l'homme. Cependant la stabilisation par végétalisation n'est conseillée que sur des talus en équilibre. Dans le cas contraire, le relèvement du niveau de base constituera une étape incontournable. Le reboisement et le gazonnement avec des essences autochtones déjà présentes dans le lavaka seront à recommander étant donné que ces essences s'adaptent aux conditions écologiques du milieu. D'autres essences pouvant se multiplier facilement par boutures seront également préconisées à Sahamaloto (: *Phragmites sp* ; *Buddleia madagascariensis*, *Tinthonia sp*, *Vernonia appendiculata*). Selon Tassin (1992), des associations végétales peuvent être faites sur les talus (selon qu'il s'agit de talus stable, semi-stable ou d'éboulement semi-stable) et à l'intérieur des lavaka (terrasse interne ancienne, interne actuelle, épandages sableux). Dans certains cas, l'intérieur des lavaka pourra être aménagée en terrasses sur lesquelles seront installées des cultures (cultures vivrières ou potagères, arbres fruitiers, essences ligneuses). La mise en valeur des lavaka permettra d'assurer l'entretien de ces zones sensibles par les paysans.

V. CONCLUSION

Bref, les différentes menaces, dues essentiellement aux actions anthropiques sur la majeure partie du bassin versant de Sahamaloto ont provoqué depuis toujours une sédimentation croissante dans la plaine de Lac Alaotra ; zones de bas-fonds essentiellement destinées à la production rizicole. L'érosion du sol a été les formes de détérioration de l'environnement qui touchent directement le cadre de la vie humaine. Cette recherche a permis de montrer un suivi des ressources naturelles par télédétection qui est une source d'informations précieuse sur l'évolution de la dégradation de l'érosion en lavaka. Divers traitements sont toutefois nécessaires, telle la fusion des canaux pour une meilleure résolution spatiale. Une méthodologie intégrant à la fois les données de télédétection et Modèle Numérique de terrain très précis ont pu déboucher sur l'extraction automatisée des contours et offre une analyse tridimensionnelle de l'évolution spatio-temporelle des lavaka par des mesures basées sur la morphométrie. . Quoi qu'il en soit, l'utilisation de ces outils de cartographie a permis d'avoir une vision synthétique de la situation des lavaka. Etablir un modèle conceptuel de l'érosion par le biais de traitement par un SIG des données issues de la télédétection et leur analyse spatiale est des compléments de plus en plus incontournables du traitement numérique des images. Cette recherche a procuré beaucoup d'avantages déjà sur les possibilités de comparaison des méthodes de télédétection, avec celles d'un SIG à l'étude du processus d'érosion par lavaka mais aussi sur le couplage d'image Quickbird et image satellitaire TM, cette démarche se présente comme une méthode de recherche efficace après avoir comparé la différence de dégradation des lavaka entre l'année 1994 et 2011 comme outils de suivi de développement par télédétection par lavaka. D'autres modèles plus complexes tels que le mathématique et empirique peuvent être débouchés.

A partir du SIG et télédétection, l'étude a pu établir une carte d'évolution de dégradation des lavaka à deux années différentes (1994 et 2011) dans le bassin versant de la rivière Sahamaloto. Les crêtes et les pentes raides (supérieures à 60%) sont destinées à la protection c'est-à-dire que ces terrains ne doivent pas être cultivés.

Toute porte à croire que l'apparition des lavaka est conditionnée par quatre facteurs principaux en général : la géologie, l'hydrographie, la topographie et les facteurs anthropiques. Dès lors il a permis d'envisager une modélisation des processus d'érosion par la considération de ces paramètres. L'étude a été permise de valider les observations, de déterminer les paramètres à introduire dans les modèles et de les ajuster sur des cas réels.

De ce fait, il a été possible de déduire des propositions générales et pratiques pour lutter contre l'érosion. Sans aucune mesure sévère, l'érosion, a été un phénomène fréquent sur les formations géologiques du socle ancien malgache qui a présenté de réels dangers d'ordre écologique et

économique. L'ensablement réduit la productivité du sol et conduit peu à peu au phénomène de désertification.

Il est conseillé de reboiser les terrains qui ne sont pas destinés à la culture et d'utiliser des essences adéquates avec les types de sol. L'utilisation du vétiver dans la lutte anti-érosive est également conseillée parce qu'il présente de nombreux avantages technique et économique.

Malgré les facteurs limitant rencontrés durant ce travail (absence de photo aérienne, temps à disposition ne permettant pas des calculs réels sur terrain convenablement) ; une superposition des données géologiques, topographiques est en vue comme résultats partiels obtenus qui pourront servir de données de base et de références pour des futures recherches dans le bassin versant. De telle étude ne doit pas rester au niveau qualitatif, un approfondissement des calculs réels sur terrain s'avère nécessaire en perspective pour faire des critiques du produit obtenu. A partir du bilan de l'état physique des moyens de lutte biologique et mécanique entrepris dans ce bassins les plus dégradés du plateau ou la vallée de Sahamaloto ; il a été constaté que, globalement le système de lutte anti-érosive fonctionne correctement autant pour des raisons théoriques que pratiques. Les structures anti-érosives dominées par les fossés, les haies en vétiver, les barrages en fascines et en moellons ont présenté leur efficacité en matière de réduction de transport de sédiments vers l'aval.

REFERENCES

-**Anonyme (1997)** Projet de conservation des sols. Association nationale d'actions environnementales, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, Foibe fikarohana sy fampiroboroboana ny eny ambanivohitra et Office national de l'environnement, Antananarivo, 22p.

-**Banque mondiale (1987)**, Rapport d'évaluation de la République Démocratique de Madagascar (RDM): « Projet de gestion et de protection des forêts », rapport n° 69946MAGdu 11-07-97, 180p.

-**Bailly, Malvos, Sarrailh, Rakotomanana, Rampanana, Ramanandray, and Wischmeier, (1976)**, The susceptibility to erosion of the soils of Madagascar, Bois et Forêts des Tropiques, no 169, p. 15-58.

-**Birot, (1963)** Contribution à l'étude morphologique des « plateaux » du centre de Madagascar. Madag. Rev. Géogr. p. 2-39.

-**Bonn,(1992)** Précis de télédétection, volume1 : Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 485p.

-**Bourgeat, (1972)** Sols sur le socle ancien de Madagascar, types de différenciation et interprétation chronologique au cours du quaternaire. Mem. ORSTOM, 57, 335p.

-**Brenon, (1952)** Contribution à l'étude pétrographique et géologique des terrains cristallins de Madagascar dans les régions de l'Antsihanaka, de l'Antanosimboangy (hauts plateaux) et dans les bassins de la Bemarivo et de la Fanambana (côte nord-est). Thèse de doctorat, Université de Nancy, 2 tomes, 262 et 273p.

-**Chabaliér, et Rakotomanana, (1996)**, Technique de lutte contre l'érosion. Foibe fikarohana sy fampiroborobona ny eny ambanivohitra (FOFIFA), Antananarivo, 76 p.

-**Dama-Ntsoa, (1951)**, Dictionnaire étymologique de la langue malgache, Tranompirinty loteriana malgache, première partie, 274p

-**Dresh, (1962)**, Sur quelques aspects régionaux des reliefs à Madagascar, Bull. Assoc. Géogr. Français, 309, p. 236-250.

-Flacourt (1907), Dictionnaire de la langue malgache 1000p.

-Itongo, M. (1998) Géomorphologie et prévision des risques d'érosion dans la région de Franceville-Gabon, Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur (Strasbourg) mention géographie physique, 265p.

-Kröner, A., (1991) African linkage of Precambrian Sri Lanka. Geol Rundsch 80, p. 429-440.

-Le Bourdieu,(1972) Accelerated erosion and soil degradation, In : Battistini, R. and Richard-Vindard, G., Biogeography and Ecology in Madagascar, Junk, The Hague, p. 227-259.

-Georges, (1990) Dictionnaire de la géographie, 4 édition, Presses Universitaires de France, Paris, 510p.

-Hoeblich, (1984) L'organisation du relief dans les environs de Tananarive, Tananarive, Mad. Rev. de Géo., N° 43, p. 11-37.

-Hubert,(1927) Destruction d'une flore insulaire. Principaux aspects de la végétation à Madagascar. Mémoire de l'Institut de Recherche de Madagascar, p. 33-52

-Helisoa , 1983, Les lavaka du socle malgache : distribution, évolution, thèse Université Paris I, 334 p.

-Petit, (1965) Les lavakas malgaches : un agent naturel d'évolution des versants. Bulletin de l'Association des Géographe français n°332-333, p.29-33.

- Puech,, Raclot,, (2005) Des images de télédétection pour l'érosion. P. 63-66, in Ratsivalaka, S.,Serpentié, G., De Noni, G. et E. Roose,E. (éd.) Les Actes des Journées scientifiques régionales du réseau Erosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols, Agence universitaire de la Francophonie, Antananarivo, 25-27 octobre 2005, 190p.

-Rabarimanana, (2003) Cartographie des lavaka par télédétection : analyse des facteurs et gestion des espaces ruraux à Madagascar. Télédétection, vol. 3, n° 24, p. 105-130,

-Ramerison, (1998) Application du modèle hydrologique SCS dans le bassin versant de Sasomangana à l'aide d'un SIG et de la télédétection. Mémoire de fin d'études, Département de géologie, Ecole

-Randriamanga, (2005) Application de la télédétection et des SIG dans la gestion des sols d'un bassin versant des Hautes Terres centrales malgaches. P.77-80, in Ratsivalaka, S., Serpantié, G., De Noni, G. et Roose, E. (éd). Les Actes des Journées scientifiques régionales du réseau Erosion et

gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols, Agence universitaire de la Francophonie, Antananarivo, 25-27 octobre 2005, 190p.

-Raunet, (1997) Les ensembles morphopédologiques de Madagascar. Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), Montpellier, 106p. et annexes.

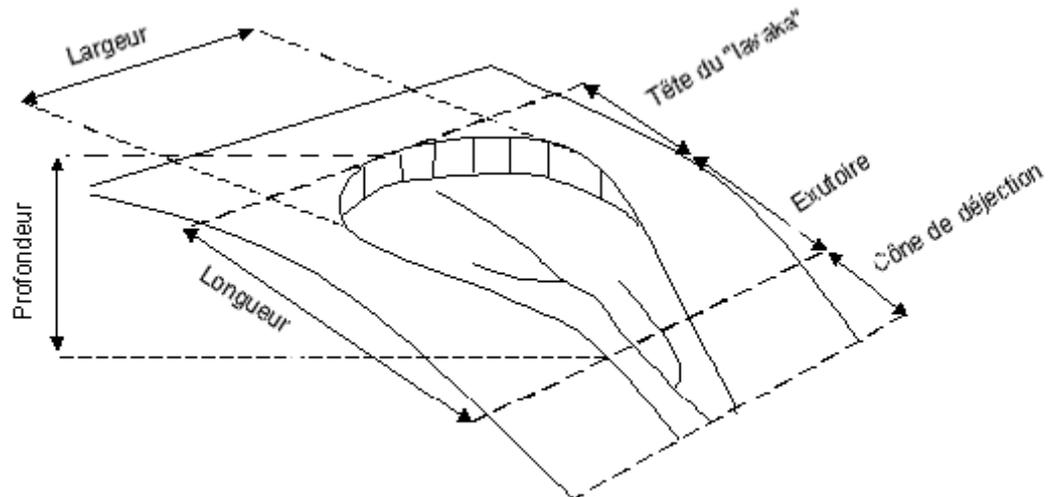
-Riquier, (1954) Etude sur les lavaka. P.169-189, in Mémoire de l'Institut Scientifique de Madagascar (ISM), série D, tome VI, 419p.

-Tricart, (1953) Erosion naturelle et érosion anthropogène à Madagascar, Revue de Géomorphologie Dynamique, n° 5, p. 225-230.

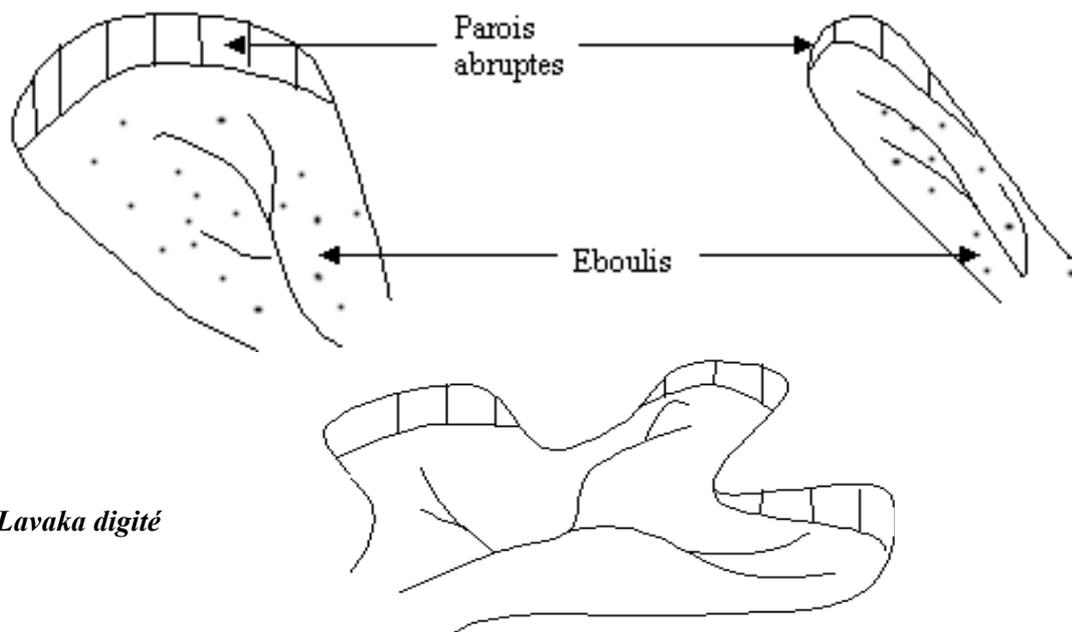
.-Wells, and Andriamihaja, (1993) The initiation and growth of gullies in Madagascar: are humans to blame? Geomorphology, vol. 8, p.1-46.

ANNEXES

Annexe 1 : Différentes parties d'un lavaka



Annexe 2: Lavaka classique de type cirque ou ravin



Annexe 3 : Lavaka digité

- Les « lavaka » en forme de Cirque

Les cirques sont de grand amphithéâtre d'érosion en demi-cercle sur le flanc d'un modelé convexe à substrat sableux, localisé au niveau de la ligne d'inflexion du profil et pouvant affecter plusieurs

collines (*Itongo, 1998*). Dans la littérature, les auteurs s'appuient généralement sur des critères morphologiques pour mettre en évidence les traits particuliers permettant de distinguer les lavaka des formes similaires. Ces traits caractéristiques peuvent être dégagés des diverses études descriptives (vue en perspective, en plan et en coupe).

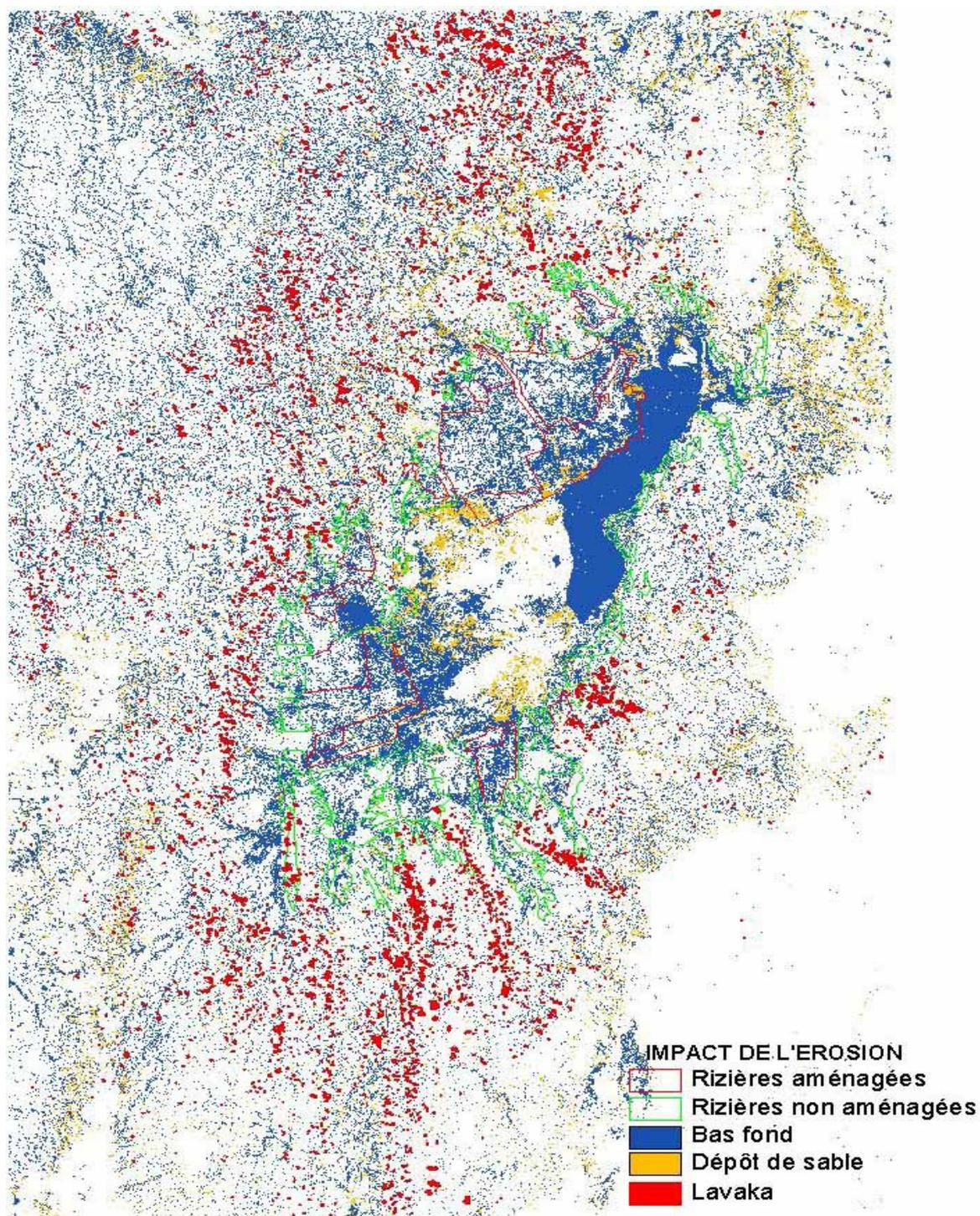
- Les « lavaka » digité

Les bords sont digités suite à l'évolution des rigoles dans les parois du "lavaka". Cette forme est caractéristique du "lavaka" issu du ruissellement superficiel.

- Fissure

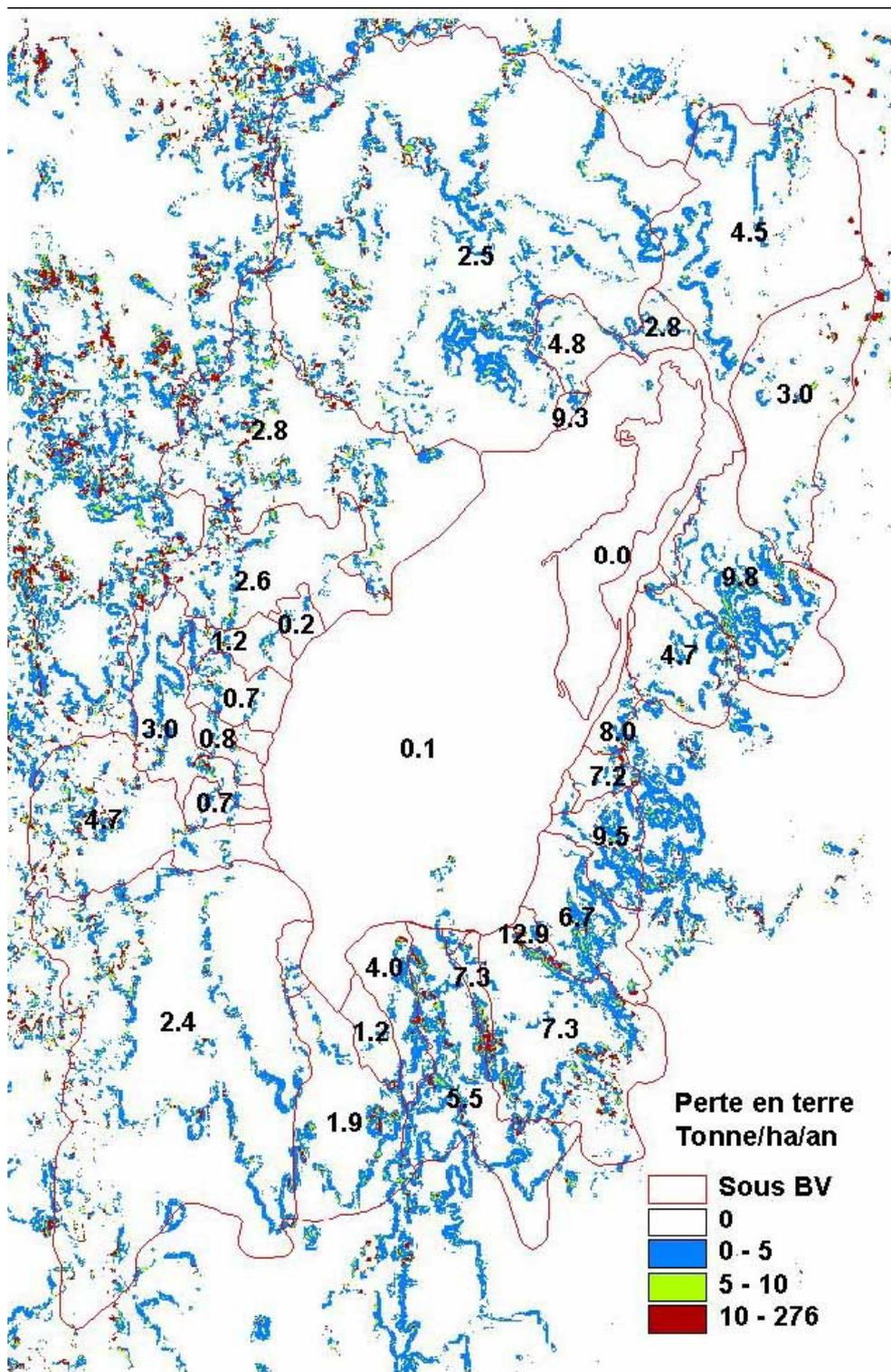
La fissure est une excavation de forme allongée née à partir d'une concentration de ruissellement ou de la présence de matériel de moindre résistance. La fissure peut être profonde de quelques dizaines de mètres quand la concentration est plus importante.

Annexe 4 : Ensablement et l'érosion en lavaka dans la région Alaotra Mangoro



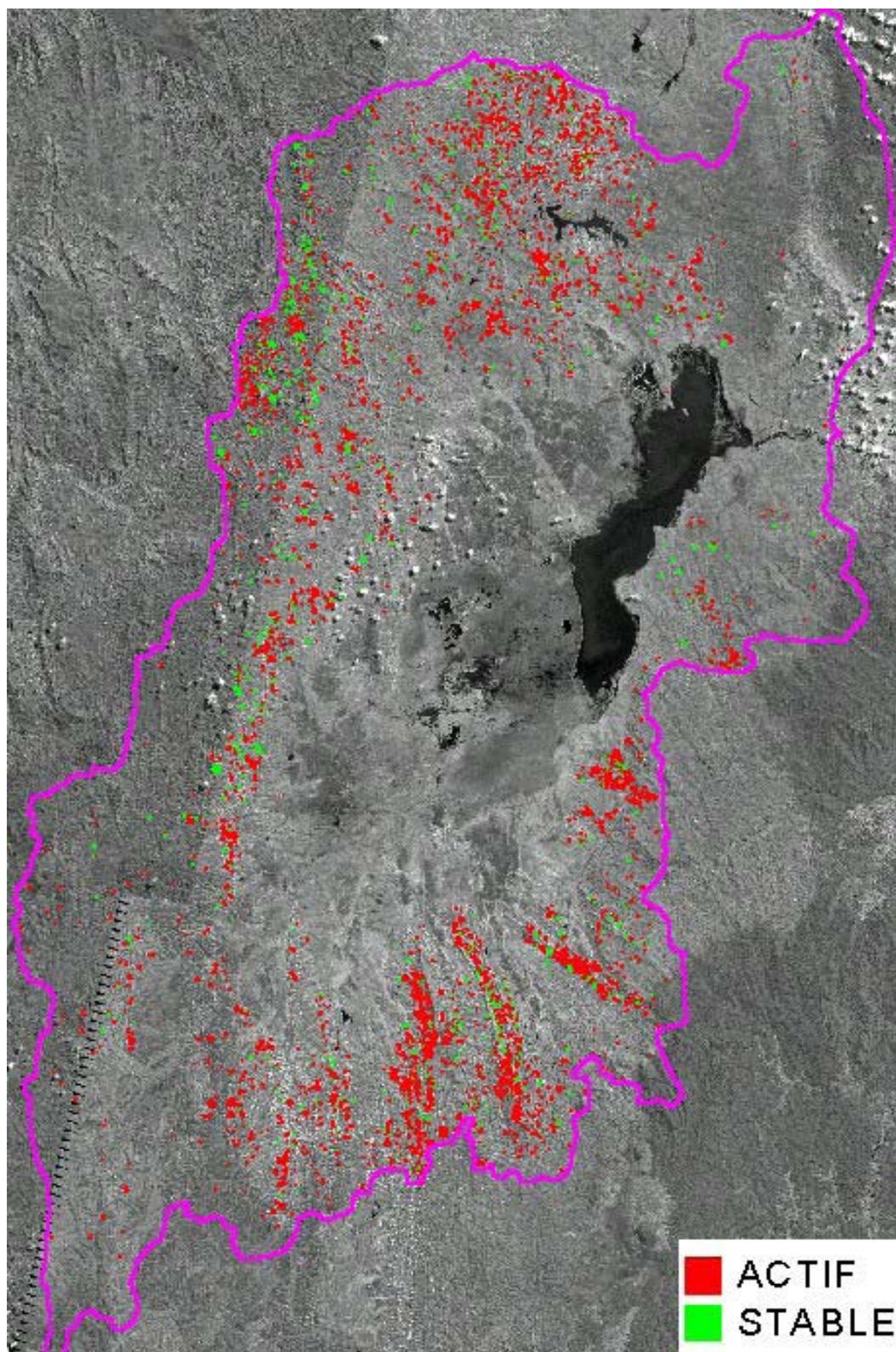
Source : Rabarimanana M.H

Annexe 5 : Erosivité dans la région Alaotra Mangoro



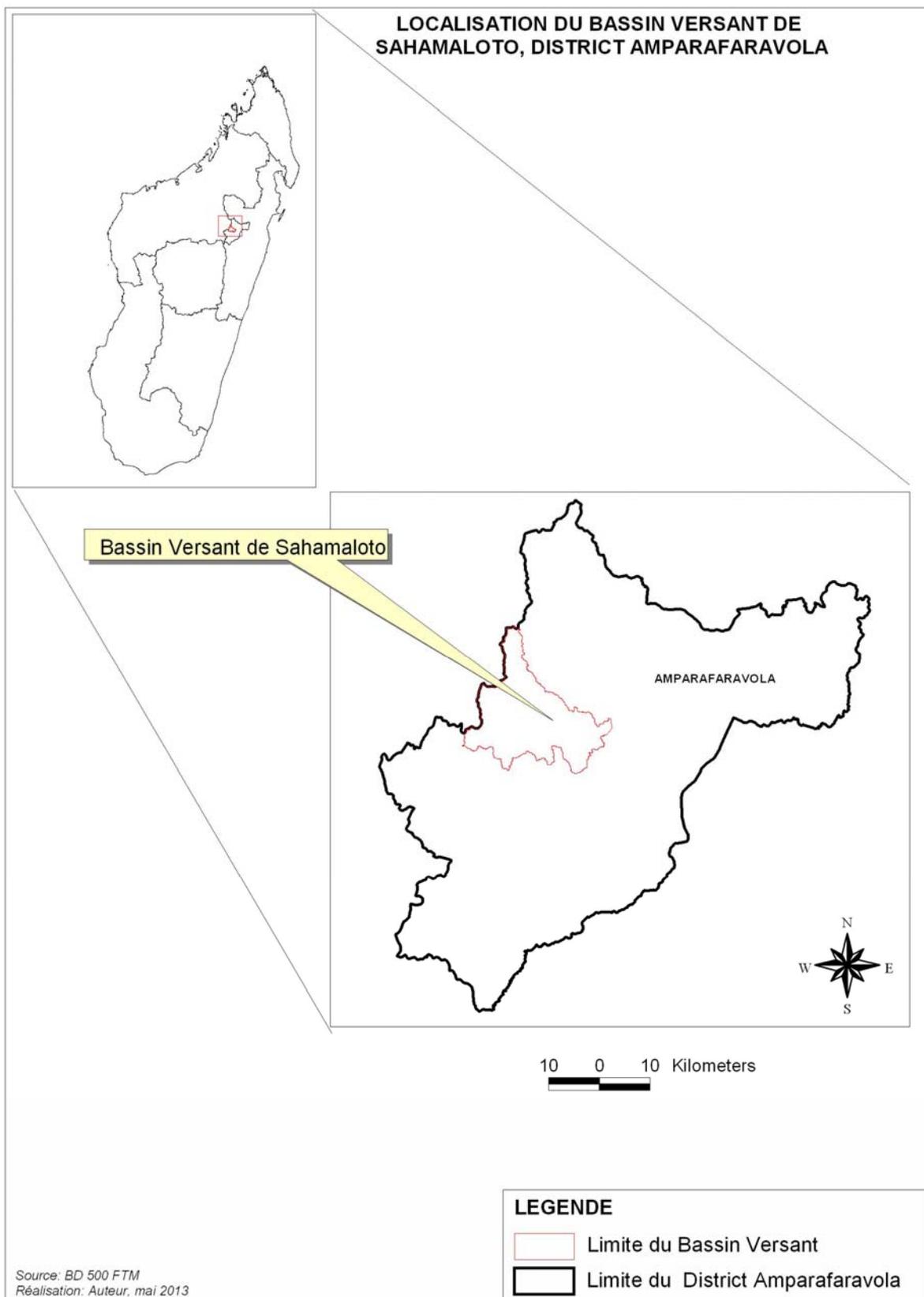
Source : Rabarimanana M.H

Annexe 6 : Situation de l'érosion en lavaka dans la région Alaotra Mangoro



Source : Rabarimanana M.H

Annexe 8 : Situation administrative et données socio économique du bassin versant de Sahamaloto



Région	Alaotra Mangoro
District	Amparafaravola
Commune Rurale	Ambohitrarivo et Ambohijanahary
Nombre de Fokontany	06
Nom du bassin versant	Sahamaloto
Superficie	350 km ²
Localisation	15 km vol d'oiseau d' Amparafaravola
Population	13 805 habitants (recensement 2007).
Densité	80 habitant/Ha
Taille du ménage	06 individus / ménage
Délimitation géographique	<ul style="list-style-type: none"> - au Nord : Commune rurale Ambohijanahary - au Sud : Commune rurale de Sahamamy - à l'Est : le périmètre irrigué de Sahamaloto
Altitude moyenne	778 à 1090m
Climat	climat tropical d'altitude de haute terre centrale malgache et celle de la côte Est sémi humide.
Hydrologie - hydrographie	Les ressources en eau de ce Bassin Versant sont constituées par la rivière de Sahamaloto.
Sols	Le Bassin Versant de Sahamaloto est caractérisé par un sol ferrallitique dégradé

Fokontany	Localisation par rapport à la CR	Distance par rapport à la CR	Hameaux/villages
Ambohitrarivo CR	Chef lieu de Commune	0 Km	Ambohitrarivo- Besarety- Ampasinandrano- Antobilava (04)
Sahamaloto	Nord- Ouest	12 Km	Sahamaloto- Amboanongo- Morafeno- Génie Rural- Andakamena- Bevolomborona- Antanimarina- Antanimbaritsara- Ampananganana (09)
Ambohimandroso	Ouest	08 Km	Andasipapango- Anjirobaka- Ambodivoara Sud- Ambodivoara Nord- Amboasarimasina- Ambohimarina- Mahatsinjo- Ambohimandroso- Analamaitso (09)
Tsaramandroso	Sud- Ouest	05 Km	Tsaramandroso- Ambatoharanana- Maroseranana- Analamisondrotra- Analamanatrika- Marotsipoy Nord- Ambodifano- Marovitsika- Ambodivoasary- Ambohimiarimbola- Faliarivo- Marotsipoy Sud (12)

Beranalahy	Ouest	15 Km	Beranalahy- Antsirakibaorina- Befanihy- Andasilava- Ambohitsoa (05)
Ambohijanahary CR	Chef lieu de commune Est		Ambatomitsangana, Bedamena
Bedamena	Nord Est	30 km	Ambavadiala, Begoavy, Mahatsinjo, Bedamena, Ambolotsiriry, Mandanipilina, Ambongamarina, Antsevazo, Amparihibe, Befoza (10)
Ambatomitsangana	Nord Ouest	35 km	Andilamavo, Ampibasy, Ambatomitsangana, Mahatsinjokely, Antanimbaritsara, Andranolafia (06)

Milieu Naturel :

Relief et Sols:

Les types de sols seront étudiés parallèlement avec les reliefs qui portent. Quatre types de reliefs peuvent être distingués dans la zone de Sahamaloto :

- ✚ Les reliefs ou versants de dissection qui se trouvent sur le pourtour Sud et Ouest du Bassin versant. Ils sont facilement reconnaissables par leur hauteur élevée, leur forte pente et la présence de « lavaka»
- ✚ Les collines arrondies et les croupes convexes. Ce sont des reliefs qui se présentent des convexités sommitales (pente inférieure à 15 %), des versants à pente et des bas fonds étroits, leurs altitudes sont variables.
- ✚ Les collines et croupes à replat sommital. On peut facilement les distinguer par la présence d'un sommet plat, à pente faible à nulle : les versant sont plus redressés, ils sont peu représentés dans la zone
- ✚ Les bas fonds qui se situent dans toutes les zones déprimées.

En récapitulant, on distingue 8 types de sols qui peuvent être reconnus dans la zone :

- ✚ Les sols ferralitiques à structure polyédrique ou sols ferralitiques à structure dégradée sur les collines et croupes à replats sommitaux.

- ✚ Les sols ferrallitiques à structure polyédrique sur les convexités sommitales et versants à pente moyenne à faible (pente inférieure à 15%).
- ✚ Les sols ferrallitiques rajeunis et sols ferrallitiques fortement rajeunis (ou pénévulés) sur les versants à pente moyenne à forte (pente de 15-30%).
- ✚ Les sols peu évoluées d'érosion et fortement rajeunis (ou pénévulés) sur les pentes aigus (supérieur à 30%)
- ✚ Les sols ferrallitiques typiques à structure polyédrique sur les colluvions de bas de pente.
- ✚ Les sols peu évolués d'apport sur les terrasses alluviales.
- ✚ Les sols hydromorphes minéraux et peu ou moyennement organiques des bas fonds. (Randriamboavonjy JC, 2000).

L'érosion des sols peuvent être étudiées dans le bassin versant : celui rencontré sur les reliefs situé en amont, et celui observé au niveau des dépressions (ou bas fonds) partie en aval.

Climat :

Le climat est de type tropical d'altitude et de tropical semi humide de la côte Est de Madagascar :

- La période de pluie est influencée par le climat tropical semi humide de la côte Est : (décembre à mars)
- La période sèche s'étale : (avril à Septembre).

Hydrographie :

Le bassin versant dispose de deux rivières :

- La rivière de Sahamaloto tirant sa source dans la forêt naturelle située dans la commune rurale « Andriamamovoka », elle traverse Beravotavo Fkt Sahamaloto et se déverse dans le barrage de Sahamaloto pour irriguer les rizières de la CR Ambohitrarivo, la CR Anororo et la CR Ambohijanahary avant de parvenir dans le Lac Alaotra.
- La rivière Ankarahara, approvisionnant Ambatoharanana Fkt Tsaramandroso, se déverse dans le Barrage de Tsaramandroso pour irriguer 500 ha de rizières des hameaux de (Marovitsika, Antsakoana, Ambalavary) du fkt de Tsaramandroso.

Il existe beaucoup de plan d'eau et de sources naturelles, qui se trouve en majeure partie dans le fokontany de Tsaramandroso. Ils accouchent des petits affluent de lits d'eaux dans les hameaux de ce même fokontany et dans d'autres fokontany environnants. Ils se répartissent comme suit :

- Source d'eau « Toby II » fokontany Beranalahy

- Source d'eau de Beseva- fokontany Beranalahy, elle est passée par Antsoriarena et se déverse dans le plan d'eau de Tsimahajao – fokontany Tsaramandroso et approvisionne le barrage de Sahamaloto.
- Plan d'eau de Managanoro- fokontany Tsaramandroso, il irrigue les rizières de Marotsipoy-fokontany Tsaramandroso.
- Plan d'eau d'Amparihitsidisaka –fokontany Tsaramandroso se déverse dans la rivière d'Ankarahara
- Plan de Befoza-fokontany Tsaramandroso, il irrigue les rizières d'Ambodivoara et de Tsimahajao avant d'approvisionner le Barrage de Sahamaloto.
- Plan d'eau de Befanjana-fokontany Tsaramandroso, il irrigue les rizières de Befanihy et d'Ambodivoasary-fokontany Tsaramandroso avant de se déverser dans le barrage de Sahamaloto
- Plan d'eau de Tsimahajao, tirant sa source à Ambohipaniry, cette source irrigue les rizières d'Ambodivoasary-fokontany Tsaramandroso et se déverse dans le barrage de Sahamaloto
- Plan d'eau de Begavo, il irrigue les rizières d'Analamanatrika-fokontany Tsaramandroso.

La végétation :

Dans l'ensemble, Le Bassin Versant de Sahamaloto est faiblement couverte de végétation. On remarque de l'ancien reboisement l'Eucalyptus en quantité éparpillés sur les flancs des collines et en majeure partie concentré dans la partie du Sahamaloto et Tsaramandroso. Des forêts d'eucalyptus se dessinent sur les flancs de tanety comme limite de propriété, par contre les arbres fruitiers se développent autour du village.

Le vestige de forêts artificielles du périmètre de reboisement de Sahamaloto installées par le Service Forestier entre 1968 et la fin des années 90 est estimé actuellement à quelques 4 000 ha (soit près de 11,5% de la surface originelle reboisée)¹ ; la majorité des fragments (essentiellement de plantations d'Eucalyptus sp) se concentrent dans les fokontany d'Ambohimandroso et de Beranalahy, autour des villages de Mahatsinjo (localisation de l'ancien chantier forestier) et d'Antsirakibaorina ; ces reboisements sont intensivement exploités (pour l'approvisionnement en bois de service, en bois d'œuvre et en charbon de la majorité des villages des communes de la zone). Ils sont très fragmentés et se présentent la plupart du temps sous forme de taillis.

Le reliquat de forêts naturelles situées en tête de vallée et dans les bas-fonds de la partie amont du bassin versant ; certains boisements naturels sont aussi constatés aux alentours de villages. Par exemple, pour le village d'Ambatomitsangana, le boisement naturel a été épargné dans le but de

protéger le versant sur lequel s'est bâti le village. Il a également permis le développement de pratiques d'agroforesterie (culture de banane, café).

Les reboisements actuels entrepris au niveau des communes, des fokontany et des diverses associations de producteurs, y compris les particuliers. Compris les particuliers. Les communes et les fokontany ont défini des zones de reboisement en dehors du périmètre de reboisement du Service Forestier. Le but premier de ces reboisements est de protéger les terres de culture de bas de pente et du bas fond contre l'érosion en nappe des tanety. Pour les localités au sein desquelles beaucoup de « points noirs » d'érosion sont constatés (ravinement avec ou sans éboulements apparents), des reboisements à moyenne échelle ont été effectués par le Service Forestier dans les années 90.

Milieu humain :

Origine du peuplement :

L'effectif de la population de la zone du projet Bassin versant de Sahamaloto est connu avec assez de précision grâce au recensement annuel et au niveau du fokontany et communes Les occupants sont composés par des immigrants originaires des hautes terres centrales malgache (Vakinankaratra et Betsileo), et venant d'autres région comme les Antandroy ; Betsirebaka, Bezanozano, Sakalava.

Structure de la population :

Le nombre total de la population pour chaque fokontany (Sahamaloto, Beranalahy, Ambohimandroso, Tsaramandroso, Bedamena, Ambatomitsangana) est de **13 805**

On peut y trouver les ethnies suivantes : merina, sihanaka, betsileo, antandroy ainsi que des Betsirebaka qui constituent la majorité.

Fokontany	Nombre de population
Sahamaloto	3923
Bernalahy	1608
Ambohimandroso	3225
Tsaramandroso	4232
Ambatomitsangana	315
Bedamena	502
Total	13 805

Source : PCD Ambohitrarivo, Ambohijanahary 2007

Mobilité de la population et migration :

Plusieurs immigrants provenant de différentes régions de Madagascar cohabitent dans le Bassin Versant de Sahamaloto et exercent diverses activités entre autres : agriculture, le commerce, l'artisanat, la briqueterie et des travaux rémunérés mensuellement comme le gardiennage

C'est surtout pendant la période de repiquage et de la récolte de riz que l'on assiste à cette migration massive qui dure en moyenne 3 à 4 mois pour les salariés ponctuels. Ce sont les merina, des Betsileo ainsi que des Antandroy qui constituent la majorité de ces immigrants.

Organisation sociale:

Dans la société de la Bassin Versant de Sahamaloto, l'organisation sociale est bien établie. Le respect des " Tangalamena " existe toujours même s'il s'est atténué. Ces " Tangalamena " se chargent de conserver la tradition de la société ; Ils sont les médiateurs en cas de conflit social. Ils sont également les portes - paroles en cas de décès ou autres événements familiaux. Les personnes âgées de plus de 50 ans ne participent plus au travail. S'il y a un événement comme le " Feraomby ", ou des travaux de constructions de pont, puits, barrage, ils se chargent de les surveiller.

Actuellement, le respect des " Tangalamena " est atténué à cause de la connaissance dont l'accès est facile aujourd'hui. Celle-ci incite les jeunes à être conscients et à être responsables.

Activités économiques :

Agriculture :

La riziculture : système de riz irrigué de bas fonds

Ce système de culture est pratiqué dans les fonds des vallées alimentées par des sources permanentes de débits variables. C'est le domaine du riz irrigué de saison des pluies. L'ensemble du bas fond est aménagé d'amont en aval en un réseau de canaux et de diguettes. La campagne rizicole débute en décembre par un labour effectué généralement à la main (« *Angady* ») car le sol instable est peu propice à la mécanisation (motoculteur ou bœufs). Parallèlement, sont installées les pépinières. Les variétés utilisées sont traditionnelles : « *Rojofotsy* » bien que d'une productivité moindre est préférée à « *Vary Dista* » d'un cycle plus long et donc plus risqué en cas de retard dans le calendrier agricole. Le repiquage a lieu en janvier. Il est plus ou moins étalé dans le temps en fonction des ressources de l'exploitant pour payer la main d'œuvre et est réalisé selon les cas en ligne ou en foule (moins cher). Comme dans la plaine, la fumure organique est réservée à la pépinière et aux « tanety » notamment

aux parcelles semées en riz pluvial. Lorsque le débit des sources en tête de vallons le permet, une contre-saison de riz peut être effectuée à partir du mois de juillet (préparation des pépinières) avant la saison froide. Les variétés utilisées sont différentes (« *Manafimboa* » et « *Befaingo* »). La récolte a lieu en décembre. Cette contre-saison de riz n'est pas réalisée systématiquement car le calendrier cultural est très serré. La nature des sols permet aussi de faire une contre saison de pomme de terre ou de haricot, cultures moins exigeantes en eau. Les bordures de canaux et la partie amont des vallées, à proximité de la source sont valorisées par des plantations diverses où prédomine le bananier.

- Techniques :

La riziculture de la Bassin Versant de Sahamaloto voit la cohabitation de deux pratiques ; la traditionnelle (repiquage en foule, sarclage à la main) et la moderne (repiquage en ligne, sarclage à la machine).

A propos du système de riziculture intensive (SRI), il paraît que les paysans ont abandonné la pratique du fait de manque de suivi périodique de la part des vulgarisateurs agricole.

- Contraintes :

- Le non maîtrise de l'eau constitue un handicap majeur à la riziculture du Bassin Versant. Elle peut se manifester sous plusieurs formes :

- engorgement de surfaces cultivables et cultivées
- assèchement de la rizière du fait du mal répartition de l'eau
- ensablement

- L'insuffisance des matériels agricoles

- Le manque de moyen financier (les intrants et les mains d'œuvre agricoles coûtent chers)

- La destruction du barrage de Sahamaloto a un impact majeur sur la riziculture

- Rendement :

Généralement, le rendement varie **de 2 à 2,5 tonnes** à l'hectare en moyenne.

La plupart de la production rizicole estimée par an dans le bassin versant : **50%** consommée ; **40 %** vendue et **10 %** convertie en réserve et semence.

- Utilisation de la production :

- La culture du riz est destinée principalement à l'autoconsommation familiale. Il semble que peu de ménages pourront avoir accès à l'autosuffisance en riz

sans recourir à l'achat. Généralement, l'épargne est épuisée au mois d'août à septembre.

- Le riz ne se catégorise pas au même rang que la culture de rente. Il est commercialisé seulement afin de s'approvisionner en produit de première nécessité (PPN).
- Le riz ne peut pas être séparé de l'événement culturel malgache entre autre le « famadihana » au cours duquel une famille nourrit ses invités du riz accompagné de viande très grasse.

- Calendrier cultural du riz :

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
Préparation de la pépinière :												
- Canalisation	↔											
- Labour			↔									
- Semis				↔								
Repiquage					↔							
Sarclage							↔					
Récolte											↔	

La culture de contre saison :

Les principales cultures de contre saison qui existent sont des cultures maraîchères : tomates, concombres, et pomme de terre.

- Calendrier cultural :

En ce qui concerne le calendrier cultural, la culture de contre saison se fait lorsque les rizières ne sont plus occupées par la riziculture.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Préparation du sol					←→							
Semis					←→							
Entretien							←→					
Récolte												
	← Saison →				← Contre saison →					← Saison →		

Le calendrier varie suivant le type de culture mais également la contre saison débute en mois de Mai et se termine en mois de septembre.

- Problèmes :

Comme l'on a indiqué précédemment, les problèmes de la culture de contre saison sont nombreux, mais se manifestent surtout dans :

- l'écoulement de produit
- la conservation : il est quasiment impossible de stocker les produits
- la lutte antiparasitaire (maladies, insectes nuisible ...)
- l'insuffisance de fumure et intrants agricoles (semence au coût élevé)

L'insuffisance des matériels de production, exemple la pulvérisateur, ainsi que les insecticide sont répandus à la volée à l'aide des tas d'herbe, ce qui provoque une perte des importante des produits utilisés.

La culture de manioc, maïs, haricot : sur bas de pente, un système généralisé.

C'est le système de culture le plus répandu dans toutes les zones de tanety de l'Ouest du Lac

Alaotra. Seul le bas de pente est défriché sur une faible hauteur. La parcelle est soigneusement protégée du ravinement par un canal de ceinture perpendiculaire à la pente permettant d'évacuer les eaux de ruissellement en provenance du bassin versant vers les rizières en contrebas. Le travail du sol a lieu en décembre après celui des rizières de bas-fond toujours prioritaires. Le manioc est généralement planté en association avec le maïs et le haricot. Le semis de maïs est légèrement décalé dans le temps (une semaine) car sa croissance est plus rapide. Selon les difficultés d'approvisionnement en semences (problème de trésorerie) le manioc peut être planté seul. Après la récolte, les résidus de culture sont laissés sur place. Le manioc reste en terre une année entière pour être replanté de suite après sa récolte. Il n'y a pas de rotation des cultures et en règle générale aucune période de jachère intercalée (culture en continue).

La culture pluviale sur faible pente : un système peu développé

La culture du riz pluvial est très peu étendue. Elle se pratique sur les rares portions de tanety en pente faible ou sur les quelques terres en terrasse qui surplombent les bas-fonds (baïboho). Le peu de fumier disponible est réservé au riz pluvial. Le riz entre en rotation annuelle avec une légumineuse (arachide ou voandzou) en intercalant parfois une sole de manioc. La principale contrainte au développement de cette culture et qui limite son extension est le sarclage très exigeant en travail.

d- La culture d'arachide et le voandzou

L'arachide et le voandzou, appartenant dans la famille des papilionacées, s'adaptent et se développent très bien dans la partie en amont du Bassin Versant de Sahamaloto.

On peut les trouver sur les tanety, quelque fois dans les Baïboho ; mais en faible surface. Le cycle végétatif dure pendant 100 à 120 jours allant du mois de janvier au mois d'avril.

Certains villages les considèrent comme source de revenu : ils sont vendus soit en coque entassés dans un sac soit décortiqués (pour les arachides de bouche)

L'évacuation des produits est la principale contrainte du développement des cultures d'arachide et de voandzou dans cette région : l'infrastructure routière ne permet pas aux paysans d'écouler leurs produits ; de plus l'envahissement des spermocécées sur la culture entraîne une démotivation des gens à faire une extension de culture.

L'élevage :

L'élevage bovin :

L'élevage bovin constitue une activité essentielle de l'exploitation agricole dans le Bassin Versant de Sahamaloto. En effet les bœufs :

- sont le 1^{er} moyen de travail qui puisse réduire le temps de travail et permettre l'intensification de l'agriculture et son extension
- assurent le transport des intrants vers les champs
- procurent aussi l'essentiel de la fertilisation agricole
- permettent l'évacuation de la récolte vers les marchés
- constituent une source de revenus pour certains paysans par la location des attelages pour le travail du sol ou pour le transport des produits et par la vente des bêtes âgées
- forment une épargne disponible en cas de besoins d'argent

Forêts

La plupart des forêts du Bassin Versant sont issues des reboisements, soit faites par des Services des eaux et Forêts (estimé à 12000 ha).

Les Eucalyptus et les Grevillea sont les essences les plus rencontrées, elles se localisent surtout dans les tanety, dans les zones impropres aux cultures.

Période de plantation :

Actuellement l'activité de reboisement n'est pas la principale préoccupation des paysans, même s'ils sont conscients de la gravité de l'insuffisance de bois utilisable pour les besoins quotidiens. Les périodes de plantation se coïncident toujours avec la période des cultures de champs. Toute fois on remarque des petites plantations annuelles à l'échelle individuelle et scolaire au niveau de chaque fokontany.

Utilisations des bois :

Les peuplements d'Eucalyptus qui occupent la plus grande partie des formations forestières du Bassin Versant de Sahamaloto sont sous régime taillis avec une révolution de 2 ans. Les arbres sont exploités en bois d'énergie sous forme de charbon ou de bois de chauffe, les arbres qui atteignent une dimension plus grande sont utilisés pour les clôtures des parcs des bœufs et pour la toiture des maisons.

Contraintes des plantations :

Les feux de brousse sont le principal blocage du développement de reboisement et de la culture en générale dans cette région ; les rejets et les nouvelles plantations en sont les premières proies.

Les terrains cultivables deviennent de plus en plus rares dans cette région, les gens voudraient reformer ou changer les terrains occupés par les reboisements, pourtant ces derniers laissent les sols difficiles à cultiver. Par ailleurs les terrains domaniaux pouvant constituer des réserves pour le reboisement sont difficiles à trouver : la plupart des terrains présentent des traces d'occupation.

Pêches

La pêche n'est pas encore développée dans les environs du Bassin Versant. Quelques paysans effectuent de la pisciculture en étang et de la rizipisciculture. Pour le moment, les gens s'adonnent plutôt à la pêche au filet dans le Lac Alaotra, dans le barrage de Sahamaloto et Tsaramandroso.

Les autres activités :

Ils existent quatre decortiqueries dans les environs du Bassin Versant de Sahamaloto :

.- 03 decortiquerie à Sahamaloto

- 01 decortiquerie à Tsaramandroso

Adduction d'eau potable :

Le quasi inexistence d'eau potable dans les environs du Bassin Versant de Sahamaloto. Généralement, les ménages détiennent leur propre puits.

Malgré cet effort considérable, l'approvisionnement en eau potable reste une contrainte majeure pour le développement du Bassin Versant de Sahamaloto.

Santé :

Le fokontany de Tsaramandroso dans le Bassin Versant de Sahamaloto est dotée d'un dispensaire FLM-SALFA à Mahatsinjo mais l'infrastructure sanitaire de base comme **CSB II** est installé dans le chef lieu de commune Ambohitrarivo.