Télédétection, 2006, vol. 6, n° 4, p. 277-290
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

APPLICATION DE LA TÉLÉDÉTECTION ET D'UN SIG À LA TYPOLOGIE DES LAVAKAS SUR LES HAUTES TERRES DE MADAGASCAR

Simone RANDRIAMANGA[1], Marie-France BELLAN[2] et François BLASCO[2]

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

[2]*Centre de télédétection, CESBIO – LADYBIO, CNRS / Université Paul Sabatier,*
B.P.I. 2801, 31401 Toulouse cedex, France
Téléphone : 33 (0)5 61 55 85 43 ; télécopieur : 33 (0)5 61 55 85 00 ;
courriel : mariefrance.bellan@cict.fr ; francois.blasco@wanadoo.fr

Soumis le 4 juillet 2004 ; révisé le 31 mai 2005 ; accepté le 16 novembre 2006

Depuis le milieu du siècle dernier, l'érosion des sols forestiers, de savanes et culturaux est la cause majeure de la régression des systèmes de production agricole sur l'île de Madagascar. Cette érosion revêt de multiples formes. En pays tropicaux, et notamment sur les hauts plateaux malgaches (altitude de plus de 1 200 m), les lavakas, c'est-à-dire les ravinements spectaculaires développés sur les pentes des bassins versants, constituent à la fois une curiosité pour les scientifiques ainsi qu'un fléau environnemental et économique pour les communautés rurales. Par une approche classique dans un SIG de données multisources, nous avons testé l'utilité des données de TM de Landsat pour inventorier et, éventuellement, comprendre les processus érosifs qui forment les lavakas. De plus, nous avons examiné les techniques mises en œuvre pour permettre la typologie des principales catégories de lavakas et leur explication. L'étude a été menée à l'échelle du bassin versant de la Sahasarotra, situé au nord d'Antananarivo, à une altitude moyenne de 1 380 m. Quatre catégories de lavakas ont été répertoriées suivant leur localisation : les lavakas à proximité d'une rivière, les lavakas sur le flanc d'une colline, les lavakas à la fois à proximité d'une rivière et sur le flanc d'une colline et les lavakas près d'une piste ou d'une agglomération. Deux processus caractérisent leur formation : l'érosion par mouvement de masse résultant d'un glissement de terrain et l'érosion par excavation du sol résultant d'un ravinement. Les aspects innovateurs de l'étude portent sur la vectorisation de l'image de TM, permettant l'identification des surfaces nues portant les lavakas, à la place de la technique fondée sur la reconnaissance et la numérisation à l'écran des parcelles d'érosion, à partir d'images rehaussées et de plusieurs compositions colorées.

Mots clefs : Madagascar, érosion hydrique, lavaka, TM de Landsat, télédétection, SIG.

APPLICATION OF REMOTE SENSING AND GIS TO THE CLASSIFICATION OF VARIOUS TYPES OF LAVAKA IN THE MADAGASCAR UPLANDS

Since the mid last century, soils erosion under forest, savanna and crops has been the main cause of cultivated land regression in Madagascar. This erosion occurs in various forms. In tropical countries, especially on the Madagascar uplands (elevation over 1 200 m), lavakas, i.e. spectacular scorings on the catchment slopes, are both a curiosity for scientists and an environmental as well as economical disaster for rural communities. Using the classical processing of multisource data within a GIS, we tested the utility of Landsat TM data in the inventory and, eventually, in understanding the erosive processes leading to the formation of lavakas. Moreover, the method for lavaka typology is described and the main types are explained. The study was carried out over the Sahasarotra catchment, to the north of Antananarivo, at an altitude of 1 380 m. Four types of lavakas were recognized, depending on their location : lavakas on a river side, lavakas on a hillside, lavakas both on a river side and on a hillside, lavakas close to a path or a village. Two processes lead to lavaka formation : erosion due to a mass process generated by landslides and erosion due to digging by ravines. The innovative aspect of the study consists in the vectorization of the TM image for the identification of the bare soils bearing the lavakas, instead of the technique based on the reconnaissance and digitization on screen of the eroded areas from enhanced images and various colour composites.

Key words : Madagascar, water erosion, lavaka, Landsat TM, remote sensing, GIS.

1. INTRODUCTION

Il est bien connu que la dégradation et la disparition des couvertures végétales déclenchent et accélèrent les processus érosifs partout dans le monde et, notamment, dans la plupart des pays tropicaux, en particulier à Madagascar. La moindre ouverture dans une formation végétale peut créer une ravine (figure 1), notamment dans les zones de savane herbeuse ou de pseudo-steppe des hautes terres malgaches. L'effondrement des parois des versants entraîne la mobilisation des matériaux, plus ou moins grossiers, et leur sédimentation en aval dans les vallées. Or, ces vallées sont en général des zones cultivées. Leur ensablement cause donc un fort préjudice à l'agriculture. La perte des surfaces cultivables est à l'origine de la baisse de production en agriculture, ce qui développe la paupérisation de la population et favorise la désorganisation sociale et économique des campagnes (Andrianavalona et Randriamanga, 2005). À Madagascar, ces ravines

appelées lavakas ont fait l'objet de nombreux travaux descriptifs, analytiques et quantitatifs (Riquier, 1954 ; Petit et Bourgeat, 1965 ; Rougerie, 1965 ; Allard *et al.* 1970 ; Bailly *et al*., 1976 ; Barbier, 1980 ; Andriamampianina, 1985 ; Anonyme, 1997 ; Wells *et al.*, 1991 ; Ramerison, 1998 ; Rakotoson, 1999 ; Rabarimanana *et al.*, 2003 ; Mulder and Idoe, 2004 ; Mietton *et al*., 2005 ; Zavada, 2005 ; Bakoariniaina *et al.*, 2006). Compte tenu du volume que le lavaka peut atteindre, soit 500 000 m^3 d'après Brenon (1952), les pertes en matériaux sont élevées (Le Bourdiec, 1972). Par exemple, Cox *et al*. (2004 et 2005) évaluent le volume de matériaux érodés dans un lavaka de 50 m de longueur sur 12 m de largeur et 15 m de profondeur entre 450 m^3 et 13 000 m^3 par mois en l'espace de 22 ans. Ils précisent en outre que la quantité de matériaux érodés dans un lavaka diminue avec le temps. Wells et Andriamihaja (1993), eux, évaluent les matériaux érodés à 5 250 m^3, en l'espace de 3 mois, dans un lavaka de 35 m de longueur par 15 m de largeur et 10 m de profondeur.



FIGURE 1 : Lavaka. *Lavaka*

Dans cette étude, nous avons mis à contribution la télédétection et un SIG pour l'étude des lavakas et la modélisation du phénomène (Randrianarison, 2001a). Considérant que l'humain n'est pas étranger au processus de formation d'un lavaka, que la topographie, la forme des versants ainsi que l'action de l'eau par ruissellement ou par un cours d'eau y contribuent largement, il est apparu intéressant de faire la reconnaissance automatique des lavakas par télédétection optique, à partir des critères spatiaux visibles sur le terrain par l'image satellitaire (Puech *et al.*, 2005), en fonction de leur localisation. L'hypothèse de départ est qu'un couplage entre la télédétection et un SIG, combinant les données provenant d'images satellitaires, de la réalité de terrain et d'une carte topographique, permet une intégration automatique d'une somme de données suffisantes pour identifier les lavakas et aider à en comprendre les mécanismes d'évolution.

Jusqu'à maintenant, l'identification et la caractérisation du phénomène de formation des lavakas n'ont pu se faire que par analyse analogique. La méthode utilisée est fondée sur la reconnaissance et la numérisation à l'écran des parcelles d'érosion à partir d'images rehaussées et de plusieurs compositions colorées (Caloz et Collet, 2001 ; Collet, 2000). Dans cet article, nous verrons plutôt quelles sont les possibilités qu'offre l'observation spatiale pour l'extraction automatique des zones de lavakas sur les hautes terres de l'île de Madagascar. L'objectif principal est donc d'établir une typologie des lavakas à partir de l'analyse du traitement numérique d'une image satellitaire.

2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude est située sur les hautes terres de Madagascar, à une centaine de kilomètres au nord d'Antananarivo (figure 2). Localisée en périphérie d'une zone où l'activité sismique est relativement importante (Bertil, 1996 ; Ralambomanana, 1999), la zone d'étude fait partie de la région d'Anjojorobe qui appartient, selon la classification phytogéographique de la végétation établie par Gaussen (1964), au domaine de végétation du « Centre-Est de Madagascar » et, d'après les divisions en zones écofloristiques de Madagascar, à la « zone écofloristique orientale de moyenne altitude » (Rajeriarison et Faramalala, 1999). Elle fait partie du bassin versant de la Sahasarotra qui couvre une superficie de 193 km^2. Cette région est formée de collines aux versants convexes au sommet et concaves à la base. Leur altitude moyenne est de 1 380 m, avec des vallées encaissées dans la partie nord mais monotones et entrecoupées par des crêtes granitiques dans la partie sud. Le point culminant se situe à 1 590 m au sud alors que la partie centrale est moins élevée (1 270 m). Le réseau hydrographique est dense, bien hiérarchisé et d'orientation sud-nord. La pente des cours d'eau est forte, soit de l'ordre de 10 m / km (Chaperon *et al.*, 1993) et donc ces cours d'eau peuvent avoir une grande capacité de transport en sédiments. Le drainage est dirigé vers le canal de Mozambique, à l'ouest de Madagascar. La région repose sur un socle cristallin d'âge précambrien appartenant au système du graphite du groupe d'Ambatolampy (Hottin, 1976). La granitisation générale du socle a entraîné la mise en place de migmatites granitoïdes, associées à des granites migmatitiques (Rantoanina, 1966). Un épais manteau d'altération, pouvant atteindre 15 à 50 m d'épaisseur, couvre en général le socle (Raunet, 1997). Les sols ferrallitiques, épais d'environ 15 m, sont perméables, de texture limoneuse et appartiennent en général à la classe des limons plastiques (Lp) à très plastiques (Lt) d'après la classification du Laboratoire des ponts et chaussées (Duchaufour, 1995). De ce fait, les sols manquent de cohésion et sont sensibles à l'érosion (Randriamanga *et al.*, 2001).

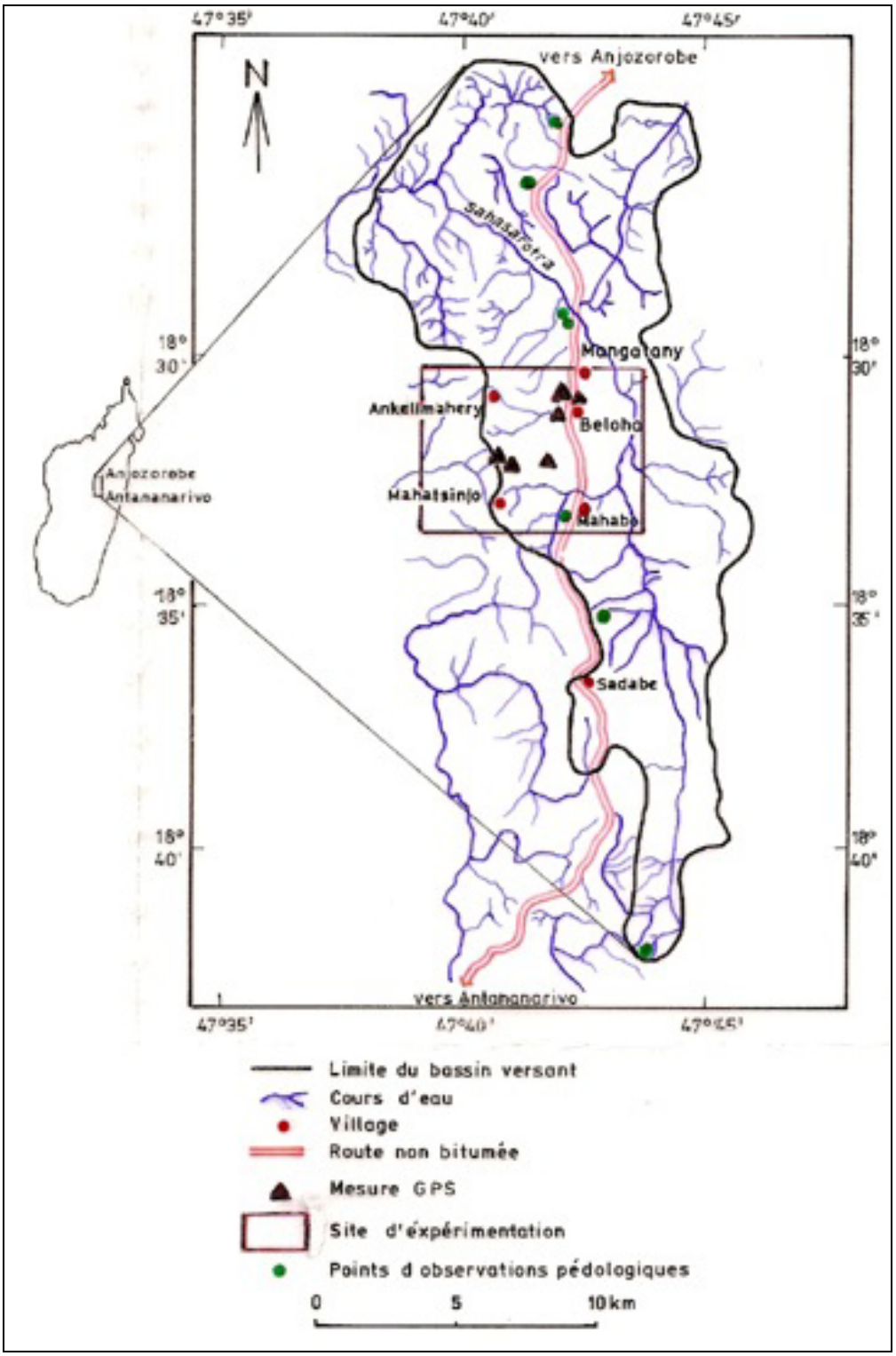


FIGURE 2 : Localisation de la zone d'étude. *Localisation of the study area*

La région est dotée d'un climat tropical d'altitude, à deux saisons contrastées (Randriamanga *et al*., 2002) : une saison sèche et fraîche, de mai à octobre, et une saison chaude et humide, de novembre à avril (figure 3). La pluviométrie annuelle est de 1 235 mm d'après les données de la normale trentenaire de la période de 1961 à 1990 provenant du Service national de la météorologie de Madagascar (1961-1990).

Les forêts originelles ont presque toutes disparu. Le domaine forestier est donc d'origine anthropique. Il s'agit essentiellement de reboisements d'*Eucalyptus robusta* et d'*Eucalyptus camalendus*, entourés de pseudo-steppes ou de steppes à *Aristida rufescens* ou à *Hyparrenia rufa*, que la population utilise comme paillage en agriculture ou comme matière première pour les toitures (Randriamanga, 2006). Mais ces graminées

sont facilement inflammables et ne constituent pas souvent un tapis herbacé continu. Cela explique la sensibilité aux incendies et la vulnérabilité à l'érosion du couvert forestier.

Cette zone rurale a une forte densité de population, soit 76 à 93 ha / km^2, contre 35 dans les autres parties de l'île (Département de géographie, 2001). L'activité principale de la population est la riziculture irriguée pratiquée dans les zones de bas fonds. C'est une région très productive. On y cultive des plantes maraîchères sur les terrasses alluviales et en bas de versant ainsi que du maïs et du manioc sur le flanc des collines (Randriamanga, 2006 ; Randriamanga et Andrianavalona, 2005), alors que l'on reboise le sommet des collines.

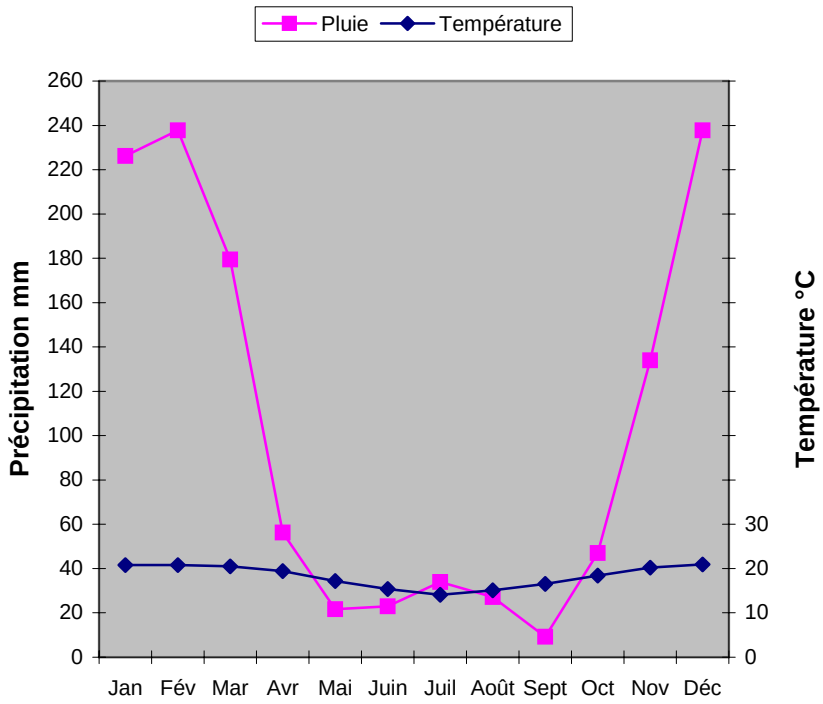


FIGURE 3 : Diagramme ombro-thermique d'Anjojorobe. *Rain and temperature diagram of Anjojorobe*

2.2. Lavakas

Un lavaka (figure 1) est défini de différentes façons suivant qu'on considère les processus internes ou de surface (Mietton *et al.*, 2005). En effet, Roose *et al.* (2000) l'identifient, suivant la typologie des ravines, à une forme d'érosion en « U » associée à l'érosion hydrique, se manifestant sur les zones dénudées ou fragilisées des hautes terres centrales de Madagascar, alors que Petit (1998) et Mietton *et al.*, (2005) l'identifient comme le résultat principalement de processus internes qui résultent de glissements de terrain ou d'affaissements par suffosion.

D'après les observations sur le terrain et d'après la littérature (Riquier, 1954 ; Allard *et al.*, 1970 ; Petit, 1998 ; Cox *et al.*, 2004 ; Zavada, 2005), le lavaka peut être de formes variées : simple ou complexe, en rigole, en cirque, en griffe, en cuillère ou digité. Il évolue par effondrements verticaux et successifs de pans entiers de ses parois. Il peut se stabiliser naturellement, mais l'érosion peut reprendre.

La formation d'un lavaka peut résulter d'un glissement de terrain lié aux actions érosives de l'eau précipitée et ruisselée qui s'infiltre là où les sols ne sont plus protégés par la végétation. En profondeur, le phénomène de suffosion dû à la circulation souterraine dans la nappe phréatique provoque des glissements brutaux (Andriamampianina, 1985). Ces glissements sont favorisés par un climat à saisons contrastées (Petit, 1998 ; Cox *et al.*, 2004 ; Bakoariniaina *et al.*, 2006).

Les analyses et mesures effectuées dans le bassin versant de la Sahasarotra font apparaître au moins deux processus de formation du lavaka en relation avec la nature du sol et la géologie : l'érosion linéaire par ravinement et l'érosion par mouvement de masse. Dans le premier cas, le fort ruissellement entraîne le creusement de chenaux profonds qui favorisent la formation de rigoles. Le creusement vertical s'accentue affectant la partie

basale du lavaka. Les ravines commencent à apparaître puis s'élargissent. Dans le second cas, l'érosion par mouvement de masse est caractérisée par des glissements rotationnels qui peuvent s'emboîter et qui entraînent les matériaux arrachés vers le bas de la pente (Randriamanga *et al.*, 2003 ; Randrianarison, 2001b). De plus, des phénomènes de soutirage se manifestent sous l'effet de la fluctuation du niveau de la nappe d'arènes sableuses qui se créent au contact du substratum rocheux. Ces phénomènes provoquent des affaissements localisés sous forme de petits gradins. L'évolution de ces affaissements aboutit à l'élargissement du lavaka.

Les facteurs permettant le déclenchement de la formation d'un lavaka sont donc nombreux : la nature géologique du substratum rocheux et la catégorie de sol, la tectonique, l'absence de végétation, le réseau hydrographique et la circulation souterraine. C'est en effet dans les sols formés principalement sur du gneiss que se développe le lavaka. Les circonstances aggravantes ont des origines essentiellement anthropiques.

3. IMAGE ET CARTES UTILISÉES

Une image en date du 25 septembre 1994, acquise par le capteur TM de Landsat et corrigée géométriquement (figure 3) a été utilisée. Cette date correspond à la fin des saisons sèche et humide. Des travaux sur le terrain ont été faits en 2000 pour actualiser les données d'occupation du sol dérivées du traitement de cette image.

Les données cartographiques utilisées comprennent des cartes topographiques à 1 / 100 000 du Foiben Taosarintan'i Madagasikara (1954, 1969), soit celles d'Ambohimanga (1969) et d'Ambatomena (1954), des cartes géologiques à 1 / 100 000 du Service des mines de Madagascar (1965), soit celles d'Ambohimanga et d'Ambatomena, une carte d'occupation du sol du bassin versant de la Sahasarotra tirée de l'interprétation stéréoscopique des photographies aériennes de 1949 à 1 / 40 000 (Randriamanga *et al.*, 2003).

La gestion, le traitement, l'analyse et la représentation des données ont été effectués à l'aide de différents logiciels : Adobe Photoshop 4.0 pour la gestion des fichiers, IDRISI 32 pour le traitement de l'image (classification, masque et vectorisation) et le SIG MapInfo Professional™ 5.5 pour l'analyse spatiale ainsi que la réalisation et la gestion des cartes.

4. TRAITEMENT DE L'IMAGE

D'après Puech *et al.* (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 basée sur la reconnaissance par objet devient essentielle. Un retour vers la prise de vue aéroportée pour la reconnaissance et l'analyse des formes est donc recommandée. Bonn et Rochon (1992) préconisent l'extraction des fractions de sols nus par une analyse en convolution spectrale. Nous avons cependant privilégié la classification automatique de l'image, ignorant la technique du modèle numérique d'altitude, que nous avons appliquée dans la cartographie des zones à risques d'érosion dans le bassin versant de la Sahasarotra (Randrianarison, 2001a, b ; Randriamanga *et al.*, 2001, 2002 et 2003 ; Rakotondraompiana *et al.*, 2004) pour tester une expérience nouvelle en matière de vectorisation de l'image.

Nous avons tout d'abord procédé à l'extraction, à partir de l'image de TM, d'une fenêtre de travail correspondant aux limites du bassin versant de la Sahasarotra (figure 4). Comme cette image est déjà ré-échantillonnée à 25 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 IDRISI 32, puis géopositionnée à partir de quatre points de contrôle localisés sur la carte topographique (Bonn et Rochon, 1992).

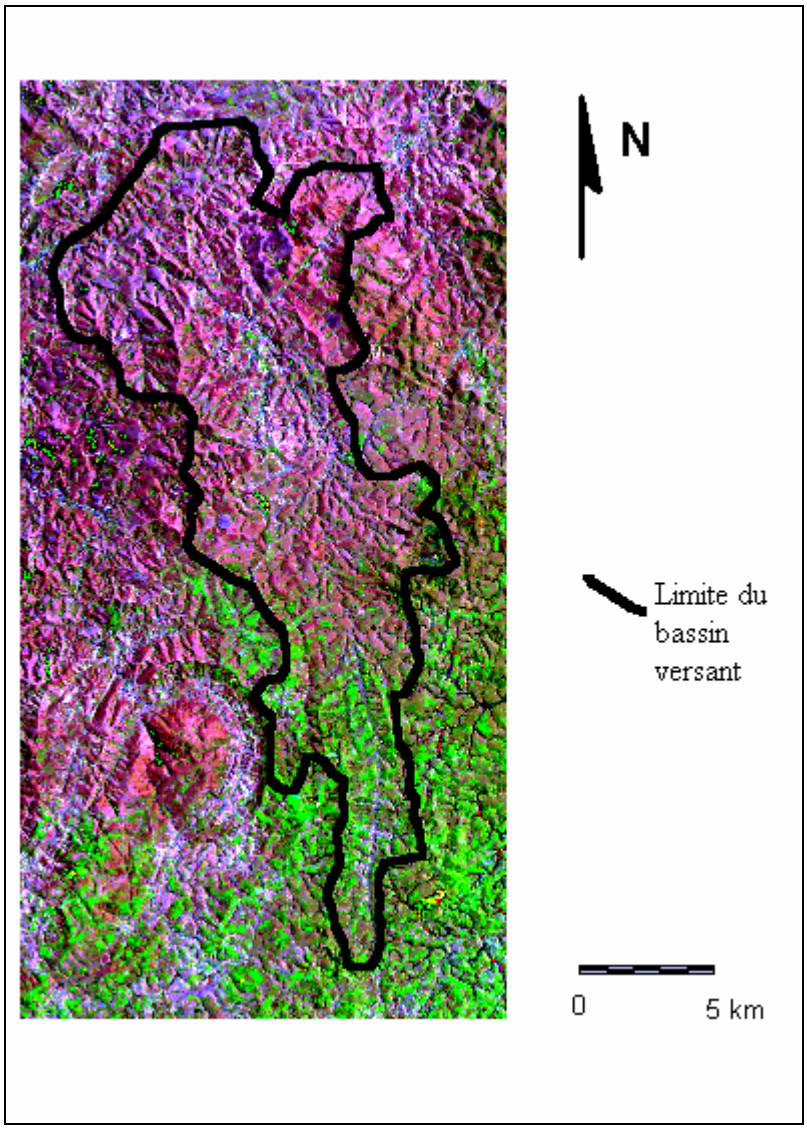


FIGURE 4 : Composition colorée RVB TM5 / TM4 / TM3 d'une image de TM de Landsat. *Colour composite RVB TM5 / TM4 / TM3 of a Landsat TM image*

4.1. Classification de l'image

La classification est l'opération qui permet de saisir automatiquement les sols nus de 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 dirigée a été appliquée pour avoir des éléments de référence à l'analyse et la classification dirigée pour le traitement numérique de l'image.

4.1.1. Classification non dirigée

La classification a débuté par l'observation des bandes brutes. Nus avons 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 et Rochon, 1992), nous avons préféré calculer l'indice de végétation normalisé (*Normalized Difference Vegetation Index*) avec les bandes spectrales TM3 et TM4 pour faire ressortir l'érosion.

On a ainsi obtenu une image en valeurs réelles qui a été transformée pour afficher les NDVI en noir et blanc suivant 256 niveaux. 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. On crée alors la composition colorée à 8 bits : TM3B / TM4V et TM5R, soit 215 couleurs.

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, nous avons étudié 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. L'analyse radiométrique a été réalisée en créant un lien interactif entre la composition colorée et les bandes brutes. Nous avons observé et analysé l'histogramme de l'image qui affiche 6 pics (figure 5). IDRISI 32 classe les objets de l'image et les regroupe en populations identiques en fonction des pics. Suivant la finesse du niveau de généralisation, IDRISI 32 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, nous en avons retenu six (forêt, savane, culture, rizière, sol nu et ombre) qui serviront de base pour la nomenclature de la classification dirigée.

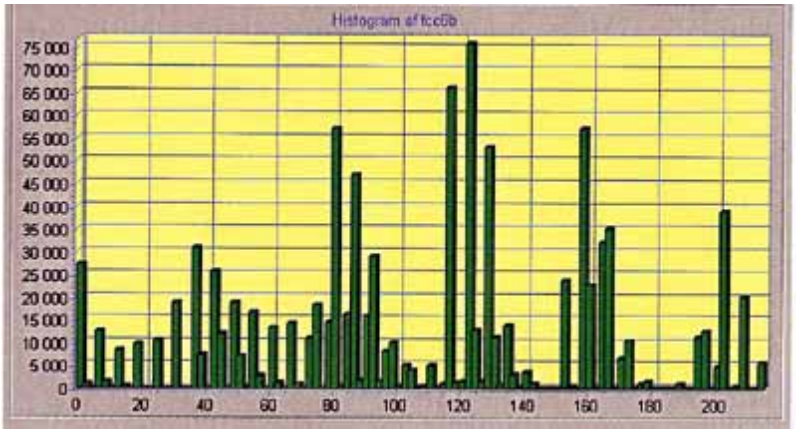


FIGURE 5 : Histogramme de l'image de la figure 4. *Histogram of the figure 4 image*

4.1.2. Classification dirigée

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. Nous avons finalement retenu la classification par maximum de vraisemblance qui considère que toutes les classes ont une probabilité *a priori* identique et qui présente des résultats proches de la réalité.

4.2. Validation et amélioration de la classification

La validation des résultats de la classification a été réalisée à partir des observations faites sur le terrain et des cartes topographiques. Leur superposition et leur comparaison avec l'image classifiée ont exigé l'exportation des images matricielles d'IDRISI 32 (composition colorée et image classée) dans le système MapInfo™ 5.5, où avait été préalablement importées la carte d'occupation des sols tirée de l'interprétation des photographies aériennes de 1949 et les cartes topographiques de la zone étudiée. Toutes les couches d'information importées dans MapInfo™ 5.5 ont été géopositionnées selon le système géodésique WGS60 par la prise de quatre points de contrôle repérés sur les cartes topographiques.

Afin d'éliminer les pixels isolés et de simplifier le résultat de la classification de l'occupation du sol en vue de la phase de vectorisation, l'image classifiée a été filtrée à partir d'un filtre modal qui permet de lisser l'image suivant une fenêtre glissante de la taille de 5 x 5 pixels (figure 6). Le résultat rend compte à 90 % de l'occupation du sol dans la zone d'étude.

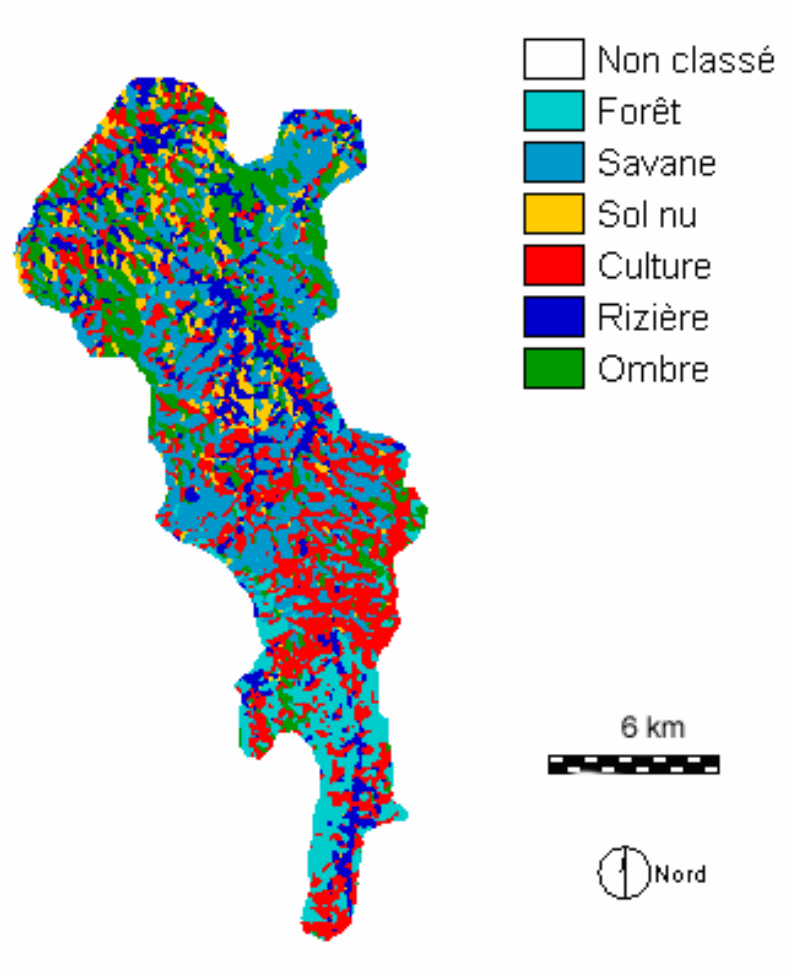


FIGURE 6 : Image de TM de Landsat classifiée et filtrée. *Classified and filtered Landsat TM image*

4.3. Segmentation et extraction des sols nus de l'image

Différentes couches vectorielles (contour du bassin versant, sols nus) ont été générées dans MapInfo™ 5.5. Entre autres, le contour du bassin versant de la Sahasarotra 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 figurent les lavakas, les manipulations ont été effectuées dans IDRISI 32 en deux étapes : l'application d'un masque sur l'image classifiée et la création d'une image en noir et blanc.

Tout d'abord, nous avons créé un nouveau plan sur lequel on a procédé à la segmentation de l'image classifiée en suivant la limite du bassin versant. Nous avons masqué tout ce qui se trouvait à l'extérieur du bassin versant. Ensuite, nous avons procédé à la création d'une image en noir et blanc. La méthode consistait à créer un nouveau plan matriciel. À toutes les classes d'objet autres que « sols nus », nous avons appliqué la tonalité noire de valeur 0 et aux sols nus la tonalité blanche de valeur 1. Nous avons obtenu une image classifiée et filtrée en noir et blanc qui ne laisse apparaître que les sols nus (figure 7). L'image résultante a été vectorisée dans IDRISI 32. On obtient une nouvelle image en noir et blanc dans laquelle les limites des sols nus sont des polylignes et les surfaces de sols nus, des régions multipolygones auxquelles sont associées des données attributs. Au total, 269 polygones, y compris la limite du bassin versant et celle de l'image de TM, ont été vectorisés.

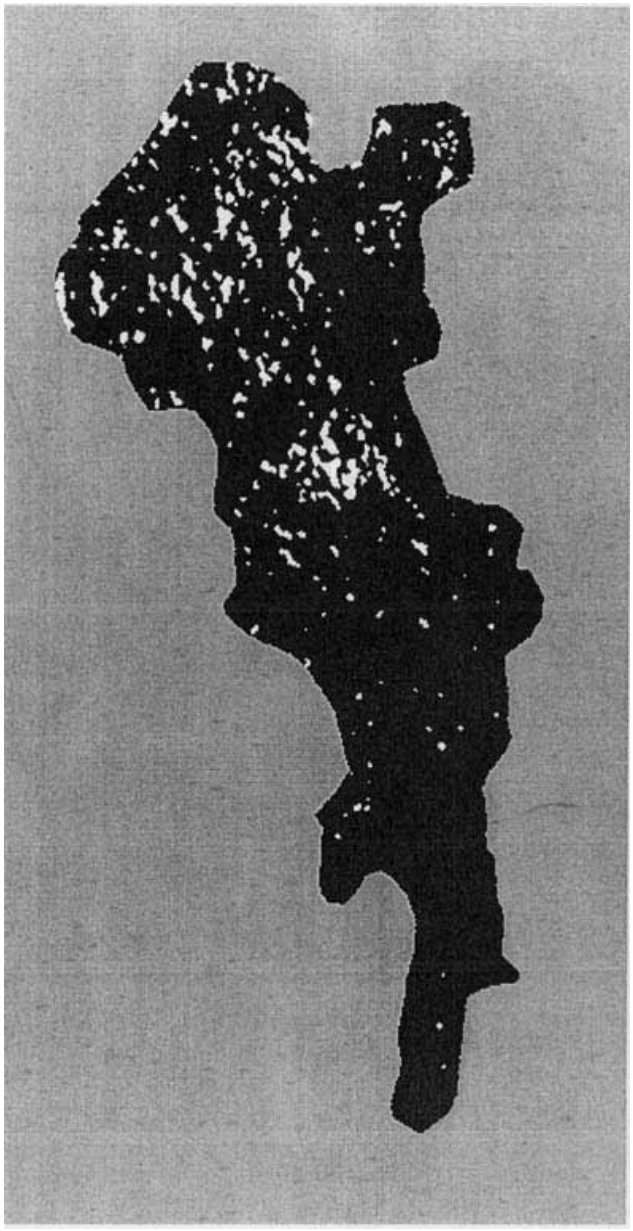


FIGURE 7 : Image de TM de Landsat des sols nus classifiée et filtrée. *Classified and filtered Landsat TM image of the bare soils.*

4.4. Typologie de l'érosion

La carte représentant les sols nus vectorisés a ensuite été superposée dans MapInfo™ 5.5 au fond topographique à 1 / 100 000. 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 (tableau 1).

En s'aidant de la carte topographique, nous avons ensuite effacé tous les polygones de sols nus représentant les alluvions sableuses des cours d'eau ou les chemins, pour ne garder que les lavakas. On a ainsi obtenu la carte finale des sols nus qui représente les catégories de lavaka du bassin versant de la Sahasarotra (figure 8). À l'aide de MapInfo™ 5.5, nous avons affiché les différentes propriétés de chaque classe de lavaka (tableau 2).

Nous avons ensuite effectué 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. Puis, nous avons procédé à l'analyse thématique de l'érosion.

TABLEAU 1 : Typologie des lavakas du bassin versant de la Sahasarotra.
Lavaka types in the Sahasarotra River watershed

Numéro d'identification	Couleur sur la carte	Catégorie de lavaka	Description
1	Bleu-turquoise	Lavaka à proximité d'une rivière	La rivière est située à l'aval du lavaka
2	Jaune	Lavaka sur le flanc d'une colline	Il n'y a pas de rivière dans les environs immédiats du lavaka
3	Vert	Lavaka de catégorie mixte	Le lavaka est localisé sur le flanc d'une colline et à proximité d'une rivière
4	Marron	Autres catégories de lavaka	Lavaka+agglomération+flanc de colline Lavaka+chemin+flanc d'une colline Lavaka+culture+colline ou vallée Lavaka+rivière+route+flanc d'une colline

.

TABLEAU 2 : Catégories de lavakas du bassin versant de la Sahasarotra.
Lavaka types in the Sahasarotra River watershed

Numéro d'identification	Catégorie de lavaka	Couleur	Nombre et % en 2000	
1	Lavaka à proximité d'une rivière	Bleu turquoise	54	25 %
2	Lavaka sur le flanc d'une colline	Jaune	90	42 %
3	Lavaka sur le flanc d'une colline et à proximité d'une rivière	Vert	29	13 %
4	Autres catégories de lavaka	Marron	43	20 %
	TOTAL		216	100 %

4.5. Validation de la carte des catégories de lavakas

La validation de la carte des catégories de lavakas a été faite au moyen de sa comparaison avec la réalité de terrain et les cartes topographiques. Ces couches d'information ont été superposées à l'aide de MapInfo™ 5.5.

5. RÉSULTATS

La démarche détaillée ci-dessus a conduit à des résultats nouveaux en matière de traitement d'image et d'extraction des catégories de lavakas.

Une lecture rapide de la figure 8 montre, qu'en 2000 (données de 1994 actualisées), 85 % des lavakas se localisent essentiellement dans la moitié nord de la carte et plus particulièrement au NO, le long d'un axe NO-SE. Les lavakas à proximité d'une rivière prédominent dans le NO suivant une orientation NO-SE. Ceux qui occupent le flanc d'une colline se situent aussi pour la plupart dans la moitié nord de la carte, mais suivant un axe NE-SO. Les lavakas de catégorie mixte, c'est-à-dire à la fois sur le flanc d'une colline et à proximité d'un cours d'eau, se rencontrent au centre. Les autres catégories de lavakas, en particulier celles qui sont étroitement liées aux activités humaines, sont nombreuses au centre et au sud.

La comparaison de la carte des catégories de lavakas avec les cartes topographiques et la carte d'occupation des sols de 1949 montre des correspondances flagrantes entre les diverses données, ainsi que par la validation des classes d'objet sur le terrain.

La superposition de la carte des catégories d'érosion et de la carte géologique apporte des éléments d'explication à la répartition des lavakas. Le premier vient de la nature du substratum et du sol. C'est dans les sols à faible cohésion formés sur des gneiss que se développent surtout les lavakas.

Ainsi s'explique la prédominance des lavakas dans la partie nord du bassin versant. Le second élément d'explication est donné par la tectonique. La partie nord du bassin versant de la Sahasarotra est très fracturée. On remarque la prépondérance des lavakas le long des axes de fractures. L'analyse de la carte topographique avec celle des catégories de lavakas montre la localisation d'une grande majorité de lavakas à proximité d'un cours d'eau.

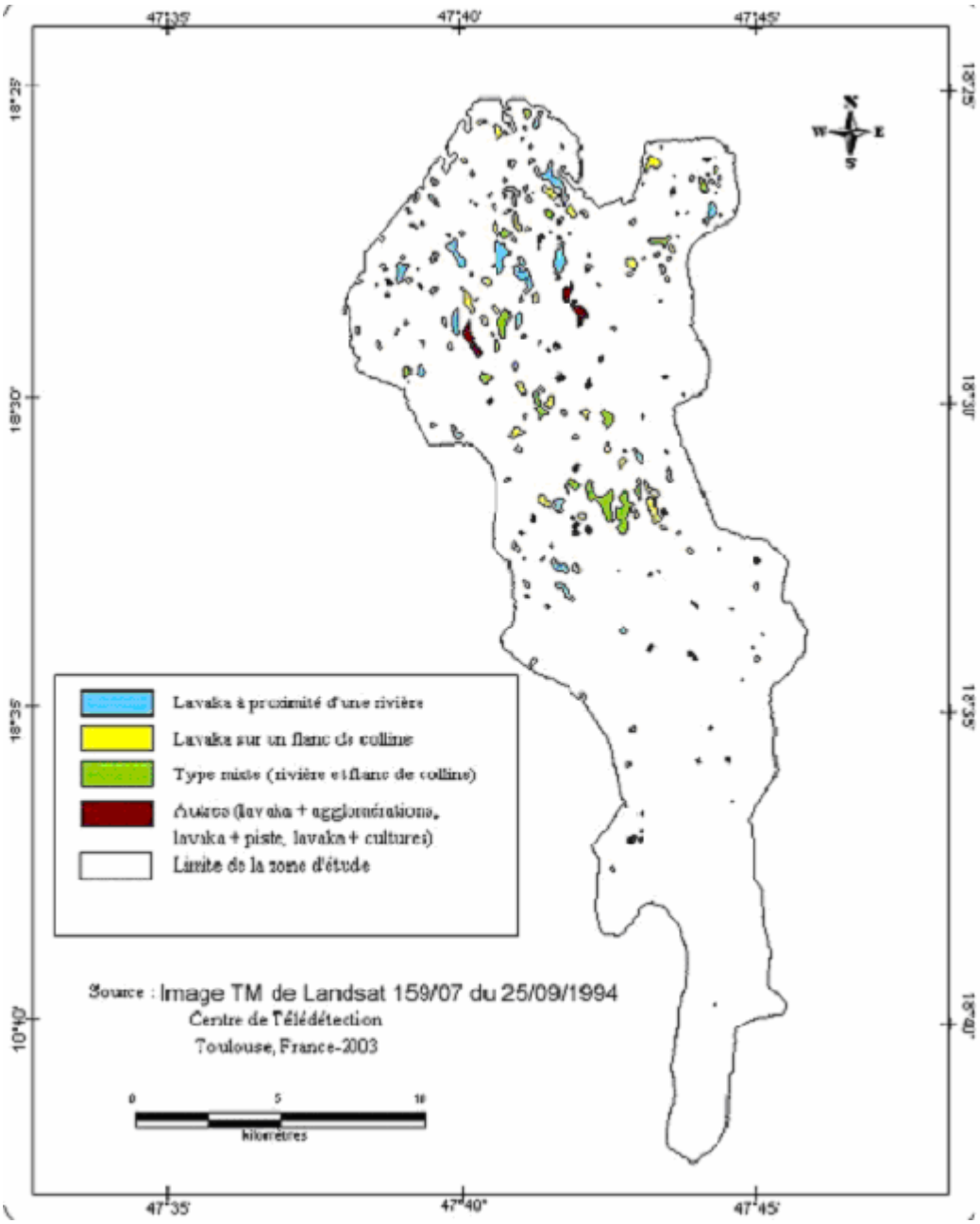


FIGURE 8 : Typologie des lavakas. *Lavaka types*

Au plan quantitatif, le tableau 3 met plusieurs points en évidence. En effet, par rapport à la situation de 1949, les lavakas du bassin versant de la Sahasarotra sont passés de 144, soit une superficie de 367 km², à 216 en 2000, soit une superficie de 955 km². Les lavakas ont donc augmenté en nombre, 72 lavakas de plus, soit une augmentation de 50 %, et ils ont aussi augmenté en superficie, 587 km² en plus, soit une augmentation de 160 %. Ainsi, en l'espace d'une cinquantaine d'années, l'érosion hydrique a augmenté et les anciens lavakas ont pris une ampleur considérable.

Les lavakas sur le flanc des collines sont les plus nombreux (90), soit 42 % des lavakas identifiés en 2000. Les 54 lavakas situés à proximité d'un cours d'eau représentent 25 % des lavakas répertoriés. Les lavakas situés près d'un chemin ou d'un village demeurent considérables (43), soit 20 % des lavakas. Ce sont les lavakas de catégorie mixte situés sur le flanc d'une colline et à proximité d'un cours d'eau qui sont les moins nombreux (29), soit 13 % des lavakas.

TABLEAU 3 : Évolution des lavakas du bassin versant de la Sahasarotra, de 1949 à 2000. *Lavaka evolution in the Sahasarotra River watershed, from 1949 to 2000*

Catégorie de lavaka	Lavakas en 1949		Lavakas en 2000	
	Surface / km²	Nombre	Surface / km²	Nombre
Lavaka à proximité d'une rivière	X	X	280	54
Lavaka sur le flanc d'une colline	X	X	306	90
Lavaka de catégorie mixte	X	X	218	29
Autres catégories de lavaka	X	X	152	43
Toutes catégories de lavaka	3,7	144	955	216

X Données manquantes

6. DISCUSSION ET CONCLUSION

L'extraction automatique des lavakas est donc possible par le traitement numérique de l'image satellitaire. C'est dans la bande TM3 et dans le canal P qu'on discerne le mieux les lavakas à partir de l'image du capteur TM ou ETM+.

La plupart des auteurs s'accordent sur au moins deux processus dans la formation d'un lavaka : un phénomène en surface, dû au ruissellement, et des phénomènes internes qui prédominent dans tous les cas (Petit et Bourgeat 1965 ; Petit, 1998 ; Randrianarison, 2001b ; Randriamanga *et al.*, 2002, 2003 ; Rakotondraompiana, 2002, 2004 ; Mulder and Idoe, 2004 ; Cox *et al*., 2004 ; Mietton *et al*., 2005). Mais le débat reste ouvert car le processus n'est pas encore bien élucidé.

On peut d'ores et déjà classer les lavakas du bassin versant de la Sahasarotra en deux grands groupes suivant qu'ils sont sous l'influence d'un phénomène naturel ou qu'ils résultent d'une action anthropique. Les premiers situés à proximité d'un cours d'eau ou sur le flanc d'une colline ou les deux à la fois, prédominent à 80 % des lavakas répertoriés, soit 173 sur 216. Leur origine est naturelle. Les lavakas en rapport avec une action anthropique (chemin, habitat et culture, etc.) sont moins nombreux. On n'en dénombre que 43, soit 20 % des lavakas répertoriés. Les processus naturels l'emportent donc dans 80 % des cas sur les processus anthropiques. Ceci montre bien que l'action humaine est peu significative par rapport aux causes naturelles. Sur le terrain, on a en effet pu constater que ce sont les ravines qui sont souvent la conséquence de la déforestation intense dans le sud du bassin versant, d'une pratique culturale inadaptée, des effets des pistes tracées dans le paysage ou des sillons laissés par le passage des zébus. Cependant, il ne s'agit là que de causes secondaires à l'origine du déclenchement des lavakas, car les trois-quarts des lavakas répertoriés sont d'origine naturelle. Ce constat confirme les résultats obtenus par Wells *et al*., (1991), Petit (1998), Cox *et al*. (2004) et Zavada (2005). Tous s'accordent que, tout au plus 25 % des lavakas résultent d'une action anthropique. Nous pensons que la typologie de l'érosion développée dans cette étude peut ouvrir des perspectives nouvelles quant à la recherche sur le processus de formation des lavakas.

Ces résultats n'auraient pas pu être obtenus sans la synergie devenue indispensable entre techniques spatiales et l'intégration des données dans un SIG.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du concours du projet franco-malgache d'appui aux formations d'enseignement supérieur à Madagascar, du Laboratoire d'écologie terrestre, de l'Université Paul Sabatier de Toulouse et de l'Agence universitaire de la Francophonie. Que tous trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Références

Allard, M., Auberts, J.M. et Lacoste, P. (1970) Géologie de Madagascar. Éditions de l'École, Paris, 89 p.

Andriamampianina, N. (1985) Les lavakas malgaches : leur dynamique érosive et leur stabilisation. Madagascar Revue de Géographie, n° 46, p. 69-85.

Andrianavalona, M. H. et Randriamanga, R.S. (2005) Implications de l'érosion hydrique dans l'aménagement du bassin versant d'Antsaharatsy, Hautes Terres centrales de Madagascar. P. 97-101, *in* Ratsivalaka, S., Serpantié, G., De Noni, G. et Roose, E. (réd.) Les Actes des Journées scientifiques régionales du réseau Érosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols, Agence universitaire de la Francophonie, Antananarivo, 25-27 octobre 2005, 190 p.

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 fampiroborobona ny eny ambanivohitra et Office national de l'environnement, 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, Antananarivo, 27 p.

Bakoariniaina, L.N., Kusky, T. and Raharimahefa, T. (2006) Disappearing Lake Alaotra : Monitoring catastrophic erosion, waterway silting, and land degradation hazards in Madagascar using Landsat imagery. Journal of African Earth Sciences, vol. 44, p. 241-252.

Barbier, R. (1980) L'érosion souterraine à l'origine des lavakas de Madagascar. P. 17-21, *in* Thone, G. (réd.) Hommage à Léon Calembert. Université de Liège, Liége, 272 p.

Bertil, D. (1996) Sismicité instrumentale de Madagascar et hypothèses sur les réactivations tectoniques récentes. P. 11-18, *in* Université d'Antananarivo (réd.) Actes journées scientifiques Rifting malgache. Université d'Antananarivo, Antananarivo, 164 p.

Bonn, F. et Rochon, G. (1992) Précis de télédétection, Volume 1 : Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec / AUPELF, Sainte-Foy, 485 p.

Brenon, P. (1952) Contribution à l'étude pétrographique et géologique des terrains cristallins de Madagascar dans les régions de l'Antsihanaka, de l'Antqnosimboangy (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 273 p.

Caloz, R. et Collet, C. (2001) Précis de télédétection, Volume 3 : Traitements numériques d'images de télédétection. Presses de

l'Université du Québec et Agence universitaire de la Francophonie, Sainte-Foy, 386 p.

Chaperon, P., Danloux, J. et Ferry, L. (1993) Fleuves et rivières de Madagascar. ORSTOM, Éditions Direction de la météorologie et de l'hydrologie et Centre national de recherche sur l'environnement, Paris, Monographie hydrologique 10, 874 p.

Collet, C. (2000) Vers un système d'assistance à l'interprétation d'images numériques de télédétection (IIAO). P. 27-38, *in* Bannari, A. (réd.) La télédétection optique et radar et la géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux. Édition de l'Université d'Ottawa, Ottawa, 310 p.

Cox, R., Rakotondrazafy, A.F.M. and Rakotondramazava, H.T. (2004) Geological versus human controls on lavaka formation and extreme erosion in Madagascar. Geological Society of America, vol. 36, p. 364-377.

Cox, R., Rakotondrazafy, A.F.M. and Bakoariniaina, L.N. (2005) Geological controls on development of gullies (lavakas), central Madagascar. Les Actes des Journées scientifiques régionales du réseau Érosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols de l'Agence universitaire de la Francophonie, Antananarivo, 25-27 octobre 2005 (communication par affiche).

Département de géographie (2001) Anjojorobe, Alakamisy Andranomadio, Mangamila. Rapports de voyage d'étude du 17 au 21 avril 2001, niveau licence, Faculté des lettres et sciences humaines, Antananarivo, 3 vol., 37, 40 et 38 p.

Duchaufour, Ph. (1995) Pédologie, sol, végétation, environnement. 4e édition, Masson, Paris, 342 p.

Foiben Taosarintanin'i Madagasikara (1954) Ambatomena. Feuille Q 46, carte topographique de base à 1 / 100 000.

Foiben Taosarintanin'i Madagasikara (1969) Ambohimanga. Feuille F 46, carte topographique de base à 1 / 100 000.

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

Hottin, G. (1976) Précambrien de Madagascar. Bulletin du BRGM, vol. IV, p. 151-199.

Le Bourdiec, P. (1972) Accelerate erosion and soil degradation. P. 227-259, *in* Battistini, R., Richard-Vindard, G. and Junk, W. (réd.) Biogeography and ecology in Madagascar. W. Junk Publishers, The Hague, 765 p.

Mietton, M., Grisorio, E., Erismann, J., Bonnier, F. et Rafanomezana, J.P. (2005) Ancienneté et vitesse d'érosion des lavakas à Madagascar. P. 47, *in* Ratsivalaka, S., Serpantié, G., De Noni et G. Roose, E. (réd.) Les Actes des Journées scientifiques régionales du réseau Érosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols, Agence universitaire de la Francophonie, Antananarivo, 25-27 octobre 2005, 190 p.

Mulder, H. and Idoe, O. (2004) Lavaka the « hole » story. Analysis and design of an integrated bio-physical and socio-economic ESWC management approach to the lavaka phenomenon in Madagascar. Erosion Soil and Water Conservation Group, Wageningen University Environmental Sciences, Wageningen, 125 p.

Petit, M. (1998) Présentation physique de la grande île Madagascar. Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara, Antananarivo, 192 p.

Petit, M. et Bourgeat, F. (1965) Les lavakas malgaches : un agent naturel d'évolution des versants. Bulletin de l'Association des géographes français, no 332-333, p. 29-33.

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

Rabarimanana, M.H., Raharison, L.J.R. et Chorowicz, J. (2003) Cartographie des lavaka par télédétection : analyse des facteurs et gestion des espaces ruraux à Madagascar. Télédétection, vol. 3, n° 2-4, p. 105-130,

Rajeriarison, C. et Faramalala, M. (1999) Nomenclature des formations végétales de Madagascar. Association nationale pour la gestion des aires protégées, Antananarivo, 43 p. et annexes.

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.

Rakotondraompiana, S., Randrianarison, T. et Collet, C. (2002) Caractérisation des zones d'érosion à partir des paramètres géomorphologiques : cas d'un bassin versant des Hautes Terres de Madagascar. Télédétection, vol. 2 n° 2-3, p. 55-67.

Rakotondraompiana, A.S., Collet, C. et Ratsivalaka, R.S. (2004) Hiérarchisation des risques d'érosion des sols à l'intérieur d'un bassin versant par une approche floue. Xes Journées scientifiques de télédétection. Réseau Télédétection de l'Agence universitaire de la Francophonie, Géorisques et télédétection. Ottawa, 24-29 mai 2004 (communication).

Ralambomanana, G. (1999) Topography of the Moho under the central region of Madagascar. Pre-publication, Centre International de Physique Théorique, Trieste, Italie.

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. (2006) Practices and management of soil resource in the highlands of Madagascar. P. 228, *in* International Soil Conservation Organisation (réd.) The 14th International Soil Conservation Organisation Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi-arid Environments. Marrakech, 14-19 mai 2006, Éditions de l'Institut National de la Recherche Agronomique, Marrakech, 295 p.

Randriamanga, S. et Andrianavalona, H. (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. (réd.). Les Actes des Journées scientifiques régionales du réseau Érosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols, Agence universitaire de la Francophonie, Antananarivo, 25-27 octobre 2005, 190 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. Premier rapport scientifique intermédiaire. Action de recherche partagée, Réseau Télédétection, Agence universitaire de la Francophonie, Antananarivo, 46 p.

Randriamanga, S., Raharijaona, L.J., Razafy Fara, L., Rakotondraompiana, S., Rakotoniaina, S., Ratovo, H.M., Randrianarison, L.T., Andriamanantsoa, E. et Simon, R. (2002) Étude par télédétection des géorisques dans la région d'Anjojorobe, Madagascar. Deuxième rapport scientifique intermédiaire. Action de recherche partagée, Réseau Télédétection, Agence universitaire de la Francophonie, Antananarivo, 82 p.

Randriamanga, S., Collet, C., Rakotondraompiana, S. et Randrianarison, L.T. (2003) Étude par télédétection des géorisques dans la région d'Anjojorobe Madagascar. Télédétection, vol. 3, n° 2-4, p. 131-149.

Randrianarison, L T. (2001a) Apport de la géophysique et de la géomatique à l'étude et à la prédiction des zones à risques d'érosion dans le bassin versant de la Sahasarotra. Rapport de DEA, Institut et observatoire de géophysique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, 68 p.

Randrianarison, L T. (2001b) Deux mécanismes physiques d'érosion des sols dans les Hautes Terres de Madagascar par les méthodes géophysiques et géotechniques. Journées de la recherche Mahajanga. Madagascar, 30-31 octobre 2001, Communication par affiche.

Rasolofoniaina (1966) Géologie et prospection au 1 / 100 000 des feuilles Ambohimanga, Ambatomena (PQ46). Service des mines, Antananarivo, Madagascar.

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

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

Roose, E., Chebbani, R. et Bourougaa, L. (2000) Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. Synthèse. Sécheresse, vol. 11, no 4, p. 317-326.

Rougerie, M.G. (1965) Les lavakas dans l'évolution des versants à Madagascar. Bulletin des géographes français, no 1965-04, p. 15-28.

Service des mines de Madagascar (1965) Cartes géologiques à 1 / 100 000 d'Ambohimanga, Feuille P 46 et d'Ambatomena, Feuille Q 46. Antananarivo.

Service national de la météorologie de Madagascar (1961-1990) Normale trentenaire des données climatologiques de la station climatique d'Anjojorobe. Antanarivo.

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

Wells, N.A., Andriamihaja, B. and Rakotovololona, H.P.S. (1991) Pattern of development of lavaka, Madagascar's unusual gullies. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 16, p. 189-206.

Zavada, M.S. (2005) Thoughts and reflections. Are "lavaka" important for the conservation ? Misouri Botanical Garden (MBG), Ravintara, vol. 3, n° 1, p. 3-4.