Télédétection, 2003, vol. 3, n° 2-3-4, p. 131–149
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

ÉTUDE PAR TÉLÉDÉTECTION DES GÉORISQUES DANS LA RÉGION D'ANJOJOROBE, MADAGASCAR

SIMONE RANDRIAMANGA*[1], CLAUDE COLLET[2], SOLOFO RAKOTONDRAOMPIANA[3], et LOVA TAHINA RANDRIANARISON[3].

[1] *Centre de recherche en environnement et aménagement*
Département de géographie, Faculté des lettres et sciences humaines, Université d'Antananarivo
Boîte Postale 907, Antananarivo 101, Madagascar.
Téléphone : (261) 20 22 235 63 ; télécopieur : (261) 20 22 318 15

[2] *Institut de géographie, Unité de géomatique, Université de Fribourg, Fribourg, Suisse*
Téléphone : +41 26 300 90 23 ; télécopieur : +41 26 300 97 46

[3] *Institut et observatoire de géophysique d'Antananarivo,*
Laboratoire de géophysique de l'environnement et de télédétection, Université d'Antananarivo,
Boîte Postale 3843, Antananarivo 101, Madagascar.
Téléphone : (261) 20 22 235 63 ; télécopieur : (261) 20 22 215 53
Courriel [(1,2,3)] : baratsiv@dts.mg ; claude.collet@unifr.ch ; ioga@syfed.refer.mg

(soumis le 22 avril 2002 ; révisé le 29 juillet 2002 ; accepté le 11 décembre 2002)

Quels sont les processus qui caractérisent la formation d'un lavaka, une forme d'érosion en ravine typique des Hautes-terres malgaches et dans quelles mesures peut-on quantifier et modéliser le phénomène par l'utilisation des photographies aériennes, des images satellitaires et des SIG ? Telle est la problématique des travaux menés dans le cadre d'une recherche des Universités d'Antananarivo, de Fribourg et de la Réunion, dont l'objectif est de proposer un diagnostic et des mesures correctives. On présente ici les résultats de la première phase du programme. Son objectif est d'identifier les lavaka, d'en caractériser les processus d'érosion et d'en étudier l'évolution. La zone d'étude est localisée dans le bassin versant de la Sahasarotra, un sous-bassin du Jabo, au nord d'Antananarivo. La démarche pluridisciplinaire mise en œuvre combine l'observation, l'analyse et les mesures de terrain, avant et après la saison des pluies. Elle se fonde sur le traitement numérique des données de télédétection et l'intégration de ces informations dans une base de données géoréférencées. Les résultats actuels de l'étude en cours montrent une identification possible des lavaka à partir des photographies aériennes et par la fusion d'images multibandes et panchromatiques du capteur ETM+ de Landsat-7. Le recours au système d'information géographique a permis un suivi satisfaisant de l'évolution des lavaka ainsi que la mise en évidence de différents paramètres caractérisant le processus d'érosion par lavaka. Du point de vue thématique, le bassin versant de la Sahasarotra est inégalement affecté par les lavaka. Ces derniers prédominent dans la partie nord-ouest, dans la série à amphibole.

Mots-clefs : Lavaka ; Madagascar ; télédétection ; géorisques ; SIG ; Landsat.

GEORISKS MAPPING BY REMOTE SENSING IN THE AREA OF ANJOJOROBE, MADAGASCAR

What are processes characterizing lavaka development, an erosion in gully shape frequently meet in the Malagasy high land and how can we quantify and modelize this phenomenon by using remotely sensed images integrated into a GIS ? Such is the problematic of the study conducted as a shared research action between the three Universities of Antananarivo, Fribourg and La Réunion. The final goal of the studies is to propose a diagnosis and corrective measures. This present paper shows major results in the first step of the program. The objective is to identify lavaka and to characterize erosion processes in order to study their evolution. The study area is located inside the watershed of Sahasarotra included in the large watershed of Ikopa in the north of Antananarivo. The methodology and sources of information are multidisciplinary. They include field observations, analysis and field measurements and remotely sensed data. Field measurements were collected before and after the rainy season. All the data acquired and preprocessed were integrated into a geographical data base. The current results show a possible identification of lavaka based on aerial photographs and by fusion of multispectral bands with panchromatic band of ETM + Landsat-7 system. The use of GIS allows to efficiently follow-up the evolution of lavaka and to underline different parameters characterizing the lavaka erosion process. At the thematic level, the watershed of Sahasarotra is unequally affected by the lavaka. They prevail in the North western part of the watershed where the substratum is occupied by amphibole set.

Keywords : Lavaka ; Madagascar ; remote sensing ; georisks ; GIS ; Landsat.

* Correspondant principal

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

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 *et al.*, 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 (Chabalier 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 du lac Alaotra au centre-est, d'Anjojorobe au centre 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. C'est dans ce sens que ce programme a été élaboré dans le cadre d'une action de recherche partagée (ARP) de l'Agence universitaire de la Francophonie, pour tenter de quantifier les phénomènes d'érosion par les lavaka et de les modéliser afin de proposer des mesures correctives.

1.2. Problématique

La plupart des travaux effectués jusqu'ici sur les lavaka, se sont basés sur l'utilisation des photographies aériennes. Or, la télédétection satellitaire peut contribuer largement au besoin en matière de répartition des lavaka. Les images satellitaires apportent en effet des informations riches, précises et à jour. Quant aux systèmes d'information géographique (SIG), peu parmi ces travaux en a fait référence. Il serait intéressant d'étudier les possibilités qu'offre l'outil télédétection à extraire le paramètre lavaka. Il serait aussi opportun d'évaluer l'apport d'un couplage entre photographie aérienne et image satellitaire pour mieux caractériser le paramètre lavaka. Le recours aux SIG pourra faciliter l'analyse intégrée des données géoréférencées. Cette étude se présente ainsi comme une opportunité d'examiner le potentiel des méthodes de la télédétection combinées avec celles d'un SIG pour quantifier et modéliser le processus d'érosion par les lavaka. C'est dans ce sens que nous avons été amenés à poser notre problématique. Quels sont les processus qui caractérisent la formation d'un lavaka, une forme d'érosion en ravine typique des Hautes-terres malgaches, et dans quelles mesures peut-on quantifier et modéliser le phénomène par l'utilisation des photographies aériennes, des images satellitaires et des SIG ?

1.3. Objectifs

Les objectifs généraux du programme de recherche sont de caractériser les différents paramètres qui influent sur l'érosion par les lavaka, de quantifier le phénomène d'érosion pour en mesurer l'impact et d'en modéliser les processus pour prévenir les effets. L'objectif d'application est d'élaborer des stratégies d'adaptation en matière de pratiques agricoles. L'objectif final est de proposer des mesures correctives au problème des lavaka. Mais, dans cet article, on ne présente que les résultats de la première phase du programme. Celle-ci vise à la mise en place du protocole de mesure d'érosion, la réalisation des premières mesures sur le terrain avant et après la saison des pluies, ainsi que les premiers traitements des données satellitaires. Le recours à l'interdisciplinarité répond au besoin de cerner le problème sur tous les points. La contribution du forestier est d'analyser la colonisation végétale et son impact sur le milieu. Celle du géographe vise la compréhension des rapports homme-milieu naturel. Les études pédologique et géologique visent à déterminer les caractéristiques de terrain favorables au processus d'érosion. Par la géophysique, on cherche à caractériser le mécanisme de l'érosion par l'étude physico-chimique et mécanique des couches de sol aux alentours immédiats des lavaka ainsi que celle de la nature et de la structure des terrains. Les objectifs spécifiques de cet article sont de caractériser certains processus d'érosion observés sur le terrain, d'identifier les lavaka par couplage des photographies aériennes avec les images Landsat et d'en étudier l'évolution entre 1949 et 2000.

1.4. Hypothèses de travail

Notre hypothèse de travail est que les paramètres physiques du milieu sont considérés comme les principaux facteurs qui déterminent la genèse d'un lavaka. Les conditions géomorphologiques, géologiques, climatiques, hydrologiques et la végétation sont alors primordiales. D'autres paramètres peuvent entrer en jeu, telles les caractéristiques des sols ou l'action d'un agent érosif. En ce sens, l'action anthropique ne peut pas être négligée.

2. ZONE D'ÉTUDE

La région d'Anjojorobe fait partie du domaine du centre-est de Madagascar selon la classification phytogéographique de la végétation établie par Gaussen (1964). D'après les travaux du

Département de géographie d'Antananarivo (2001), elle est limitée à l'est par le fossé du Mangoro, à l'ouest par la surface d'érosion d'Ankazobe d'une altitude supérieure à 1 650 m, au sud par la surface d'érosion de Talatanivolonondry située entre 1 340 et 1 350 m et au nord par le plateau de l'Anjafy. C'est une région qui repose sur un substratum rocheux du socle ancien, d'âge précambrien et qui appartient au système de graphite du groupe d'Ambatolampy. La granitisation générale du socle a entraîné la mise en place de migmatites granitoïdes associées à des granites migmatitites (Rantoanina, 1966). Le processus d'érosion régressive a entraîné l'évolution des reliefs de la partie ouest en surface d'aplanissement du niveau II, méso-tertiaire ou en surface dérivée de la surface I du Tampoketsa d'Ankazobe. La partie orientale est caractérisée par les accidents tectoniques prolongeant l'escarpement de l'Angavo. Le sol ferrallitique résulte de l'altération des roches du socle par processus d'hydrolyse constituant des altérites très profondes . Le climat est de type tropical d'altitude à saisons contrastées : chaude et humide de novembre à avril, sèche et fraîche d'octobre à mai. La végétation est essentiellement une forêt de reboisement au sommet des collines, quelques reliquats de forêt primaire dans les zones abritées et la savane partout ailleurs (Randriamanga, 2001). C'est dans cette région que se situe le bassin versant de la Sahasarotra, un sous-bassin du Jabo localisé à une centaine de kilomètres au nord d'Antananarivo (figure 1). C'est une région de collines convexes ayant pour altitude moyenne 1 377 m. Le point culminant se situe au sud à 1 590 m d'altitude, la partie centrale est moins élevée, avec 1 270 m. Le réseau hydrographique est bien hiérarchisé. La lame d'eau annuelle recueillie est de 1 200 mm. La végétation est essentiellement constituée de pseudo-steppe. Cette zone a été choisie pour plusieurs raisons : l'existence d'un nombre important de structures en lavaka actives, l'accès facile du site à n'importe quel moment de l'année depuis Antananarivo et le fait que cette zone fait partie des régions malgaches qui font l'objet d'une surveillance sismique.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1. Données utilisées

Nous avons disposé d'une imagette du capteur TM de Landsat, corrigée géométriquement, du 25 septembre 1994 avec trois bandes spectrales TM3, TM4 et TM5 (figure 2). Nous avons en outre acquis une image ETM+ de Landsat-7 (159/073) datée du 12 mai 2000 comptant sept bandes spectrales TM et une bande panchromatique. Nous avons travaillé sur dix couples stéréoscopiques de photographies aériennes de 1949 à l'échelle du 1 : 40 000. Nos travaux se sont également basés sur divers documents cartographiques : cartes topographiques de base feuille P46 de 1969 et Q46 de 1954 (Foiben Taosaritany Madagascar, 1969, 1954) et cartes géologiques P46 de 1966 et Q46 de 1965 (Service géologique, 1965, 1966), toutes à une échelle 1 : 100 000. Ces données ont été complétées par des mesures GPS, des mesures géophysiques (sondages et panneau électrique), des analyses de sols et des observations sur le terrain.

3.2. Matériel et logiciel

Le matériel utilisé est un stéréoscope à miroirs WILD ST4 avec une lunette de grossissement 3X et un AVIOPRET APT2 avec un grossissement 15X pour la vision stéréoscopique des photographies aériennes. Un instrument de positionnement GPS GARMIN muni d'un puissant récepteur à 12 canaux parallèles a permis la localisation des sites de mesure et d'observation. On a eu recours à un résistivimètre RMCA4 pour la prospection électrique des sols depuis la surface jusqu'à quelques mètres de profondeur. Les logiciels ARCVIEW3.2, IDRISI32 et MAPINFO4.0 ont été utilisés dans le cadre du traitement d'image et des données géoréférencées. Des logiciels d'inversion de données ont été utilisés pour produire les modèles géo-électriques.

3.3. Méthodologie

Nous pensons déduire la part de chacun des facteurs conditionnant la genèse des lavaka sur la base d'une recherche interdisciplinaire. Nous comptons en effet faire intervenir les disciplines scientifiques suivantes : géographie pour la considération géographique du milieu, géologie et la foresterie pour l'analyse, les mesures et les observations sur le terrain. La géophysique apportera sa contribution par ses mesures de surface pour modéliser la structure du sous-sol. Ainsi, il sera possible de déterminer les paramètres caractérisant le phénomène des lavaka et de faire des propositions générales et pratiques pour lutter contre l'érosion.

3.3.1. Démarche mise en œuvre

L'outil télédétection a servi aux diverses investigations. La démarche scientifique consiste à observer et à analyser sur le terrain l'érosion avant et après la saison des pluies. La démarche pluridisciplinaire s'appuie sur celle des géographes, des géologues, des forestiers et des géophysiciens. Les mesures *in situ* de l'érosion et celles des propriétés mécaniques des sols ont été faites en laboratoire. Puis on a procédé au traitement numérique des images de télédétection et à leur intégration dans un système d'information géographique.

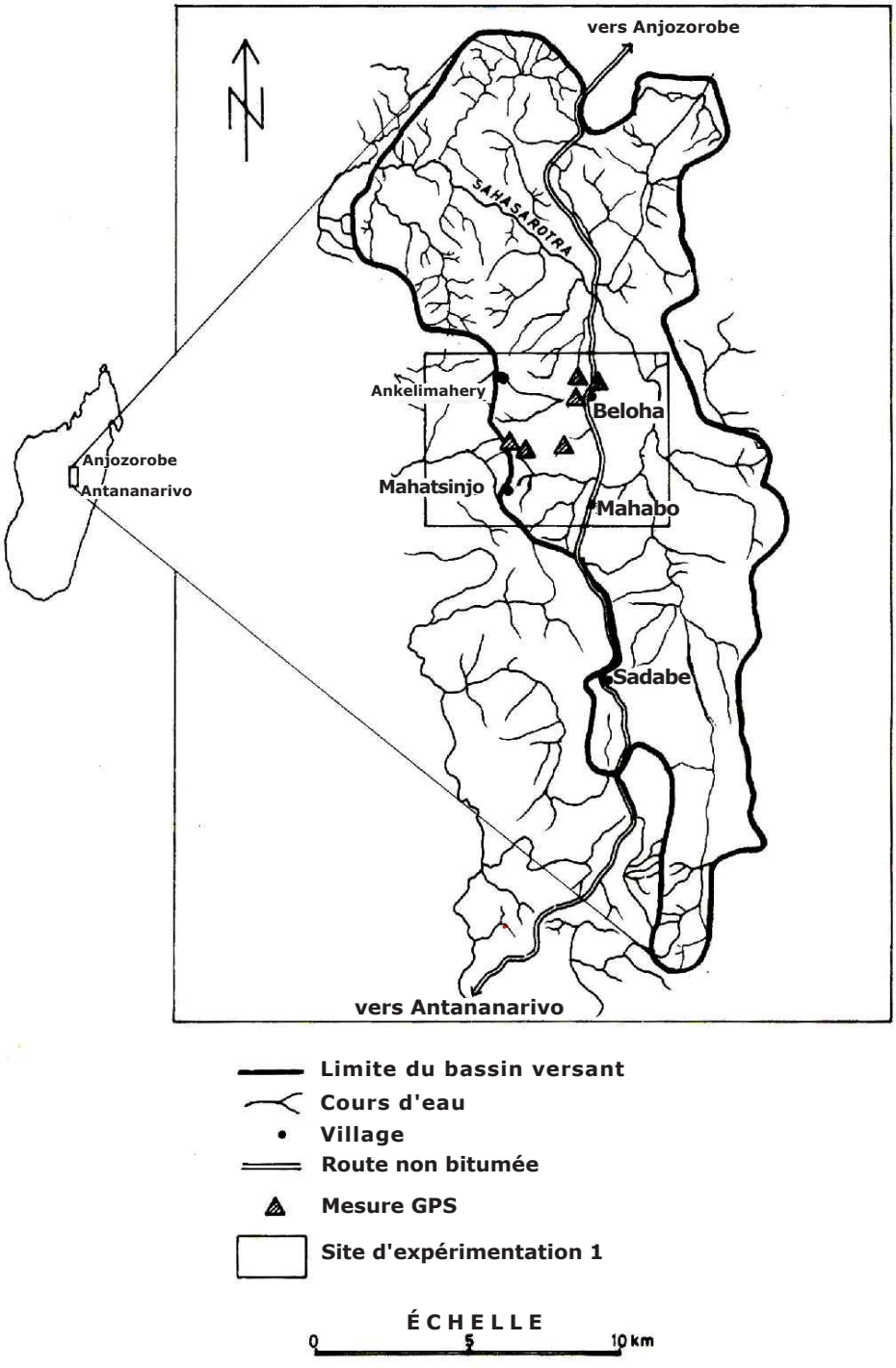


FIGURE 1 Localisation du bassin versant de la Sahasarotra. *Localisation of the Sahasarotra watershed.*

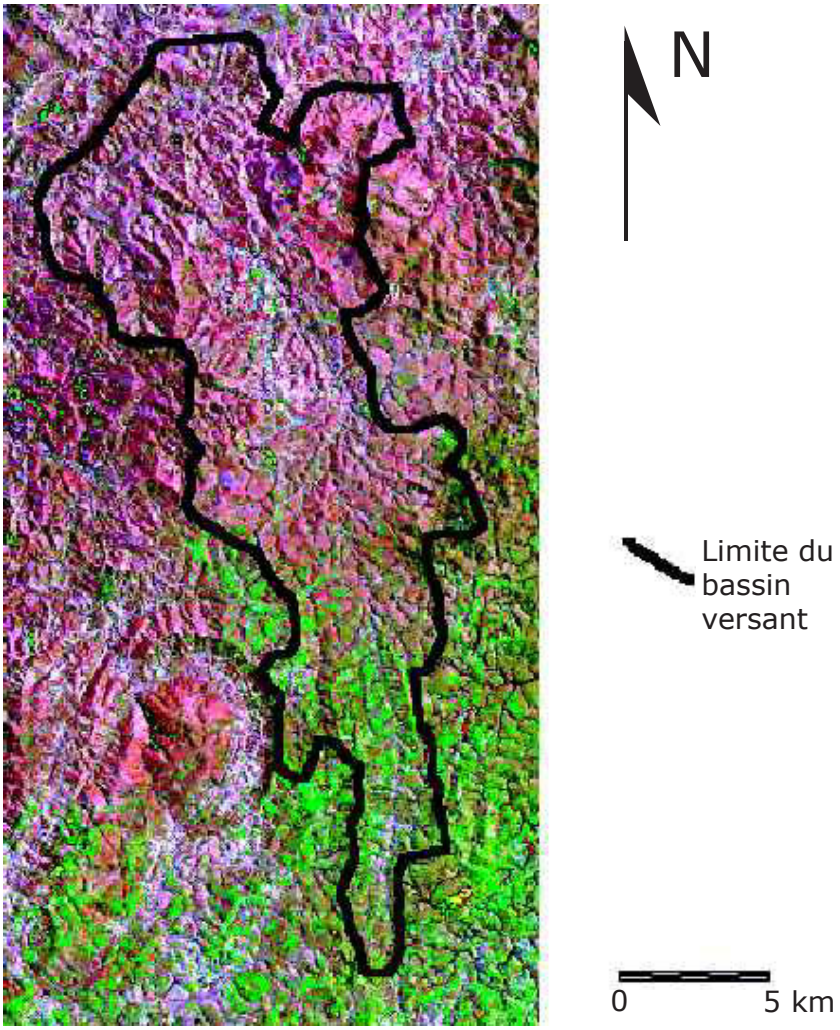


FIGURE 2 Image du capteur TM de Landsat du 25/09/1994. *LandsatTM Image dated September 25, 1994.*

3.3.2. Phases de la recherche

A) Mise en place des moyens d'étude et travaux préliminaires au traitement numérique des données

Pour commencer la recherche, les travaux préliminaires au traitement numérique des données ont consisté à délimiter la zone d'étude : le bassin versant de la Sahasarotra. La délimitation a été faite à partir des cartes topographiques au 1 : 100 000 d'Ambohimanga (Foiben Taosaritany Madagascar, 1969) et d'Ambatomena (Foiben Taosaritany Madagascar, 1954). Puis, on a défini sur le terrain les sites d'expérimentation des mesures à effectuer. Les zones à forte concentration et de développement de lavaka ont été privilégiées. La localisation des sites de mesure et d'observation (parcelles) a été réalisée par GPS. Les profils de mesure ont été placés à l'exutoire des parcelles, horizontalement et perpendiculairement à la direction de la plus grande pente. On a ensuite constitué une base de données dans le cadre d'un SIG pour répondre aux interrogations et aux requêtes. Les photographies aériennes, ainsi que les cartes topographiques et géologiques ont été numérisées et traitées pour produire une ortho-mosaïque et une ortho-image. Quelques couches de la base de données ont été constituées à partir des cartes topographiques numérisées ainsi que par des éléments de photo-interprétation extraits du jeu de photographies aériennes de 1949. Il s'agit des couches vectorielles des limites du bassin versant de la Sahasarotra, des cours d'eau, des parcelles d'érosion, de la végétation, des villages et des routes.

B) Travaux sur le terrain

Les premiers travaux sur le terrain ont consisté en une série de mesures géophysiques (prospection électrique), en l'exploitation du modèle de sismicité locale (Bertil, 1996) et en mesures in situ de l'érosion. La méthode de prospection électrique effectuée dans la zone de lavaka vise la reconnaissance des structures du sous-sol. L'objectif est de caractériser les différentes couches du sol par leur aptitude à conduire le courant électrique c'est-à-dire la résistivité. Cette propriété physique dépend de la composition chimique ou de la teneur en eau de chaque couche. Deux méthodes de prospection ont été utilisées : le sondage électrique qui mesure la répartition verticale de la résistivité électrique en dessous du point de sondage et la technique du panneau électrique qui permet d'établir la coupe géo-électrique du sous-sol le long d'un profil. Les dispositifs utilisés sont de type Schlumberger pour les sondages et Wenner pour les panneaux. Des modèles de coupe géo-électrique ont été réalisés à partir du traitement informatique des données relevées sur le terrain avec des logiciels d'inversion de données géophysiques. Une fois, les paramètres physiques du sous-sol acquis, on remonte aux natures géologiques des couches en utilisant les observations sur terrain.

Les mesures de granulométrie et des limites d'Atterberg (liquidité et plasticité) sont réalisées en laboratoire à partir d'échantillons de sol. Elles complètent l'observation, l'étude et l'analyse sur le terrain. Les prélèvements de sols ont porté sur des échantillons intacts prélevés à 10 cm en dessous de la surface, et d'échantillons remaniés exposés à l'air libre et pouvant être mobilisés par différents agents tels l'eau, le vent ou l'humain. La description des composantes des paysages a consisté en une série d'observation et d'analyse des formes d'érosion et des modes d'occupation du sol. L'interprétation des paysages a été complétée par une série d'enquêtes sur des aspects socio-économiques de la zone d'étude ainsi que l'analyse et interprétation du couvert végétal.

C) Premiers traitements numériques

Les premiers traitements numériques des données images ont été effectués avec le logiciel IDRISI32. L'intégration des données dans un SIG a été faite avec les logiciels ARCVIEW3.2, IDRISI32 et MAPINFO4.0. La chaîne d'opérations des différentes étapes du traitement numérique des images satellitaires et de l'intégration des données dans un SIG est décrite à la figure 4.

D) Numérisation de la carte d'occupation du sol de 1949

La carte d'occupation des sols du bassin versant en date de 1949 (figure 43 est obtenue à partir d'une interprétation en vision stéréoscopique des photographies aériennes de cette année-là, couvrant le bassin versant de la Sahasarotra. En particulier, on a tenu compte des paramètres suivants : texture, structure et forme des lavaka. On a tiré de cette photo-interprétation la carte des lavaka de 1949. Cette dernière sera par la suite comparée aux données satellitaires.

E) Traitement numérique des images de télédétection

Ce traitement représente six étapes, décrites ici.

a) Préparation des données

Dans cette première étape, on vise l'amélioration de l'image. La couverture végétale, les sols nus, les cours d'eau sont les informations qui nous intéressent en particulier. Les travaux ont été effectués avec le logiciel IDRISI32. La préparation des images satellitaires inclut la démarche de géoréférence. On a créé de nouveaux canaux par le calcul des indices de brillance, de végétation et de rougeur et la transformation en composantes principales des images TM. Pour combiner la richesse spectrale et spatiale de ces deux types d'images, on a procédé à une fusion de chacun des canaux multibandes ayant une résolution de 30 m × 30 m avec le canal panchromatique offrant une résolution de 15 m × 15 m (Rakotoniaina, 1999). La fusion a été effectuée par la méthode IHS (intensité, teinte et saturation) à l'aide de la fonction COLSPACE d'IDRISI32. Les différentes étapes de la fusion sont celles préconisées par Chavez *et al.* (1991). Il s'agit du rééchantillonnage des bandes originales de l'image multispectrale pour qu'elles possèdent la même taille que la bande panchromatique. Pour ce faire, le mode de reéchantillonnage par duplication de pixels en ligne et en colonne a été choisi pour ne pas modifier l'information spectrale des images originales. On a procédé ensuite à la transformation de l'espace des couleurs RGB dans l'espace IHS des images TM rééchantillonnées précédemment. Puis, on a procédé à la spécification de l'histogramme de l'image panchromatique à celui de l'image composante Intensité. Ensuite, on a remplacé le canal Intensité par l'image panchromatique spécifiée obtenue et appliquée la transformation inverse : IHS vers RGB.

b) Réalisation de compositions colorées

Les compositions colorées ont été produites à l'aide de la fonction COMPOSIT d'IDRISI32. Elles ont été rehaussées avec la technique d'égalisation de l'histogramme.

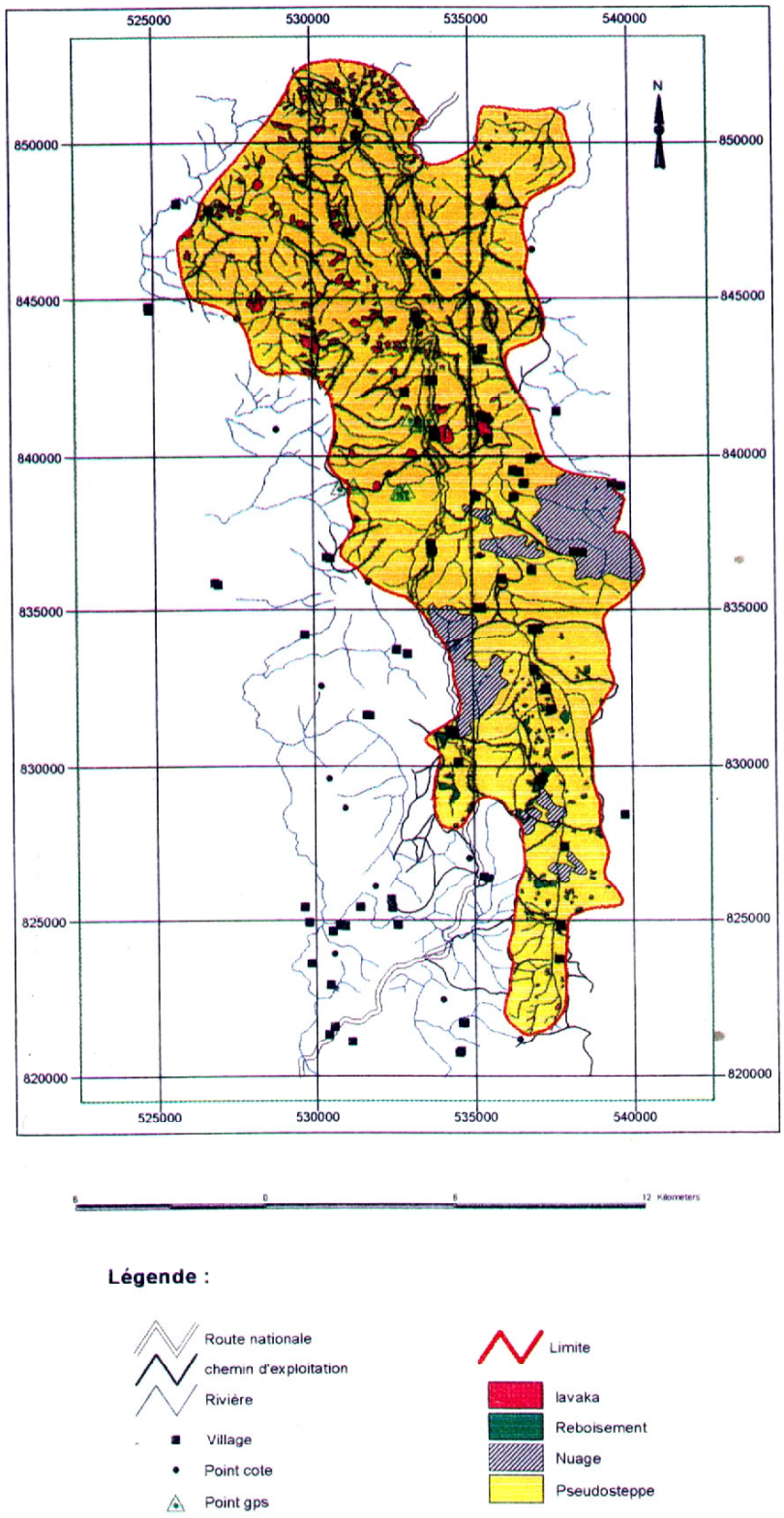


FIGURE 3 Occupation du sol du bassin versant de la Sahasarotra en 1949. *Landcover of the Sahasarotra watershed in 1949.*

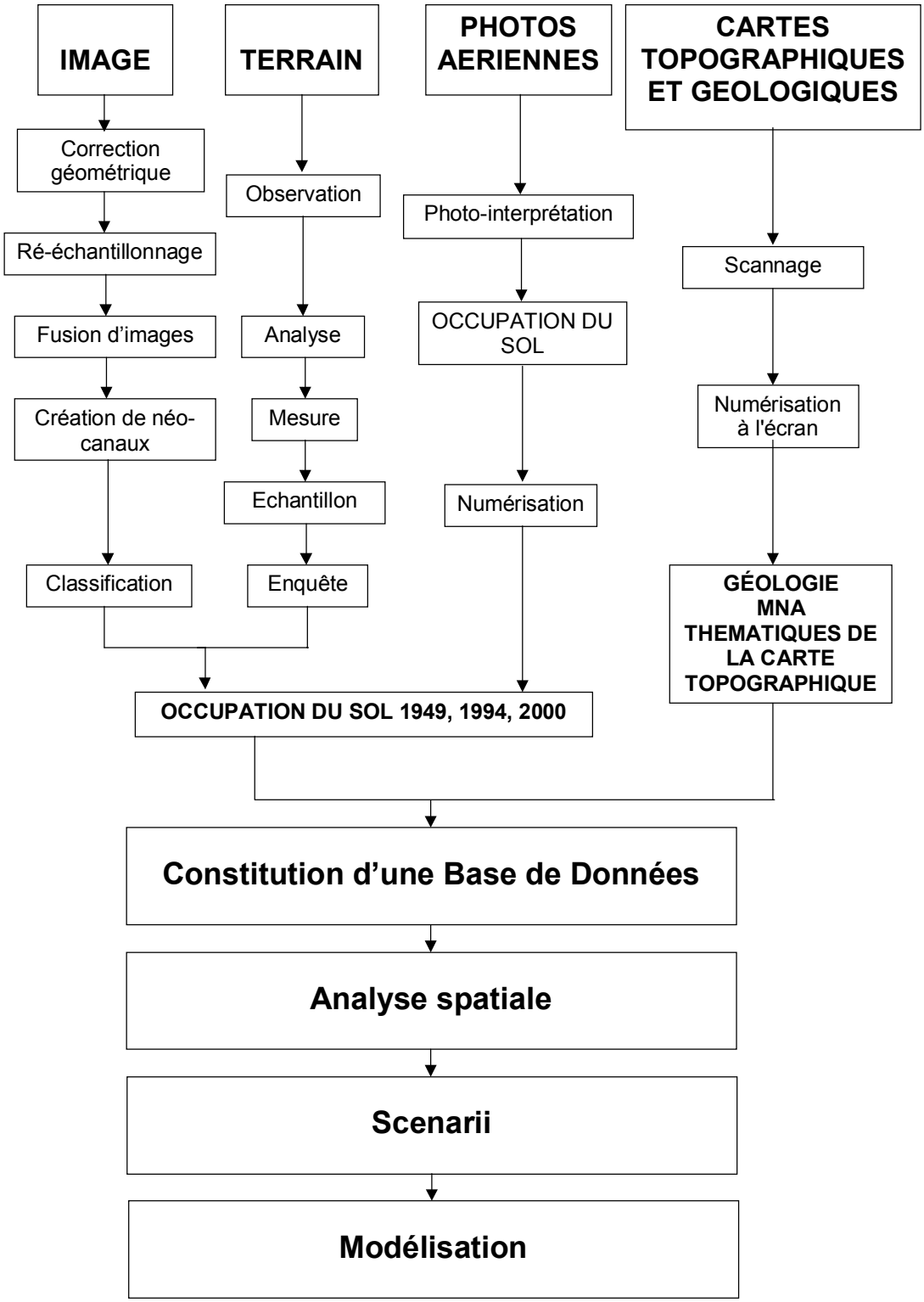


FIGURE 4 Organigramme des travaux de recherche. *Flowchart of the research process.*

c) Interprétation visuelle des images

L'identification des lavaka sur les images satellitaires a été basée sur la carte d'occupation des sols de 1949. Celle-ci fournit des indications sur l'emplacement des lavaka. Elle a servi ainsi de réalité de terrain dans l'interprétation visuelle des images. Cette identification s'est aussi fondée sur les valeurs radiométriques des données de l'image et sur différents paramètres propres à la technique de photo-interprétation à savoir : la texture et la structure de l'image, la localisation et l'environnement des lavaka

d) Apprentissage

L'apprentissage a pour but de fournir les échantillons et la taxinomie pour initialiser la classification. Les parcelles d'entraînement ont été délimitées suivant leur homogénéité locale apparente. Leur taille est petite, de l'ordre de 30 pixels en moyenne car les images présentent des unités peu étendues et hétérogènes. Le choix des zones d'entraînement a été effectué en fonction des plages de couleurs homogènes des observations effectuées sur le terrain et de l'interprétation visuelle de la composition colorée. On a sélectionné au moins quatre parcelles par classe. L'apprentissage est réalisé par la fonction MAKESIG d'IDRISI32. Cette dernière a permis de créer en outre les fichiers des signatures spectrales de chaque classe thématique définie. Ainsi on a pu connaître les valeurs radiométriques des parcelles d'érosion.

e) Classification

La classification consiste à affecter à une classe thématique les pixels qui appartiennent à une classe spectrale définie par les parcelles d'entraînement. C'est une étape qui nécessite le choix d'un algorithme de classification le mieux adapté aux données traitées. La classification est dirigée. Elle a été lancée à l'aide de la fonction MAXLIKE de IDRISI32. Elle utilise l'algorithme du maximum de vraisemblance basé sur des fichiers de signatures spectrales. On considère que toutes les classes ont une probabilité a priori identique. Les pixels sont attribués à la classe à laquelle ils ont la plus grande probabilité d'appartenir. MAXLIKE a aussi la possibilité de rejeter un certain nombre de pixels dont la possibilité d'appartenance à une classe est très faible. Cette proportion de pixels peut être définie à l'aide de la loi de Pearson X^2. Ainsi, afin de différencier les deux classes d'érosion identifiées dans le bassin versant de la Sahasarotra, Randrianarison (2001) a choisi les valeurs de seuil $X^2 = 3$ %, correspondant à une probabilité $P = 0,9$ et $X^2 = 4$ %, correspondant à une probabilité $P = 0,85$. De ce fait, tous les pixels dont la probabilité d'appartenance à une classe est inférieure à 0,9 et 0,85 respectivement ont été rejetés.

f) Évaluation de la classification

L'évaluation de la classification a été réalisée par l'analyse de la matrice de confusion. Celle ci montre des confusions légères entre les classes d'objet : culture et pseudo-steppe ; forêt et culture. Parmi les 610 pixels classés dans la classe pseudo-steppe par exemple, 36 sont inclus dans la classe forêt, 27 dans celle de sol nu. Des parcelles d'érosion sont incluses dans la classe végétation parce qu'elles n'apparaissent plus comme des sols nus à partir du moment où elles sont colonisées par la végétation.

F) Intégration des données dans un SIG

Un SIG est défini comme un système informatisé d'acquisition, de gestion, d'analyse et de représentation de données à référence spatiale. Un tel système est formé de plusieurs sous-systèmes liés à une base de données géographiques (BDG) à caractère spatial et thématique. La génération et la gestion de la BDG se sont fondées sur deux modes d'approche :

– a) construction d'une base de données au format ARCVIEW des couches numérisées, en mode objet dans une structure vectorielle ; il s'agit des couches constituées et numérisées à partir de la carte topographique ainsi que les éléments de photo-interprétation extraits du jeu de photographies aériennes de 1949 ; ce sont les couches des limites du bassin versant de la Sahasarotra, de l'hydrographie, des zones d'érosion, de la végétation, des villages et des routes ; la couche des éléments géologiques est produite par la numérisation des cartes géologiques au 1 : 100 000 (Service géologique, 1965 et 1966) ;

– b) construction d'une base de données en mode image au format IDRISI par importation des couches ARCVIEW et conversion en mode image.

G) Production du modèle numérique d'altitude

Cette étude est divisée en deux sous-étapes :

– a) le modèle numérique d'altitude (MNA) a été produit à l'aide du logiciel IDRISI32 ; les courbes de niveau de la carte topographique ont été ainsi numérisées sur écran avec une résolution de 80 pixels/cm (figure 5) ; la régionalisation a été réalisée par la méthode d'interpolation basée sur un réseau de triangle (TIN), suivie d'un lissage ;

– b) on a ensuite généré diverses couches dérivées du MNA, telles que les pentes et leur orientation évaluées en degré ; elles ont permis de produire des indices topographiques qui seront utilisés pour caractériser les zones érodées du point de vue géomorphologique.

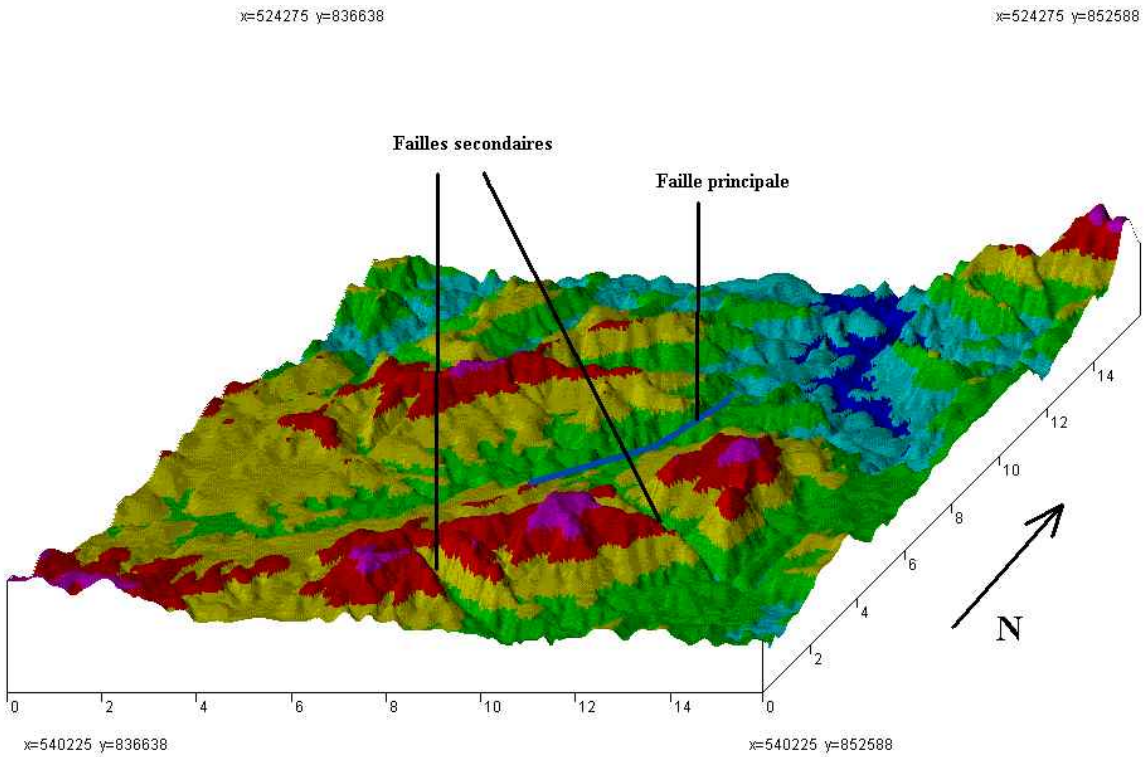


FIGURE 5 Modèle numérique d'altitude du bassin versant de la Sahasarotra. *Digital elevation model (DEM) of the Sahasarotra watershed.*

H) Description de la distribution et de l'évolution des lavaka

Cette dernière étape est subdivisée en trois sous-étapes, décrites ici.

a) Analyse des relations des propriétés des différentes couches d'information

Diverses opérations ont permis la mise en relation des couches d'information produites. L'analyse spatiale a consisté en une interrogation de la base de données ainsi construite. Quelle est la nature du sol à l'endroit où il y a des formes d'érosion et sur quel type de terrain se concentrent les formes d'érosion ? Tels sont les exemples de requêtes posées. On a ainsi procédé à une opération de classement pour constituer une couche d'information résultante de type booléen pour chacun des critères, puis à des opérations de combinaison de ces couches booléennes avec les facteurs à analyser. Les propriétés de plusieurs paramètres ont été obtenues par des opérations de masquage et dérivées du MNA : pente, courbure verticale des couches et distance par rapport au réseau hydrographique. Les lavaka ont été extraits pour constituer une image booléenne lavaka/non lavaka. L'objectif est de caractériser les paramètres physiques, géologiques et ceux d'occupation de sol des zones érodées. Elle consiste à procéder par croisement de paires : altitude-lavaka, pente-lavaka, MNA-lavaka, linéaments-lavaka, végétation-lavaka, géologie-lavaka, piste-lavaka, village-lavaka. La méthode consiste à prendre comme masque la couche « érosion ». Aux parcelles correspondant aux zones érodées, on affecte la valeur 1 et au reste la valeur zéro. On multiplie ensuite les différentes couches par le masque obtenu. Le masque est appliqué directement sur les couches : altitude, pente, courbure verticale, courbure horizontale et géologie. Cette opération a permis de récupérer les valeurs des paramètres correspondant aux seules parcelles d'érosion.

b) Évolution des lavaka

Les couches d'information de la répartition des lavaka en 1994 et en 2000 sont issues d'un double processus. Dans un premier temps, un traitement numérique des images du capteur TM a permis d'extraire les zones de sols nus. Ce traitement d'image comprend les étapes habituelles : visualisation des canaux, rehaussement de l'image, création de néo-canaux, apprentissage, classification dirigée. Plusieurs manipulations ont été pratiquées pour essayer d'interpréter au mieux les formes d'érosion à partir des images du bassin versant de la Sahasarotra. Pour rehausser les contrastes, une amélioration de l'image par un étalement linéaire de la dynamique a été appliquée. Chaque canal TM et

le canal panchromatique spécifique à l'image ETM+ ont été visualisés afin de déterminer dans quelle bande spectrale l'érosion apparaît le mieux. Ensuite, on a procédé à la création d'images booléennes par masquage des zones non dénudées dans les images classées de 1994 et de 2000. Dans un second temps, nous avons procédé à une reconnaissance et à une numérisation à l'écran des lavaka eux-mêmes, à partir d'images rehaussées et de plusieurs compositions colorées (Caloz et Collet, 2001). L'évolution des lavaka a été analysée sur la base des trois dates 1949, 1994 et 2000, dates des données disponibles.

c) Modélisation de la présence et du développement des lavaka

La modélisation prend en compte les multiples interrelations entre les différents paramètres identifiés du milieu : nature des sols, tectonique, végétation et action anthropique.

4. RÉSULTATS

L'intégration des données du traitement d'image à d'autres informations complémentaires, tel que celles de terrain, a permis une meilleure caractérisation des phénomènes d'érosion observés sur le terrain. La démarche pluridisciplinaire que nous avons adoptée contribue à une meilleure compréhension de la genèse du lavaka. Les travaux montrent enfin que l'approche de l'interprétation d'image assistée par ordinateur (IIAO) est aussi pertinente que le strict traitement d'image numérique.

4.1. Traitement numérique des images

Les résultats des premiers traitements numériques appliqués aux images TM de 1994 et ETM+ de 2000 indiquent clairement que l'image TM, datant du mois d'avril, à la fin de la saison des pluies, offre une meilleure visualisation des objets d'étude, en particulier, le pôle végétal.

La comparaison des parcelles d'érosion de 1949 et celles de 1994 ont montré des confusions entre érosion et végétation. Cela apparaît quand il y a stabilisation des lavaka par la végétation, comme c'est le cas dans le sud du bassin versant de la Sahasarotra ou lorsque les paysans cultivent dans les lavaka. Quoi qu'il en soit, on remarque que dans l'ensemble, les parcelles d'érosion et les sols nus sont bien identifiés par les méthodes utilisées.

Les premiers résultats en relation avec la mise en place du protocole de mesure d'érosion portent sur trois points essentiels : l'identification des lavaka, la caractérisation des processus d'érosion observés sur le terrain et l'évolution des lavaka durant la période de 1949 à 2000.

4.2. Identification des lavaka

Il fut relativement aisé d'identifier visuellement les lavaka sur les photographies aériennes, par vision stéréoscopique et 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 (figure 4). On remarque une répartition inégale de cette forme d'érosion en ravine. La plupart des lavaka sont localisés au nord-ouest de la zone d'étude. Ainsi, 144 lavaka ont pu être identifiés par leur forme (Randriamanga *et al.*,.2001). On constate que 367 ha de terrain sont gagnés par les lavaka sur les 19 326 ha du bassin versant de la Sahasarotra, soit 1,9 % de la surface étudiée. Cette proportion est considérable si l'on tient compte du relief collinaire de la région. Certains lavaka sont anciens, parfois stabilisés par des végétaux, d'autres sont en cours d'évolution et 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 discerner à cause de leur dimension, de leur morphologie et de leur exutoire qui est plus large que pour les lavaka récents. Ces derniers sont difficiles à discerner parce qu'ils sont moins visibles, de petite taille et se confondent avec les sols nus. Dans tous les cas, la géomorphologie intervient beaucoup dans l'identification du lavaka. C'est dans la bande TM3 et le canal P qu'on discerne le mieux les lavaka à partir de l'image du capteur TM ou ETM+. On peut donc étudier les formes d'érosion par les lavaka 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.

4.3. Caractérisation des processus d'érosion observés sur le terrain

En complément au traitement numérique des images et à leur interprétation, la mise en évidence des différents paramètres caractérisant le processus d'érosion par les lavaka a été basée sur les résultats des travaux de terrain : observation et analyse, ainsi que sur les différentes mesures effectuées sur le terrain et en laboratoire. À l'issue de ces travaux, on a pu caractériser des lavaka sur des terrains à

dominance de migmatites granitoïdes à sol argileux ou limoneux et des lavaka sur gneiss migmatitique lité. L'érosion commence alors par des mouvements de masse par le biais de glissements de terrain ou par ravinement. Placée sur les flancs de colline, à 100 m en moyenne au-dessus du bas fond, elle évolue considérablement jusqu'à produire une excavation gigantesque.

4.3.1. Apports des travaux de terrain

A) Géologie et sol

Du point de vue géologique (Randriamanga *et al.,* 2001), le substratum du bassin versant de la Sahasarotra est essentiellement constitué de matériaux migmatitiques qui datent du Précambrien. Les affleurements rocheux sont rares et le socle précambrien est en général couvert d'un épais manteau d'altération de 15 à 50 m. La partie nord du bassin versant de la Sahasarotra, située dans un vaste synclinal orienté NE-SO, est formée de gneiss à amphibole non migmatitiques avec de nombreuses intercalations d'amphibolites. La partie sud est façonnée dans des matériaux de migmatites liés ou rubanés, migmatites granitoïdes associées à des gneiss migmatitisés. Un réseau de failles NE-SO, développé dans la Série à amphibole du synclinal et NO-SE, dans les formations migmatitiques de l'anticlinal, témoignent de l'activité néotechtonique néogène à actuelle. La partie nord, grossièrement délimitée par des failles orientées NE-SO, s'abaisse progressivement par une série de gradins formant un système de grabens subsidents.

Les sols, essentiellement de type ferrallitique, sont formés sous un climat tropical à saisons sèche et humide bien contrastées. Trois profils de sol ont été identifiés : sol sur gneiss migmatitique, sol sur gneiss non migmatitique et amphibolite de la Série à amphibole et sol sur migmatite granitoïde. Il s'agit de sols qui appartiennent généralement à la classe des limons plastiques (Lp) à très plastiques (Lt) selon la classification du Laboratoire des Ponts et Chaussées (LPC). Ce sont des sols limoneux sensibles à l'érosion qui ont une valeur d'angle de frottement interne assez grand. Ce sont des sols plus ou moins pulvérulents à résistance à sec en général faible. Leur limite de liquidité a une valeur moyenne de l'ordre de 50. Cette faible résistance est aussi à lier à la nature du sol. L'analyse physico-chimique en laboratoire a montré que les sols du bassin versant de la Sahasarotra sont moyennement acides à très acides (pH entre 4 et 6), à très faible teneur en bases échangeables, pauvres en Mn, en Mg et en matière organique (2,5 à 6 %) ; la teneur en azote sous forme organique est faible à moyenne. Le rapport C/N de 11 à 34, moyen à très élevé est un indice d'une activité biologique importante. On note que la teneur en fer et en aluminium est assez élevée (respectivement : 25 et 12 ppm). Ces sols renferment très peu d'argile ; c'est ce qui explique leur manque de cohésion et ainsi leur sensibilité à l'érosion. Ils sont perméables et d'une stabilité structurale médiocre. Ce sont ces conditions physico-chimiques des sols qui favorisent le phénomène d'altération chimique de la roche mère, facilitant la dissolution partielle de certains éléments (Si, Al, Fe). Cette dissolution est capable de provoquer l'amorce d'une érosion mécanique des sols sur migmatites. Le lessivage est peu intense dans les horizons supérieurs riches en débris de quartz résiduels.

L'érosion des sols est due dans la plupart des cas à des effondrements de terrain qui se trouvent liés à un réseau hydrographique. Le glissement brutal vers la rivière est causé par l'affouillement dû à la circulation d'eau souterraine dans la nappe phréatique. Dans le cas des lavaka de la zone à dominance de migmatites granitoïdes à sols argileux ou limoneux, les ruissellements en filet suffisamment puissants pour inciser et creuser des chenaux profonds, favorisent la formation des rigoles affectant la partie basale du lavaka. Le ruissellement devenant plus concentré érode facilement l'horizon A compact du sol, dépourvu de toute végétation du fait de la dégradation du couvert végétal. L'eau ruisselée atteint la partie ferrallitique sous jacente moins indurée et très friable de par sa texture sableuse. Le creusement vertical s'accentuant vers le bas, les ravines commencent à apparaître puis évoluent dans le sens de la largeur. Le lavaka est ainsi formé. L'effet de fluctuation du niveau de la nappe d'arène sableuse, née au contact de la roche saine migmatitique, favorise des phénomènes de soutirage provoquant des affaissements localisés sous forme de petits gradins. L'évolution de ces affaissements aboutit à l'élargissement du lavaka. Ainsi de grands lavaka en forme digitée, à parois verticales très abruptes pouvant atteindre 15 à 30 m de hauteur, prédominent dans la zone (figure 6).

Dans le cas des lavaka sur gneiss migmatitiques lités, la zone de départ des glissements rotationnels en amont des lavaka s'effectue dans la partie ferrallitique à concrétions ferrugineuses de l'horizon B_1 à texture argilo-sableuse. Les glissements de terrain sont dus à une mise en mouvement de ce niveau très plastique porté par un soubassement sablo-limoneux saturé d'eau qui se comporte comme une couche savonneuse. Ces glissements rotationnels entraînent vers l'aval le processus érosif en forme de lavaka. Plusieurs glissements peuvent s'effectuer, comme en témoignent les cicatrices de deux à trois glissements successifs séparés par des bourrelets bien individualisés, remarqués sur le terrain. Par contre, dans la partie basale du lavaka,

au niveau de l'horizon C_0, on observe des glissements en plan qui se font suivant les plans de schistosité de la masse rocheuse altérée.

Ainsi, l'étude montre que deux formes d'érosion au moins prédominent dans les zones de forte concentration de ruissellement dans le bassin versant de la Sahasarotra : il s'agit d'une érosion par glissement de masse et d'une érosion linéaire.



FIGURE 6 Représentation au sol d'un lavaka. *Illustration of a lavaka.*

B) Géophysique et résistivité

Deux processus d'érosion ont été caractérisés par les méthodes de prospection électrique. Il s'agit de la forme d'érosion par mouvement de masse et celle d'érosion linéaire par ravinement. C'est cette dernière qui souvent évolue en lavaka.

Dans le cas d'une structure d'érosion par mouvement de masse, sur la figure 7, on observe que les plans de glissement sont matérialisés par une couche de résistivité 200 à 1 000 Ωm. Cette couche conductrice serait la responsable du glissement des couches supérieures et joue le rôle de couche-savon. Elle est concave et sa profondeur varie entre 1,30 à 1,90 m. En dessous, se situe une autre couche encore plus conductrice de résistivité 60 à 200 Ωm.

D'après le modèle géophysique, on observe deux masses glissantes bien individualisées. À l'intérieur de la masse glissante principale, on observe un compartimentage suivant la ligne de plus grande pente. En aval de l'érosion, les masses mobilisées forment un bourrelet de terrain jouant un rôle stabilisateur. On conclut qu'il y a emboîtement des masses en mouvement.

Le modèle de coupe géo-électrique de la figure 8 rend compte du mécanisme de formation des ravins dans le cas d'une érosion linéaire par ravinement. Les mesures ont été réalisées sur un versant de colline à pente raide atteignant 40°, suivant un profil horizontal, perpendiculaire à la ligne de plus grande pente. Ce modèle montre une grande variation latérale de la résistivité des couches.

On constate que les valeurs de la résistivité comprises entre 200 et 1 000 Ωm coïncident avec des chenaux d'érosion. Ces valeurs sont dues principalement à la forte humidité de certaines couches. La forte altération du sol de nature argileuse, augmentée par la forte pente, fait que le ruissellement est érosif. Une fois que la couche argilo-sableuse est atteinte, elle est beaucoup plus facilement attaquée par l'érosion. L'érosion se fait alors essentiellement de la profondeur vers la surface.

Ce sont là les deux mécanismes d'érosion qui ont été identifiés par la géophysique, mais l'observation sur le terrain a montré qu'il existe aussi d'autres processus d'érosion sur le site.

C) Résultats thématiques

On a pu tracer des courbes de fréquence de l'érosion par rapport aux différents paramètres physiques. Ainsi, on a pu identifier certaines conditions physiques favorables à l'érosion :

– les pentes convexes sont plus sensibles à l'érosion ; mais il n'y a pas de direction privilégiée pour l'apparition des phénomènes ; l'analyse des caractères physiographiques montre que l'érosion se manifeste sur les reliefs ayant des altitudes variant entre 1 000 et 1 500 m et sur des pentes inférieures à 30° ;

– les formes d'érosion sont prépondérantes là où les accidents tectoniques sont denses et là où le sol repose sur du gneiss ;

– l'érosion est observée là où se situe une plaque de sol nu.

Les différentes images numériques qui ont été produites, rendent compte de la répartition des zones d'érosion et des différents paramètres spatiaux, telle la distance de l'érosion par rapport au réseau routier ou au réseau hydrographique. On remarque que de nombreux lavaka ont été décelés à moins d'un kilomètre d'un cours d'eau. Les analyses placent en outre les pixels d'érosion à moins d'un kilomètre des pistes et de deux kilomètres des villages.

Le traitement numérique des pixels d'érosion confirme l'existence des deux formes d'érosion dans le bassin versant de la Sahasarotra, l'une par mouvement de masse et l'autre par ravinement linéaire. Ces pixels d'érosion occupent la partie nord-ouest du bassin pour le premier cas, la partie sud, pour le second cas. Le centre du bassin versant de la Sahasarotra en est dépourvu.

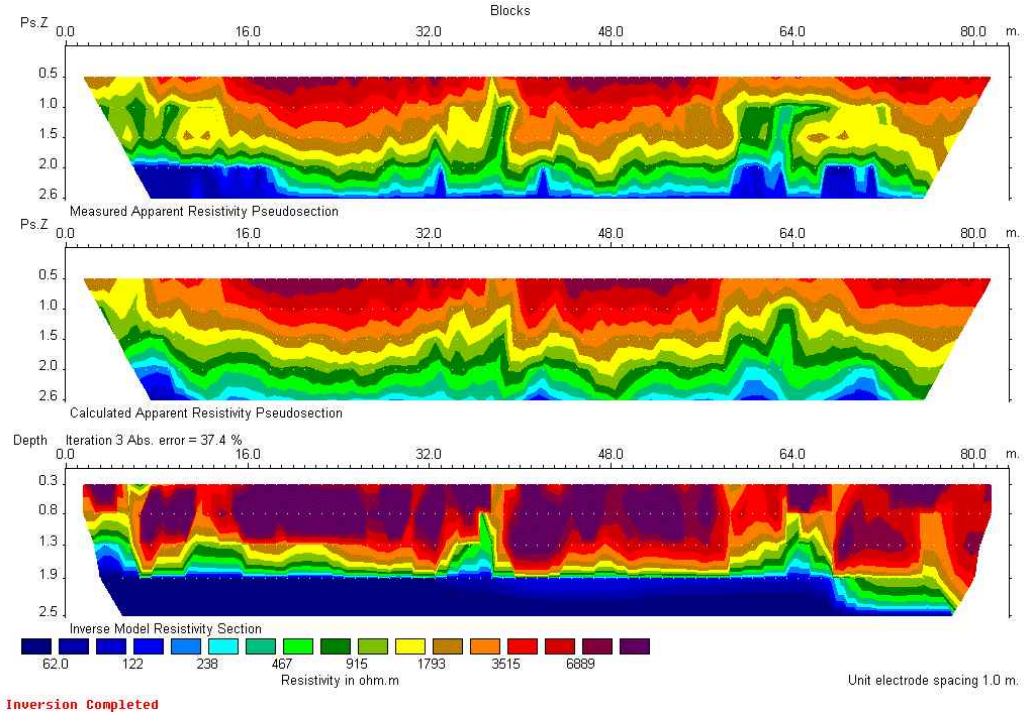


FIGURE 7 Structure d'érosion par mouvement de masse. *Mass movement erosion structure.*

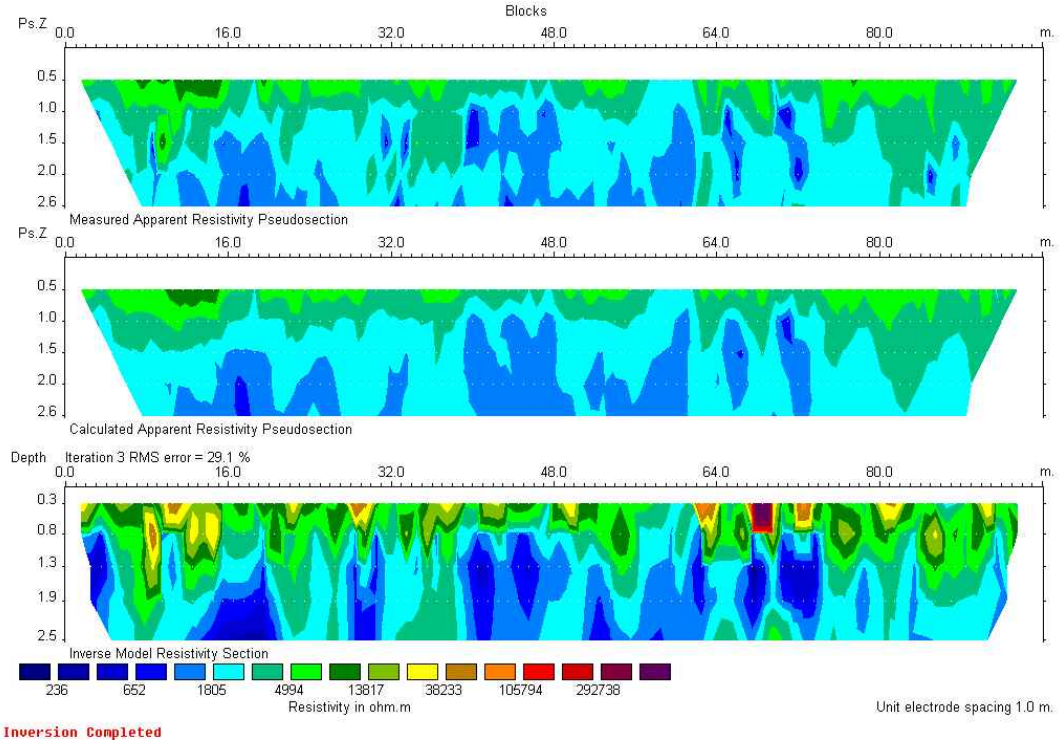


FIGURE 8 Structure d'érosion linéaire. *Linear erosion structure.*

4.4. Évolution des lavaka durant la période de 1949 à 2000

L'analyse diachronique des trois couches de 1949, 1994 et 2000 obtenues par traitement numérique des images TM a conduit aux observations générales suivantes. De nouvelles zones d'érosion sont apparues entre 1949 et 1994. Les changements sont par contre minimes entre 1994 et 2000 (figure 9). Les lavaka de la partie nord-ouest du bassin versant de la Sahasarotra se sont étendus entre 1949 et 2000. S'ils ne constituaient que de simples points isolés en 1949 dans le nord-ouest ou le sud du bassin versant, ils sont devenus digités ou coalescents en 2000.

On peut conclure qu'il faut une cinquantaine d'années environ pour que le lavaka s'étende de façon considérable. La géomorphologie peut contribuer à déterminer l'ancienneté des lavaka. Ainsi, de par leur forme, on peut supposer l'ancienneté des lavaka du bassin versant de la Sahasarotra car des entités de grande taille sont déjà observées dans la partie ouest de l'image de 1949.

5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Certains phénomènes caractérisant le processus de formation des lavaka ont pu être mis en évidence.

5.1. Relief, géologie et tectonique

La topographie conditionne la formation des lavaka. Les phénomènes d'érosion se déclenchent dans des courbures horizontales faibles et négatives et sur des terrains à courbure verticale faible mais positive. De ce fait, l'érosion prédomine sur les versants montagneux et au niveau des points d'inflexion, marquant ainsi le passage du versant sommital convexe au versant concave de la base du relief. On peut alors imaginer la genèse d'un lavaka débutant par une érosion linéaire superficielle qui prend naissance au niveau des pentes concaves des versants. Celle-ci se développe très vite en amont où se déclenchent des mouvements de masse : solifluxion et glissements, suivis d'effondrement par pans des versants. Du point de vue géomorphologique, les lavaka prédominent dans les zones de raccordement des surfaces d'érosion. La géologie et la tectonique jouent un rôle certain dans le processus d'érosion et permettent de diviser le bassin versant de la Sahasarotra en trois zones d'érosion bien distinctes : le nord-ouest fortement érodé, le sud moyennement érodé et le centre sans forme d'érosion importante.

5.2. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique demeure un paramètre important dans la formation des lavaka. Le développement de nombreux lavaka le long des cours d'eau est à mettre en effet à l'actif d'une érosion régressive qui sape les berges après humectation, affouillement et soutirage de ces berges. L'existence d'une nappe phréatique circulant à la base du relief traduit aussi le développement d'un lavaka suite à un affaissement ou à un glissement de sol, après soutirage et humectation permanente de la zone. Notons enfin que les rigoles causées par le ruissellement concentré sur les versants peuvent évoluer en lavaka quand leur profondeur atteint la nappe phréatique.

5.3. Végétation

La couverture végétale est un paramètre non négligeable dans la formation d'un lavaka. La végétation joue en effet un rôle protecteur même dans le cas d'une formation ouverte. Hormis les zones de reboisement, nous sommes ici en présence d'une formation végétale ouverte de pseudo-steppe. Celle-ci est suffisante pour protéger le sol de l'érosion. Mais la moindre entaille dans la pseudo-steppe favorise le phénomène. Les sols dénudés ou remaniés par la pratique des activités agricoles sont en conséquence les plus sensibles au processus d'érosion.

5.4. Action de l'humain

L'action anthropique contribue elle aussi au processus érosif. Les activités humaines accélèrent souvent ces derniers. Les constats sur le terrain ont montré que les pratiques agricoles, leurs effets et l'activité économique influent sur la genèse des lavaka. C'est dire que l'occupation ainsi que les modes de gestion et d'exploitation des sols peuvent considérablement influer sur la formation des lavaka. Ainsi, par exemple, les routes non bitumées qui sont des produits anthropiques, peuvent, elles-mêmes, être le point de départ des rigoles, des suites d'un ruissellement agressif et de l'absence des chenaux d'évacuation.

5.5. Relation avec les travaux antérieurs

Du point de vue thématique, nos travaux confirment certains résultats antérieurs cités par Andriamampianina (1988). Ce dernier distingue les études anciennes des études récentes expliquant la genèse des lavaka. Les études anciennes rattachent 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 contribue à la formation de différentes générations de lavaka séparées par des périodes climatiques inaptes à la formation de ceux ci. L'humain accélère le processus de formation des lavaka. Pour notre part, nous reconnaissons le rôle incontestable des facteurs physiques dans la genèse des lavaka et la contribution de l'humain dans son processus de formation. Nous appuyons aussi les explications qui se fondent sur les variations climatiques, bien que nous n'ayons pas pu réaliser nous-même l'étude. En effet, nous avons observé sur le terrain des lavaka d'âges différents. Les lavaka anciens présentent un relief moins prononcé que les lavaka récents et ils sont entièrement colonisés par la végétation. Ils sont stabilisés et inactifs. D'après nos entretiens avec les paysans, ils sont très vieux. Ils sont probablement antérieurs à l'installation humaine dans la région. Des datations devraient fixer l'âge des lavaka anciens. Les vieux lavaka sont nombreux. Ils sont en partie colonisés par la végétation, donc stabilisés. 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 confirme les observations antérieures sur les diverses générations de lavaka.

6. DISCUSSION

L'état actuel de cette étude précise certaines idées sur la morphogenèse des lavaka. Il apparaît en particulier que la zone de départ des lavaka se situe dans des pentes inférieures à 30°. Les modélisations futures devraient confirmer ce constat

Sur la figure 9, portant sur l'évolution des lavaka du bassin versant de la Sahasarotra, on montre, qu'au milieu de ce bassin, les lavaka semblent s'être résorbés entre 1949 et 2000, alors qu'ils se sont développés dans la partie nord. Les travaux de terrain apportent une explication à cette première observation visuelle (Randriamanga *et al*., 2001). En effet, on observe sur le terrain, que là où les lavaka sont absents, c'est-à-dire au centre du bassin versant, le relief est moins accidenté. Une pente est faible, inférieure à 10°, donne au relief une allure de replat. Le réseau hydrographique n'est pas dense. Cette zone correspond au domaine de la savane arborée. On y observe une reprise de la colonisation végétale, en particulier dans les lavaka. Il y a en conséquence un phénomène de stabilisation naturelle des lavaka à cet endroit.

D'après les données d'enquêtes, la partie sud a connu une déforestation intense pour la fabrication de charbon de bois expliquant ainsi l'importance des ravinements qui s'y trouvent. Le nord-est, stable en 1949, a connu de 1994 à aujourd'hui une dégradation des sols due à la mauvaise pratique culturale. L'érosion s'est installée. Il est prouvé ici l'importance des travaux de terrain pour la compréhension de l'évolution des lavaka de 1949 à 2000.

L'identification des lavaka à travers le traitement numérique des images TM et ETM+ 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'autre part, la taille d'une ravine peut varier considérablement et atteindre des dimensions impressionnantes (figure 5) surtout s'il y a coalescence de plusieurs lavaka. Sa détection n'est donc pas évidente et l'interprétation visuelle dirigée est un complément indispensable pour une bonne identification.

Ces résultats illustrent le potentiel de l'interprétation d'image assistée par ordinateur (IIAO) dans une démarche d'analyse multisource, combinant l'expertise et la connaissance de l'analyste, aux capacités de traitement numérique de l'image dans un environnement informatisé (Collet, 2000).

7. VÉRIFICATION DES HYPOTHÈSES

Les hypothèses de départ sont ici vérifiées car la diversité et la complexité des conditions du milieu naturel malgache constituent 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 et l'action anthropique illustrée par les effets du piétinement des bœufs domestiqués par les paysans.

Les résultats obtenus ont permis d'acquérir un certain nombre de connaissances 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.

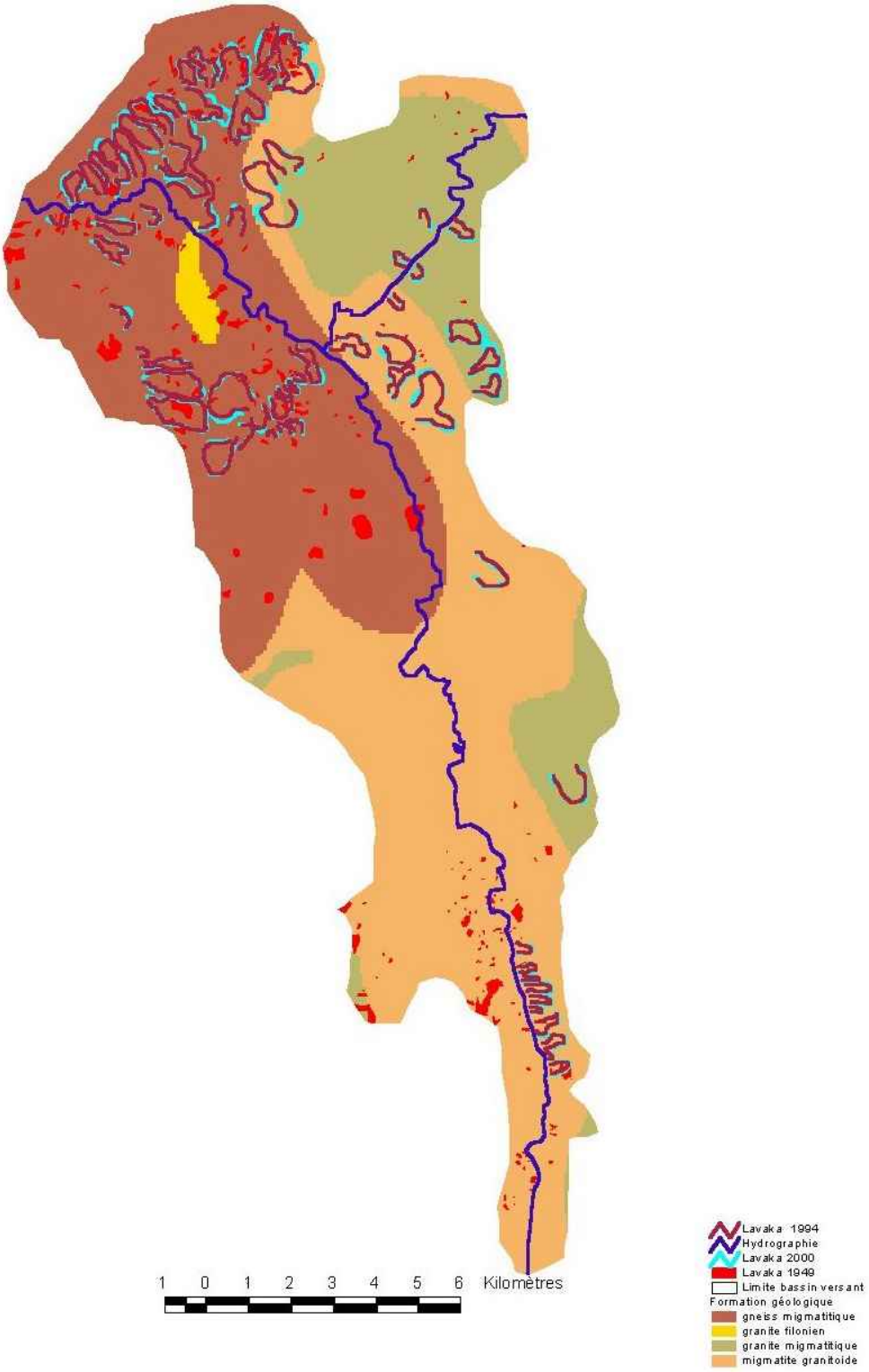


FIGURE 9 Évolution des lavaka du bassin versant de la Sahasarotra en 1949, 1994 et 2000. *Lavaka evolution in the Sahasarotra watershed in 1949, 1994 and 2000.*

8. CONCLUSIONS

8.1. Apport de la télédétection et du SIG

Cette étude montre une fois de plus que la télédétection est une source d'informations précieuse dans le cadre de travaux de recherche sur l'érosion. Des possibilités sont offertes par les images du capteur TM, 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. Quoi qu'il en soit, les canaux TM3 et Panchromatique du capteur ETM+ répondent très bien à l'identification des lavaka.

Le traitement par un SIG des données issues de la télédétection et leur analyse spatiale sont des compléments de plus en plus incontournables du traitement numérique des images. Cette étape de nos travaux démontre déjà les possibilités des méthodes de télédétection, avec celles d'un SIG à l'étude du processus d'érosion par lavaka.

Le couplage photographie aérienne et image satellitaire se présentent aussi comme une méthode de recherche efficace.

8.2. Appréciation et perspective de recherche

Le thème de l'érosion traité dans cette étude sur les bases d'une recherche interdisciplinaire va permettre de valider les observations et les hypothèses partielles, de déterminer les paramètres à introduire dans le modèle et de les ajuster sur des cas réels. De ce fait, il sera possible de déduire des propositions générales et pratiques pour lutter contre l'érosion.

Les démarches suivies par chacun des membres de l'équipe diffèrent, mais les résultats concordent. Tout porte à croire que l'apparition des lavaka est conditionnée par quatre facteurs principaux : la géologie, l'hydrographie, la topographie et les facteurs anthropiques. Dès lors il est permis d'envisager une modélisation des processus d'érosion par la considération de ces paramètres. L'étude permettra de valider les observations et les hypothèses partielles, de déterminer les paramètres à introduire dans les modèles et de les ajuster sur des cas réels. Cette partie de l'étude fera l'objet de la suite des travaux de la deuxième et troisième phase du programme. Le rôle des enquêtes socio-économiques sera déterminant car les données obtenues complètent les observations et entrent dans l'élaboration des modèles d'érosion, l'objectif final de notre étude.

9. REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du concours de l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF), nous lui témoignons notre gratitude. Nous remercions aussi Tidiane Ouattara, de Ressources Naturelles Canada, et Yves Auda, de l'Université Paul Sabatier de Toulouse pour leurs commentaires constructifs qui ont permis d'améliorer le texte.

Références bibliographiques

Andriamampianina, N. (1988) Contribution à l'étude de la dynamique et de la stabilisation des lavaka à partir de quelques exemples, Mémoire de maîtrise, Unité d'enseignement et de recherche de géographie, Université de Madagascar, 197 p.

Anonyme (1997) Projet de conservation des sols, vol. 1, 2 et 3, Association nationale d'actions environnementales, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), Foibe fikarohana sy fampiroborobona ny eny ambanivohitra (FOFIFA) et Office national de l'environnement (ONE), Antananarivo, 22 p.

Bailly, C, Malvos, C. et Smith, M. (1976) Étude à la susceptibilité des sols à l'érosion des sols de Madagascar. Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, 58 p.

Bertil, D. (1996) : Sismicité instrumentale et hypothèses sur les réactivations tectoniques récentes. Actes des journées scientifiques Rifting malgache. Université d'Antananarivo, p. 11-18.

Caloz, R. et Collet, C. (2001) Précis de télédétection ; Volume 3 : Traitements numériques d'images de télédétection. Presses de l'Université du Québec et AUF, Sainte-Foy, Canada, 386 p.

Chabalier, P.-I. et Rakotomanana, J.-L. (1996) Technique de lutte contre l'érosion. Foibe fikarohana sy fampiroborobona ny eny ambanivohitra (FOFIFA), Antananarivo, 76 p.

Chavez, PS. Sides, S. et Anderson, J. (1991) Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: LANDSAT TM and SPOT Panchromatic. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 57, n°3, p 295-303.

Collet, C. (2000) Vers un système d'assistance à l'interprétation d'images numériques de télédétection (IIAO). In A. Bannari, (réd.) La télédétection optique et radar et la géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux. Éditions de l'Université d'Ottawa, Ottawa, p. 27-38.

Département de géographie (2001) Anjozorobe, Alakamisy Andranomadio, Mangamila, vol. 1, 2 et 3. Rapport de voyage d'étude du 17 au 21 avril 2001, Faculté des lettres et sciences humaines, Université d'Antananarivo, Madagascar, 37, 40 et 38 p.

Foiben Taosaritany Madagascar, (1954) Ambatomena, feuille Q-46, carte topographique de base au 1 : 100 000, Antananarivo.

Foiben Taosaritany Madagascar, (1969) Ambohimanga, feuille P-46, carte topographique de base au 1 : 100 000, Antananarivo.

Gaussen, H. (1964) Géographie des plantes. Armand Colin, Paris, 223 p.

Rakotoniaina, S. (1999) Analyse multirésolution par ondelettes en traitement du signal. Exemples d'application en télédétection et en géophysique. Thèse de doctorat, Université d'Antananarivo, Madagascar, 132 p.

Rakotoson, E. (1999) Modèles d'érosion pour l'aménagement de bassin versant. Cas du bassin versant de Menaloha. Mémoire de fin d'études, Département de géologie, École supérieure polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, 80 p.

Ramerison, T.A. (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, École supérieure polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, 49 p.

Randriamanga, S., Raharijaona, L.-J., Razafy Fara, L., Rakotondraompiana, S., Rakotoniaina, S., Ratovo, H.-M., Randrianarison, L.-T., Andriamanantsoa, E.et Simon, R. (2001) Étude par télédétection des géorisques dans la région d'Anjojorobe Madagascar. Rapport scientifique intermédiaire, Action de recherche partagée, Réseau Télédétection, Agence universitaire de la Francophonie, Antananarivo, 46 p.

Randrianarison, L.T. (2001) Apport de la géographie physique et de la géomatique à l'étude et à la prédiction des zones à risque d'érosion dans le bassin de Sahasarotra, Anjozorobe. Rapport de stage pour l'obtention du diplôme d'études approfondies de sciences physiques, option géophysique, Institut et observatoire de géophysique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, 68 p.

Rantoanina, M. (1966) Géologie et prospection au 1 :100 000e des feuilles Ambohimanga, Ambatomena (PQ46). Ministère des mines, Antananarivo, Madagascar.

Service géologique (1965) Carte géologique feuille Q-46. Ministère de l'énergie et des mines, Antananarivo, Madagascar, 1 : 100 000.

Service géologique (1966) Carte géologique feuille P-46. Ministère de l'énergie et des mines, Antananarivo, Madagascar, 1 : 100 000.