Télédétection, 2003, vol. 3, n° 2-3-4, p. 105–130
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

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

CARTOGRAPHIE DES LAVAKA PAR TÉLÉDÉTECTION : ANALYSE DES FACTEURS ET GESTION DES ESPACES RURAUX À MADAGASCAR

MAMY HERISOA RABARIMANANA*,[1], LÉA JACQUELINE RAHARIJAONA RAHARISON[2], et JEAN CHOROWICZ[3].

[1] *Centre de Formation aux Sciences de l'Information Géographique et de l'Environnement*
Boîte Postale 5103, Antananarivo, Madagascar.
Téléphone : (261)(0) 32 07 769 51 ; télécopieur : (261)(20) 22 408 57

[2] *École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Département de Géologie*
Boîte Postale 1500, Antananarivo 101, Madagascar.
Téléphone : (261)(20) 22 276 96 ; télécopieur : (261)(20) 22 248 54

[3] *Université Pierre et Marie Curie, Laboratoire de Tectonique*
Case 129 ; 4, place Jussieu, 75252 Paris, cedex 05, France.
Téléphone : (33)(0)1 44 27 50 89 ; télécopieur : (33)(0)1 44 27 50 85

Courriel [(1,2,3)] : rab_mamy@yahoo.fr ; ljrahari@syfed.refer.mg ; jean.chorowicz@lgs.jussieu.fr

(soumis le 2 avril 2002 ; révisé le 29 juillet 2002 ; accepté le 28 octobre 2002)

Les lavaka sont des formes d'érosion fréquemment rencontrées sur les Hautes-terres centrales de Madagascar. Les facteurs intervenant ainsi que les processus de l'érosion sont encore mal connus et font l'objet d'interprétations diverses. Pour comprendre ce phénomène, en particulier son évolution spatiale et sa dynamique, nous en avons établi une cartographie sur de vastes régions à partir de différents types d'images satellitaires optiques (HRV de SPOT, TM et ETM+ de Landsat) ou RSO de ERS. Les images HRV constituent un jeu de données complet : 1) la stéréoscopie permet d'identifier les lavaka par leurs formes ; 2) les scènes multibandes montrent essentiellement les lavaka actifs, caractérisés par des sols nus. Les données TM et ETM+ expriment également assez bien les formes de relief par les ombres bien contrastées sur les images à cause de l'heure d'acquisition matinale (9 h 30, locale). Cependant, l'éclairement rasant est un inconvénient car les structures à parois abruptes sont profondément incisées dans le terrain. Les images RSO montrent aussi les formes d'érosion, mais c'est une vision déformée, et il n'est pas possible de faire la différence entre les formes anciennes et les formes actives. Le résultat final de cette analyse multisource est une cartographie des lavaka sur de grandes surfaces. L'intégration de cette carte dans une base de données d'un système d'information géographique a mis en évidence des corrélations entre la distribution des lavaka et divers paramètres exprimant la lithologie, la géomorphologie, la pédologie, l'hydrologie, la végétation et les actions anthropiques. Les facteurs déjà connus sont confirmés : ce sont les sols épais à carapace qui sont érodés (facteur d'état), sur les versants à pente moyenne à forte (facteur favorisant), en fonction de la destruction de la carapace sous l'effet de la pression humaine (facteur déclenchant), laquelle est préservée par la forêt. Le fait vraiment nouveau est qu'un mauvais drainage du sous-sol semble être aussi un facteur favorisant. Ceci a permis en outre d'évaluer l'ampleur du phénomène d'érosion et de réfléchir en termes d'aménagement dans le cadre d'une gestion des espaces ruraux, en prenant en compte les actions humaines destructrices de la carapace et la qualité du drainage.

Mots-clefs : lavaka, érosion ; cartographie ; télédétection ; Madagascar ; photo-interprétation.

CARTOGRAPHY OF LAVAKA BY REMOTE SENSING : REVIEW OF DIFFERENT FACTORS AND RURAL PLANNING IN MADAGASCAR

Lavaka are erosional patterns that are frequently met on the Highlands of Central Madagascar. The intervening factors as well as precise erosion processes are still badly known and subjected to various interpretations. In order to better understand this phenomenon, especially its spatial evolution and dynamics, we have mapped lavaka features over large regions, using complementary types of optical (SPOT and Landsat) or radar (SAR) satellite imageries. The SPOT scenes form a complete data set: 1) stereoscopy allows to identify the lavaka from their shapes; 2) bare soils in the multispectral images characterize the active ones. The Landsat data also fairly express the morphology from the shadows on the images, better contrasted at early morning acquisitions (9 h 30, local time). However, shadow is a disadvantage for these structures deeply incised in the relief. The Synthetic Aperture Radar (SAR) images of

* Correspondant principal

ERS also favor the expression of relief patterns but the views are deformed and it is not possible to make the difference between the ancient and the active forms. The result of this multi-source analysis is a map covering a large region. Integration of this map into the Geographic Information System database has allowed us to evidence correlations between the distribution of the lavaka and that of other parameters such as lithology, active faults, the morphology, the pedology, the hydrology, the vegetation and human effects. The factors that were already known are confirmed: the thick soils with carapace are submitted to lavaka erosion (state of things factor), along gentle or steep slopes (favoring factor), depending from the destruction of the carapace due to anthropic pressure (triggering factors), which on the contrary can be preserved by the forest. The new fact is that bad draining seems to be part of the favoring factors. This work has also permitted to assess the extent of the erosion and to translate this information into considerations for rural management, taking into account the human actions and the quality of the draining.

Keywords : Lavaka, Erosion ; Mapping ; Remote Sensing ; Madagascar ; Photo-interpretation.

1. INTRODUCTION

Les lavaka sont des formes d'érosion très répandues à Madagascar, témoignant de la dégradation du sol dans les Hautes-terres. Pendant la saison des pluies, il y a destruction du paysage et les sédiments provenant de l'érosion provoquent l'ensablement des rizières et des infrastructures hydrauliques. Un rapport de la Banque Mondiale (1987) a souligné la gravité des dégâts dus aux lavaka sur le plan socio-économique. La réduction des rizières risque de compromettre l'autosuffisance alimentaire de Madagascar et d'accentuer la pauvreté.

Les facteurs intervenant ainsi que les processus de l'érosion sont encore mal connus et font l'objet d'interprétations diverses (Besairie, 1952 ; Lautel, 1952 ; Brenon, 1952 ; Riquier, 1954 ; Petit et Bourgeat, 1965 ; Raunet, 1984 ; Andriamampianina, 1985 ; Wells *et al.* 1991 ; Raharijaona et Randrianarison, 1999 ; Roose *et al.,* 2000). Il est clair que ce sont les sols épais à carapace qui sont érodés, sous l'effet de facteurs déclenchants qui détruisent cette carapace, dans les versants à pentes fortes. La plupart des études antérieures ont été limitées à l'identification des lavaka et n'ont pas établi de cartographie régionale pour en connaître la répartition spatiale (Riquier, 1954 ; Wells *et al.*, 1991). Pour comprendre ce phénomène, en particulier sa dynamique et son évolution spatiale, on se propose *1)* de cartographier les lavaka sur une vaste région à l'échelle du bassin ou du sous-bassin versant, à partir d'images satellitaires, *2)* de chercher des corrélations entre la carte des lavaka et des facteurs supposés intervenir.

L'hypothèse de travail est la suivante : la comparaison entre la densité (visuelle ou calculée) de lavaka par unité de surface cartographique, et une carte des variations d'un facteur donné, devrait permettre d'évaluer l'influence de ce facteur. La recherche des corrélations doit se faire à l'aide d'un système d'information géographique. Acquérir cette information est une étape préalable à la compréhension du processus d'érosion de type lavaka. L'intérêt pratique de l'étude est double. D'une part, la cartographie des lavaka permet de mettre en place des outils de suivi et d'évaluation de la situation actuelle dans les secteurs les plus touchés (sous forme de bases de données). D'autre part, la connaissance des différents facteurs est indispensable à l'élaboration des plans d'action environnementale ou de gestion des espaces ruraux afin de réduire l'impact de l'érosion.

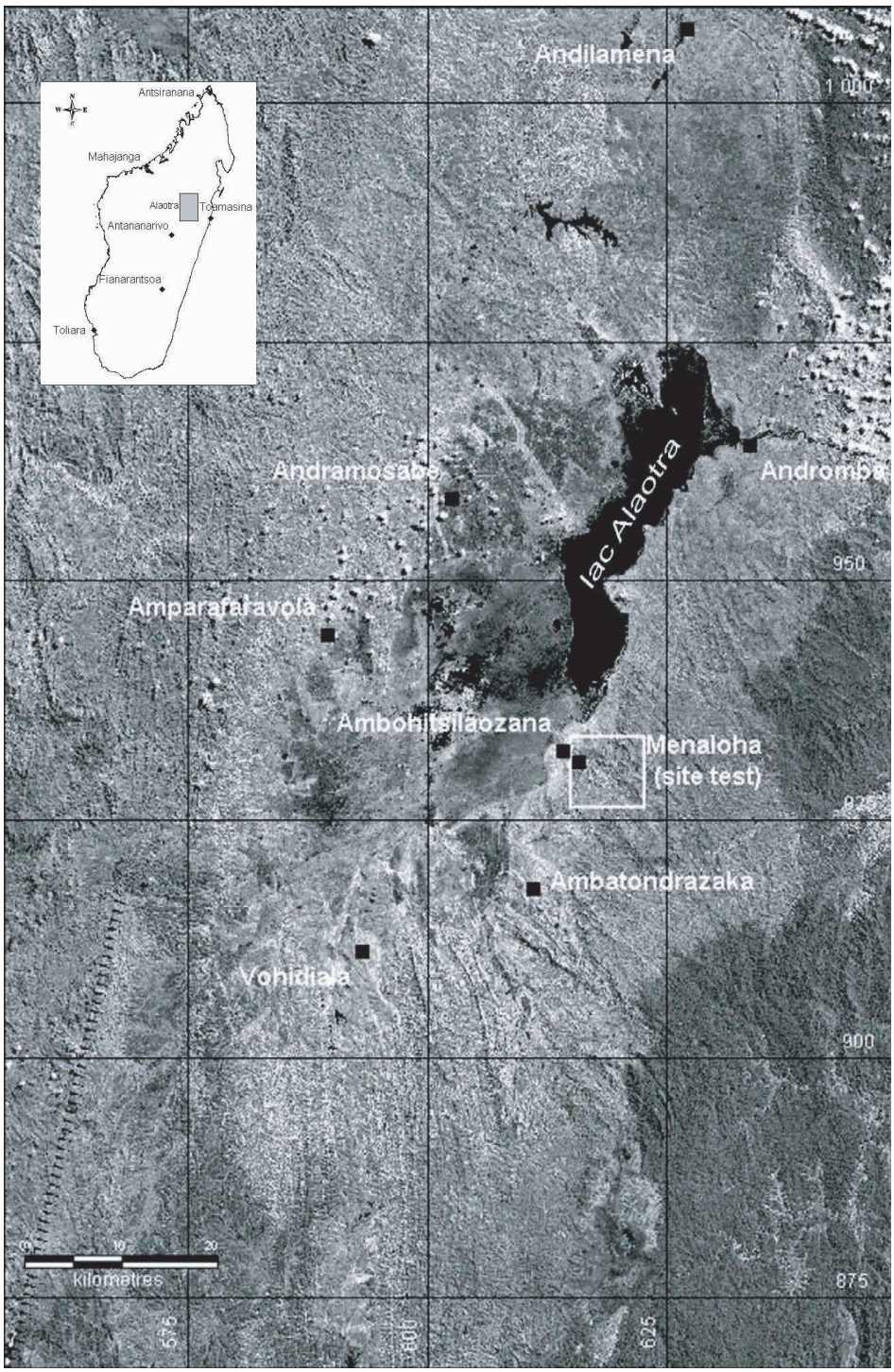
Après une rapide description de la zone de travail et des données de télédétection utilisées, nous faisons une recherche des caractéristiques des lavaka tels qu'ils se présentent sur ces données. Nous décrivons ensuite notre méthode de cartographie. L'analyse de corrélations entre la carte des lavaka et les cartes de facteurs est suivie d'une discussion.

2. RÉGION DU LAC ALAOTRA

La région du lac Alaotra (figure 1) est située à 150 km au nord-est d'Antananarivo, sur le flanc oriental des Hautes-terres de Madagascar. Elle est fortement affectée par les lavaka dont les effets néfastes se font sentir sur la production de riz. Elle est choisie comme zone d'étude en raison de ses particularités géologiques, notamment sa diversité pétrographique et son activité néotectonique.

L'hydrogéologie est caractérisée par la présence d'une nappe aquifère libre, d'arène sur un socle fissuré, dont la profondeur varie de 25 à 100 m. La surface piézométrique est située de 5 à 15 m sous la surface. Le débit moyen est de 0,3 à 1,00 $m^3/s/m$ (Office National pour l'Environnement, 1997).

Les caractéristiques hydrologiques de la région (Chaperon *et al.,* 1994) sont les suivantes : la lame d'eau écoulée inter-annuelle (h) est comprise entre 500 et 1 000 mm ; le coefficient moyen d'écoulement (Ke) est de 30 à 50 % ; le débit de crue médiane (Dc) est de 120 à 300 $l/s/km^2$; le débit d'étiage médian (De) est de 3 à 8 $l/s/km^2$ et l'irrégularité inter mensuelle (Ii) est comprise entre 6 et 10 M/m. À Andromba, les précipitations cumulées de novembre à mars représentent 90 % du total annuel (tableau 1). La lame cumulée ne représente que 43 % du total écoulé annuel. La différence est emmagasinée dans le lac, les marécages, les rizières et les nappes souterraines.



Système de coordonnées : Laborde Madagascar (km)

FIGURE 1 Spatiocarte de localisation, issue de l'image ETM+ de Landsat. *Location map, made from Landsat ETM+ image.*

TABLEAU 1 Bilan hydrologique moyen (mm). *Mean hydrologic data.*

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P	264,2	239,5	223,2	45,8	11,4	7,0	8,1	7,5	4,9	24,9	144,5	188,9
ETP	220,5	234,5	203,0	34,6	27,7	17,2	13,2	14,4	6,9	24,4	101,4	127,9
P-ETR	268,8	174,1	193,8	23,3	8,4	6,7	4,7	4,3	4,4	23,8	108,0	200,2
H	209,6	235,4	164,3	34,5	16,4	12,7	8,2	9,9	6,6	16,3	107,0	197,2

P : pluviosité ; ETP : évapo-transpiration réelle ; H : hauteur d'eau (Chaperon *et al.,* 1994)

Le climat est tropical humide (1 200 mm/an) à deux saisons contrastées. La saison sèche s'étend d'avril à août et la saison des pluies d'octobre à mars (tableau 2). L'indice de pluie calculé suivant l'équation universelle de perte en terre (USLE) est de R = 479 u.s.a entre 1962 et 1968 (Bailly *et al.,* 1976). L'insolation moyenne annuelle est de 2 085 h au niveau d'Ambohitsilaozana, correspondant à une température moyenne annuelle de l'ordre de 15 °. Durant le mois le plus frais, la température est comprise entre 5 et 10 °C. L'indice global d'humidité atmosphérique, calculé selon la méthode de Thornthwaite est compris entre 20 et 100.

La couverture végétale comporte des forêts primaires, des forêts dégradées et reboisées, divers types de savane et de nombreuses rizières associées à des mosaïques de cultures variées (tableau 3).

La population de la région du lac Alaotra (tableau 4) est de l'ordre de 400 000 habitants, avec un taux de croissance brute de 3 %. La riziculture est l'activité principale. La plaine lacustre s'étend sur 180 000 ha, dont 123 000 ha de sols hydromorphes tourbeux ou minéraux constituant le support de la riziculture. La production annuelle représente le tiers du total national. Près de 85 % de la population active travaille dans l'agriculture.

3. DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION UTILISÉES

Le problème est de savoir quels types d'images de télédétection utiliser pour obtenir une bonne cartographie des lavaka. Pour ce faire, nous avons comparé des images de lavaka de tailles et d'orientations différentes, dans différents contextes, extraites des données à notre disposition. Certaines images ont été associées (par exemple en utilisant la stéréoscopie) ou traitées (composition colorée, recherche des surfaces nues par l'indice de brillance du sol). Les données satellitaires utilisées sont décrites sur le tableau 5.

Les photographies aériennes sont en noir et blanc. À plat, les surfaces sombres peuvent représenter différents types de végétation ou des ombres mais la morphologie est souvent mal perçue. L'usage de ces photographies à plat est donc limité. Par contre, l'identification est optimale en stéréoscopie compte tenu du fait que les lavaka anciens ou actifs présentent une bonne expression géomorphologique. La résolution étant métrique, il est possible d'observer les plus petits lavaka. Les photographies aériennes stéréoscopiques dont nous disposons représentent la meilleure source d'information. Cependant, la surface couverte par chaque couple stéréoscopique est faible et, pour chercher des corrélations entre des facteurs possibles et des cartes de répartition des lavaka, il faut cartographier de vastes surfaces, ce qui exige un travail de photo-interprétation très long. De plus, il est difficile de géoréférencer les photographies aériennes en raison des distorsions.

Les images HRV utilisées sont multibandes (tachèle 20 m) ou panchromatiques (tachèle 10 m). Ces résolutions permettent d'observer de petits lavaka, peut-être pas dans tous leurs détails mais ce n'est pas nécessaire pour faire une carte de leur répartition. Ces images peuvent former des couples stéréoscopiques HRV P/P, HRV P/XS ou HRV/ TM. La combinaison HRV XS + P accentue les contrastes entre la végétation active et le reste de l'occupation du sol car la végétation active apparaît en noir dans le panchromatique (P).

Les images TM sont acquises vers 9 h 30 et la géomorphologie est bien marquée par les ombres. Cependant, la tachèle à 30 m n'est pas suffisamment précise pour observer des détails, notamment les petits lavaka. Les images ETM+ de Landsat-7, à tachèle de 15 m, améliorent sensiblement la résolution spatiale. Ces images couvrent de vastes surfaces à moindre coût, et l'échantillon des lavaka cartographiés nous paraît suffisamment représentatif pour chercher des corrélations avec d'autres données. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi d'effectuer la cartographie à l'échelle régionale à partir des images TM.

TABLEAU 2 Moyenne des précipitations mensuelles entre 1945 et 1957. Mean of monthly rain amount between 1945 and 1957.

Pluviométrie moyenne (en mm d'eau)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Vohidiala	264,2	239,5	223,2	45,8	11,4	7,0	8,1	7,5	4,9	24,9	144,5	188,9
Amparafaravola	220,5	234,5	203,0	34,6	27,7	17,2	13,2	14,4	6,9	24,4	101,4	127,9
Ambatondrazaka	268,8	174,1	193,8	23,3	8,4	6,7	4,7	4,3	4,4	23,8	108,0	200,2
Andramosabe	209,6	235,4	164,3	34,5	16,4	12,7	8,2	9,9	6,6	16,3	107,0	197,2

Nombre de jours pluvieux

Vohidiala	16	15	16	6	4	4	5	5	2	3	10	12
Amparafaravola	10	10	11	3	3	3	2	2	1	1	6	8
Ambatondrazaka	15	14	14	5	2	3	4	4	2	3	9	13
Andramosabe	12	12	13	5	3	5	3	3	2	2	8	9

Foibe Fikarohana momba ny Fampandrosoana - Direction Régionale pour le Développement *et al.,* 1960)

TABLEAU 3 Taux de couverture végétale. *Percentage of the vegetation cover.*

Type de végétation	Superficie (ha)	Taux (%)
Forêt dense	74 573	10,06
Forêt dégradée	1 506	0,20
Zone reboisée	36 397	4,91
Savane arborée	166 840	22,52
Savane herbeuse	244 459	32,99
Rizières	122 942	16,59
Mosaïque de cultures	22 246	3,00
Marécage	49 827	6,72
Plan d'eau	22 201	3,00
TOTAL	740 993	100,00

Calculé d'après la BD500 (Foibe Taosarintanin'i Madagasikara, 1996).

TABLEAU 4 Caractéristiques de la population en 1993. *Characteristics of the population in 1993.*

Fivondronana (Districts)	Superficie (km^2)	Population totale (hab.)	Taux d'urbanisation (%)	Densité de population (hab/km^2)
Amparafaravola	3 000	163 852	20,2	54,6
Ambatondrazaka	7 211	184 784	15,0	25,6
Andilamena	7 526	31 655	40,1	4,2

Extrait du bulletin statistique (Office National pour l'Environnement, 1997).

TABLEAU 5 Caractéristiques des images disponibles dans cette étude. *Characteristics of the data available in this study*.

Type d'image	Date d'acquisition	Heure d'acquisition h/mn/s	Type de capteur	Nombre de canaux	Niveau de correction géométrique	Tachèle	Angle d'incidence	Autres
Photographies aériennes	1969							échelle = 1/60 000 focale = 124,3 mm altitude = 8500 m
SPOT	18/04/86	06 54 30	HVR (XS)	3	1B	20	R 20.6	
	18/04/86	06 58 28	HVR (P)	1	1B	10	R 20.6	
	25/03/91	06 50 38	HVR (XS)	3	1B	20	R 27.8	
Landsat	08/03/85		TM	7	1G	30		
	21/10/92		TM	7	1G	30		
	15/09/93		TM	7	1G	30		
	25/09/94		TM	7	1G	30		
	12/05/00		ETM+ (P)	9	1G	15		
	15/05/00		ETM+ (P)	9	1G	15		
	19/04/00		ETM+ (P)	9	1G	15		
ERS 1	28/06/94	19 40 00	RSO	1	SLC	25		
ERS 2	26/09/97	06 53 16	RSO	1	SLC	25		

Pour les images RSO, la tachèle utile est de l'ordre de 25 m, ce qui ne montre pas les petites structures. Les sols nus ne sont pas exprimés. Par contre, les formes du relief sont visibles, essentiellement dans les versants opposés à l'illumination, ceux qui font face au radar étant surbrillants et de surface réduite. Il faut donc utiliser des images d'orbites descendantes et montantes complémentaires. Les images radar sont difficiles à géoréférencer correctement en raison des distorsions.

Les lavaka s'expriment sur les images satellitaires par un aspect de creux. L'expression géomorphologique dépend de l'orientation des parois par rapport aux capteurs, à l'angle d'incidence et à la luminosité. Les rigoles de ravinement ne sont observables que sur les photographies aériennes.

4. CARACTÉRISTIQUES DES LAVAKA

Le terme « lavaka » (trou en malgache) désigne un type d'érosion régressive ayant des caractéristiques géomorphologiques particulières (Tricart, 1953 ; Riquier, 1954 ; Heusch, 1981 ; Raunet, 1984). Les lavaka sont situés souvent à mi-pente ou en bas de pente, sur des versants moyens ou abrupts constitués d'épaisses couches d'altération argilo-sableuse ou d'argile latéritique, gorgées d'eau à leur base (Raunet, 1984 ; Andriamampianina, 1985).

En plan, le tracé permet d'individualiser la tête et le cône de déjection. Ces deux parties sont séparées par un étranglement (goulot), souvent prolongé d'un chenal plus ou moins long, s'ouvrant en aval par un exutoire étroit. La tête se présente sous forme d'une excavation ou d'un bassin de réception élargi en amont, rétréci en aval, en forme de cirque ovoïde ou d'amphithéâtre allongé, lobé ou digité. La coupe transversale de la tête est en U ou en V suivant le stade d'évolution (Wells and Andriamihaja, 1993). Le diamètre peut atteindre une centaine de mètres et la profondeur 50 m, parfois jusqu'à dégager la roche saine. Le profil longitudinal est concave. La distance entre la tête et l'exutoire peut atteindre 300 m. Dans les lavaka actifs (figure 2A, B), les parois (médianes, latérales) sont verticales. Des ravins vifs entaillent le plancher et les parois. Leur recul vers l'amont de la colline est estimé entre 0,5 et 10 m/an (Brenon, 1952 ; Dresch, 1962).

Les lavaka anciens (figure 2D) forment une dépression ouverte, de forme voisine des niches d'altération ou de têtes de vallon (Petit et Bourgeat, 1965). Les parois ont une pente d'environ 55 %, les formes de ravinement plus atténuées et le plancher

est à surface plus régulière. Les lavaka peu actifs ou en cours de stabilisation ont des parois peu ravinées (figure 2C). Les lavaka peuvent être isolés ou former des groupes (figure 3C1 à C6).

Les lavaka ont des caractéristiques multibandes qui permettent de connaître leur stade d'évolution. S'ils sont actifs, le ravinement et les dépôts du cône de déjection forment des surfaces plus ou moins nues. Il existe aussi des surfaces nues qui n'appartiennent pas à des lavaka ou aux cônes de déjection (figure 3A et A'). Les parois verticales forment des ombres, à valeurs basses dans toutes les bandes spectrales. Les lavaka non actifs sont stabilisés et leurs surfaces sont couvertes de végétation. Les pentes des parois étant plus douces, les ombres sont moins fortes (figure 3B et B').

5. CARTOGRAPHIE DES LAVAKA

5.1. Approche méthodologique

L'objectif est de cartographier, à l'échelle régionale, des éléments de lavaka à partir de données satellitaires, puis de chercher des corrélations avec des facteurs possibles (figure 4). Cependant, ces cartes doivent être validées. Pour cela, en travaillant sur une petite zone-test, nous avons comparé la carte faite à partir des images avec une carte de référence effectuée à partir de l'interprétation stéréoscopique des photographies aériennes.

La zone-test est le bassin de Menaloha, dans le sud de la région du lac Alaotra (figure 1). Nous avons effectué divers traitements sur les images satellitaires correspondantes : amélioration de la dynamique, compositions colorées, seuillages, calcul des indices de végétation et de sol nu, et nous avons identifié et cartographié un certain nombre de lavaka. Ensuite, nous avons établi puis évalué sur le terrain, une carte de référence faite à partir des photographies aériennes. Pour estimer la validité de la carte de la zone-test faite à partir des images, nous avons comparé des extraits d'images de lavaka pris au hasard avec les extraits correspondants des photographies aériennes.

Nous avons traité l'ensemble des images satellitaires de la région du lac Alaotra, de la même façon que pour la zone-test. Nous avons cartographié les lavaka et les avons intégrés dans un système d'information géographique (*MapInfo*).

5.2. Validation de la cartographie à partir des images satellitaires

Pour évaluer la validité de notre cartographie à l'aide des images satellitaires, nous avons donc établi une carte de référence à partir des photographies aériennes (figure 5). Une vérification de quelques éléments sur le terrain, avant et après la saison des pluies, a montré que la carte effectuée à partir des photographies aériennes est bonne à 100 %.

Les formes d'érosion rencontrées dans la région du lac Alaotra sont principalement des ravinements simples linéaires et des lavaka. Les autres formes de destruction sont l'érosion en nappe et l'érosion des berges des cours d'eau.

Nous avons fait la différence entre les lavaka anciens et actifs, distingués des formes intermédiaires – lavaka stabilisés en partie réactivés – et ajouté des ravinements et des formes intermédiaires entre lavaka et ravinement. L'identification est basée principalement sur la pente, la hauteur des parois et la largeur du plancher (tableau 6).

En raison de la difficulté à mettre dans une même géométrie les cartes de la zone-test faites respectivement à partir des images satellitaires et des photographies aériennes, nous avons travaillé sur des échantillons pris au hasard. Nous avons comparé ces objets tels qu'ils se présentent sur les différentes images et tels qu'ils peuvent être cartographiés (figures 6 à 8). Les différents types de donnée sont complémentaires et, en particulier, les images HRV (P) et ETM+ (canal panchromatique) donnent des contours très comparables à ceux des photographies aériennes.

5.3. Carte régionale

Pour établir la carte régionale des lavaka, nous avons donc utilisé essentiellement les images optiques. Deux approches sont efficaces : *1)* l'interprétation visuelle des formes du relief ; *2)* l'extraction assistée par ordinateur d'éléments tels que les surfaces nues.

Les images radar ont été examinées en complément. La végétation dans la région étudiée étant relativement uniforme, les images radar sont sensibles surtout aux variations de pente. Elles expriment donc la géomorphologie, avec une résolution au sol de 25 m, bien meilleure que celle des modèles numériques d'altitude (MNA) disponibles. L'analyse est uniquement visuelle. Les lavaka se distinguent par des creux de faible dimension, souvent emboîtés, presque entièrement entourés d'une ligne de crête. L'exutoire n'est pas bien visible et les creux semblent complètement fermés à cause des distorsions géométriques provoquant des recouvrements.

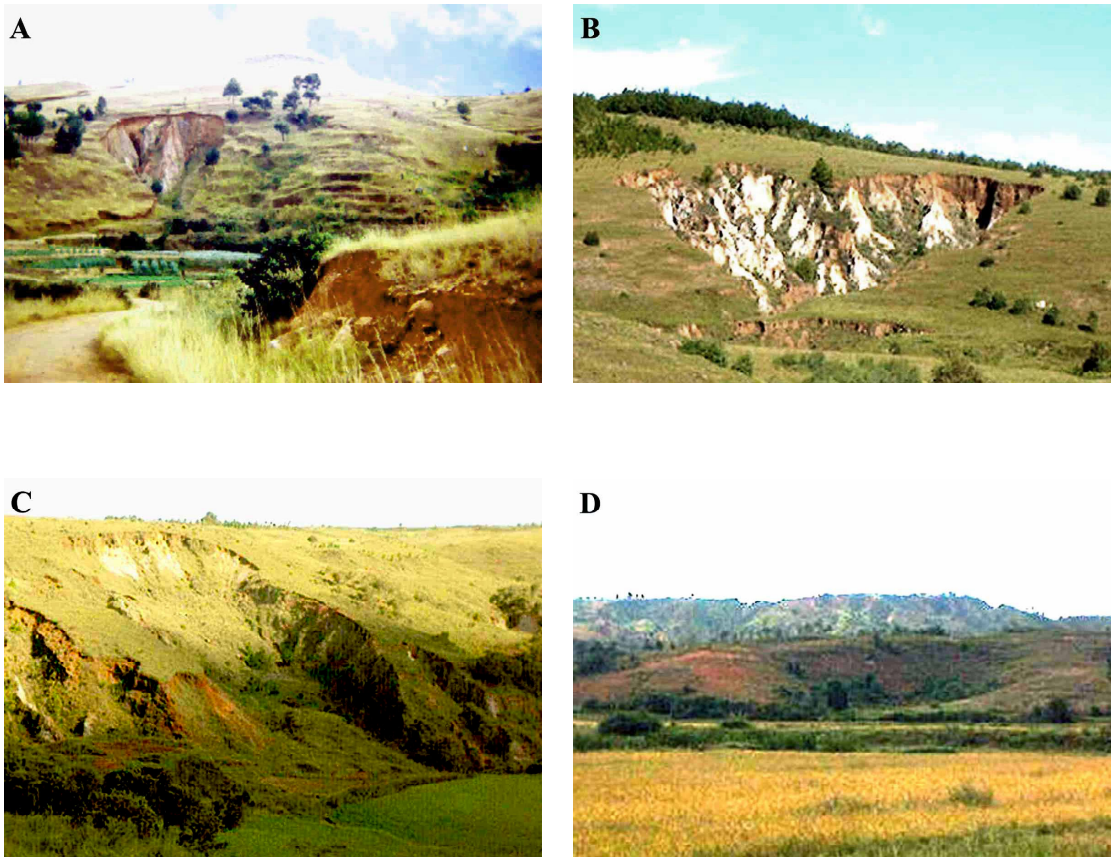


FIGURE 2 Caractéristiques géomorphologiques des lavaka.
A. Lavaka actif jeune, à un lobe en forme de creux arrondi, à parois verticales (Alasora, 10 km au sud-est d'Antananarivo).
B. Lavaka actif évolué, à deux lobes fortement ravinés (Ambatolampy, 40 km au sud d'Antananarivo).
C. Lavaka peu actif, en cours de stabilisation (forme intermédiaire), à parois peu ravinées (Arivonimamo, 30 km à l'ouest d'Antananarivo).
D. Lavaka non actif, stabilisé, à parois non verticales, sans ravinement (Menaloha-Alaotra, 150 km au nord-est d'Antananarivo).

Geomorphological characteristics of lavaka.
A. Active, young lavaka, with one round-shaped hollow lobe, with vertical slopes (Alasora, 10 km southeast of Antananarivo).
B. Advanced active lavaka, with two strongly eroded lobes (Ambatolampy, 40 km south of Antananarivo).
C. Poorly active lavaka, in the process of stabilization (intermediary form), with poorly eroded slopes (Arivonimamo, 30km west of Antananarivo).
D. Inactive lavaka, stabilized, with gentle slopes, without erosion (Menaloha-Alaotra, 150 km northeast of Antananarivo).

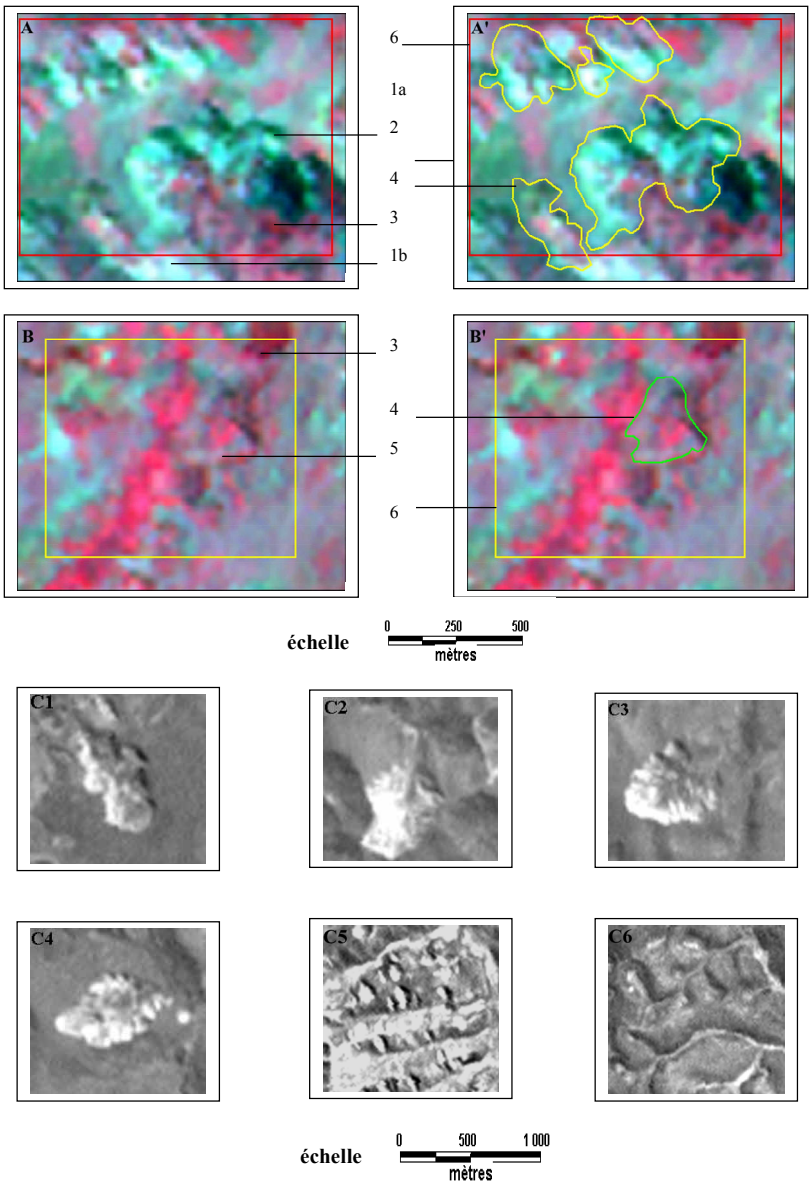


FIGURE 3 Caractéristiques radiométriques des lavaka.
A, A', B et B': extraits de compositions colorées d'images HVR (XS). A : lavaka actifs ; B : lavaka non actifs. (1a), sols nus correspondant à des ravinements ; (1b), sols nus qui ne sont pas des lavaka, et cônes de déjection ; (2), ombres de parois verticales ; (3), végétation ; (4), limites des lavaka ; (5), ombres des parois à pente douce ; (6), fenêtres de repérage.
C1 à C6 : exemples de formes et leur importance. C1 (S =15 ha ; L = 650 m ; l = 380 m) ; C2 (S = 17 ha ; L = 700 m ; l = 400 m) ; C3 (S =19.6 ha ; L = 600 m ; l = 500 m) ; C4 (S = 15 ha ; L = 650 m ; l = 360 m) ; C5 et C6 (S moy. = 1 ha ; L moy. = 200 m ; l moy. = 70 m).
S = superficie ; L = allongement; l = section ; moy. = moyenne.

Radiometric characteristics of lavaka.
A, A', B and B: extracts of color composite images of SPOT XS scenes. A : active lavaka; B: inactive lavaka. (1a), bare soils of ravines ; (1b), bare soils not related to lavaka and cones of dejection ; (2), shadows of vertical slopes ; (3), vegetation ; (4), boundary of lavaka ; (5), shadows of gentle slope ; (6), localization frames.
C1 to C6 : examples of shapes and their importance. C1 (S = 15 ha ; L = 650 m ; l = 380 m) ; C2 (S = 17 ha; L = 700 m ; l = 400 m) ; C3 (S = 19.6 ha; L = 600 m ; l = 500 m) ; C4 (S = 15 ha ; L = 650 m ; l = 360 m) ; C5 and C6 (S mean = 1 ha ; L mean = 200 m ; l mean = 70 m).
S = superficy ; L = length ; l = section.

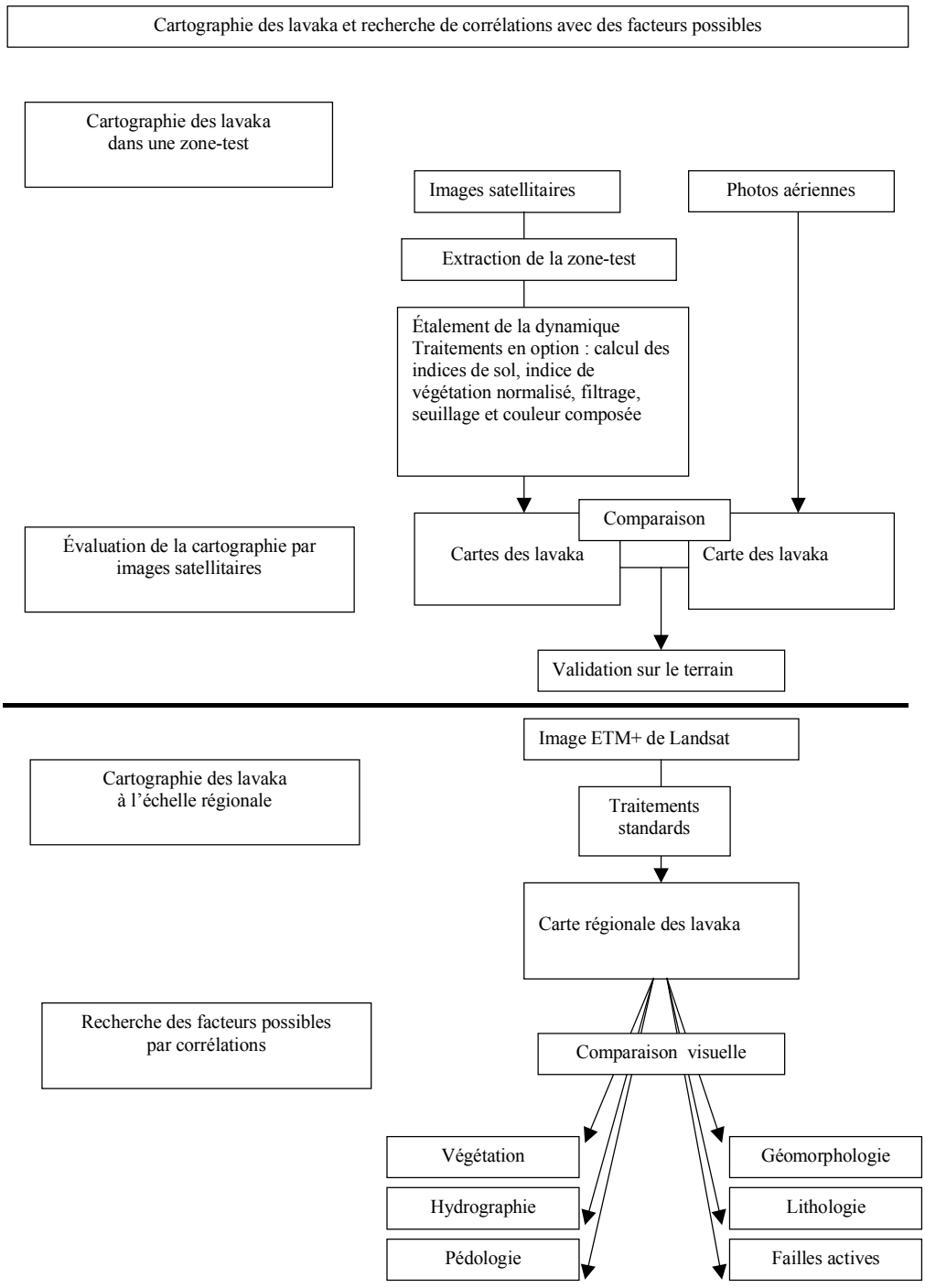
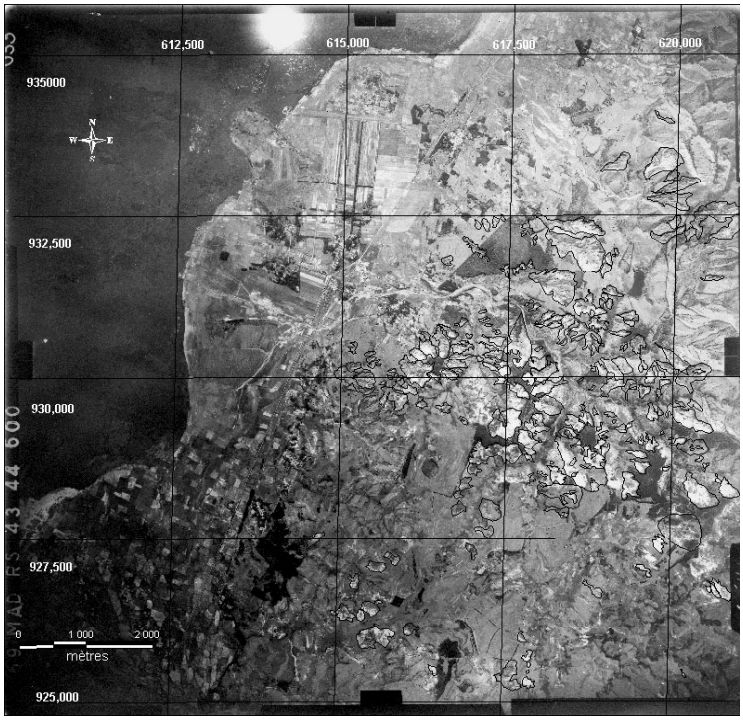


FIGURE 4 Organigramme de travail. *Flow chart of work.*



Photographie aérienne

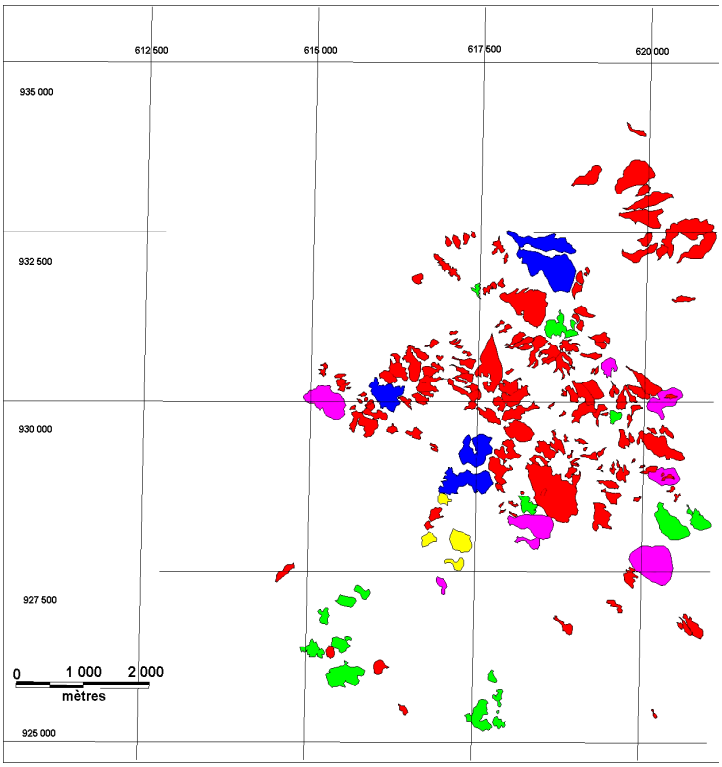


FIGURE 5 Carte de référence de la zone test par analyse d'un couple stéréoscopique de photographies aériennes. *Reference map of the test zone from the analysis of stereo pairs of arial photographs.*

TABLEAU 6 Critères de classification des lavaka. *Criteria used for lavaka classification.*

Critères / Classes	*Lavaka actifs*	*Lavaka anciens*	*Lavaka anciens réactivés*	*Ravinement*	*Forme intermédiaire (entre ravinement et lavaka)*
Parois					
Pente des parois	*Entièrement verticale*	*Raide à verticale*	*Raide au bord émoussé, Localement lisse*	*Verticale à modérée Crénelé*	*Talus vertical localisé*
Aspect de la bordure des talus	*Lisse*	*Émoussé*	*Moyen*	*Faible*	*Crénelé, localement lisse*
Hauteur des talus (vertical)	*Haut*	*Moyen*	*Localisées*	*Indiscernables*	*Variable*
Traces de mouvement de masse	*Identifiables*	*Absentes*	*Localisées*	*Abondantes*	*Localisées*
Traces de ravinement (rigoles)	*Peu nombreuses*	*Absentes*			*Localement abondantes*
Plancher (fond)	*Large*	*Très large*	*Très large*	*Réduit (chenal)*	*Chenal principal bien marqué*

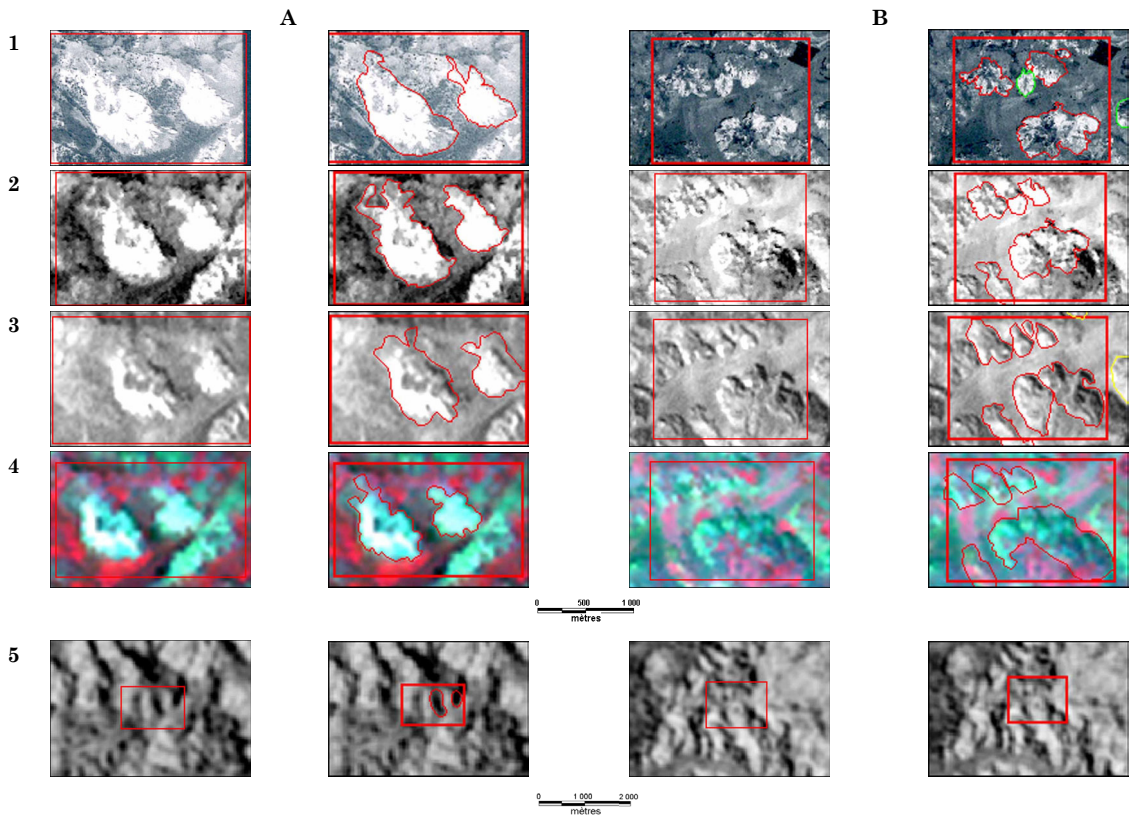


FIGURE 6 Détection des lavaka actifs.
A : échantillons de lavaka actifs (formes simples) ; B : échantillons de lavaka actifs (formes de coalescence) ; 1 : extraits de photographies aériennes ; 2 : extraits d'images HVR (P) (10 m de résolution) ; 3 : extraits d'images ETM+ (15 m de résolution) ; 4 : extraits d'images HVR (XS) (20 m de résolution) ; 5 : extraits d'images RSO (25 m de résolution).

Detection of active lavaka.
A : samples of active lavaka (simple shapes) ; B : samples of active lavaka (coalescent shapes) ; 1 : extracts from aerial photographs ; 2 : extracts from HVR panchromatic scenes (resolution10 m) ; 3 : extracts from ETM scenes (resolution 15 m) ; 4 : extracts from HVR multispectral scenes (resolution 20 m) ; 5 : extracts from SAR scenes (resolution 25 m).

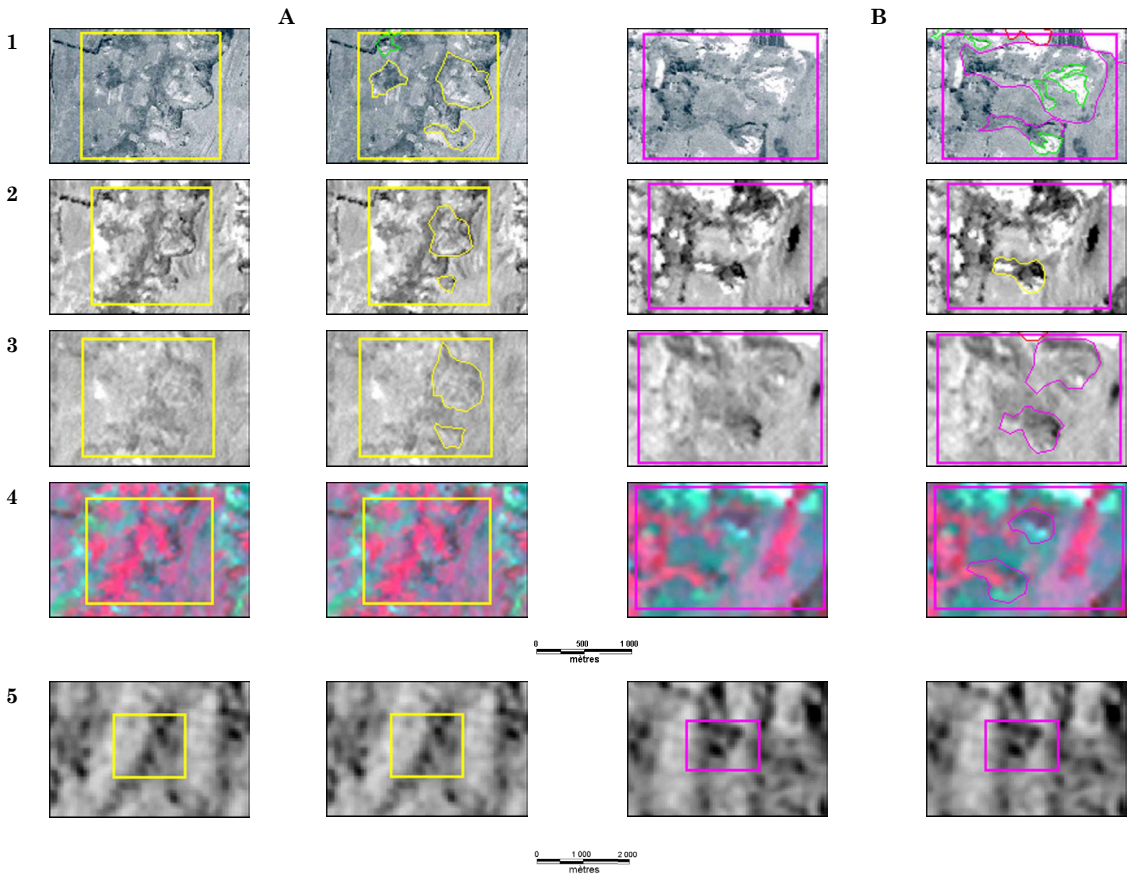


FIGURE 7 Détection des lavaka anciens.
A : échantillons de lavaka anciens (formes simples) ; B : échantillons de lavaka anciens (formes de coalescence) ; 1 : extraits de photographies aériennes ; 2 : extraits d'images HVR (P) (10 m de résolution) ; 3 : extraits d'images ETM+ (15 m de résolution) ; 4 : extraits d'images SPOT multispectrales (20 m de résolution) ; 5 : extraits d'images RSO (25 m de résolution).

Detection of ancient lavaka.
A : samples of ancient lavaka (simple shapes) ; B : samples of ancient lavaka (coalescent shapes) ; 1 : extracts from aerial photographs ; 2 : extracts from HVR panchromatic scenes (resolution 10 m) ; 3 : extracts from ETM+ scenes (resolution 15 m) ; 4 : extracts from HVR multispectral scenes (resolution 20 m) ; 5 : extracts from SAR scenes (resolution 25 m).

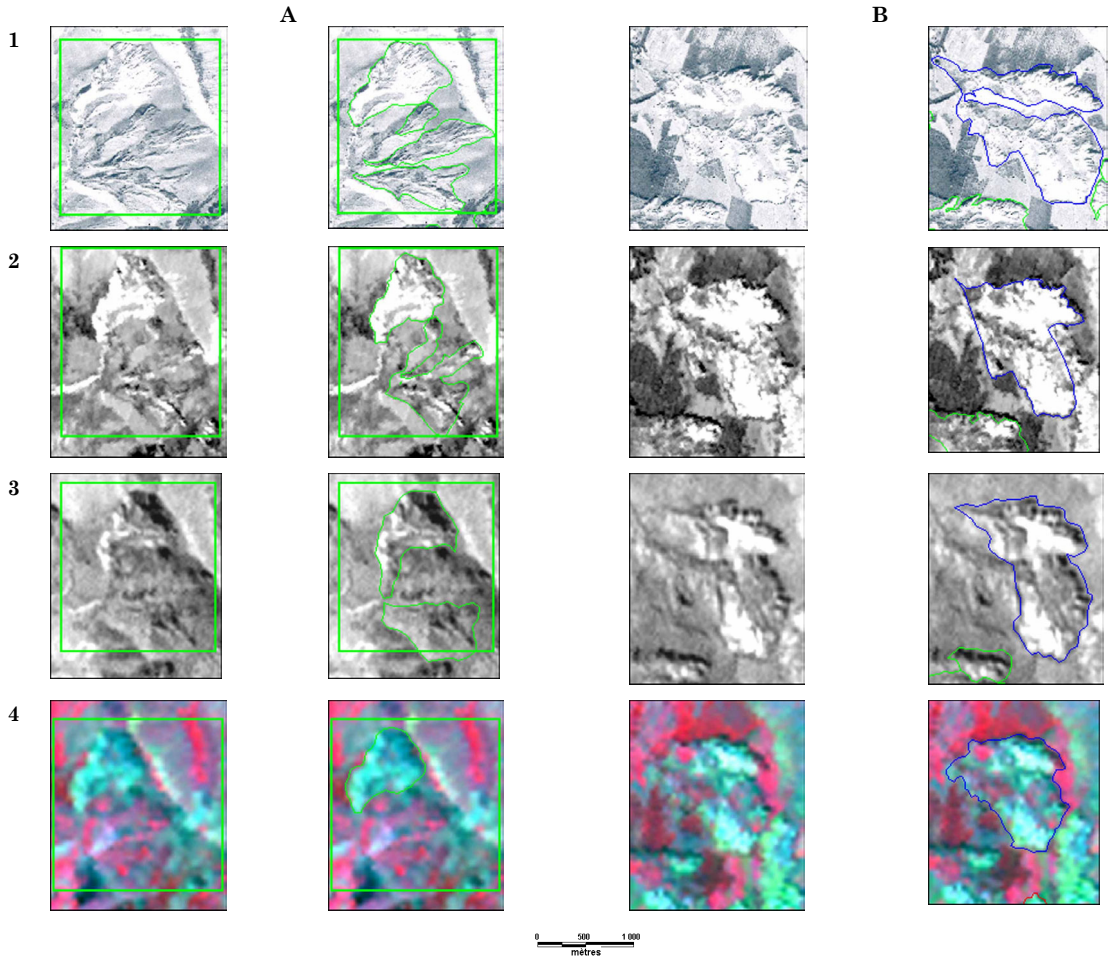


FIGURE 8 Détection de l'association de lavaka actifs et de ravinements.
A : échantillon 1 ; B : échantillon 2 ;1 : extraits de photographies aériennes ;2 : extraits d'images HVR (P) (10 m de résolution) ; 3 : extraits d'images ETM+ (15 m de résolution) ; 4 : extraits d'images HVR (XS) (20 m de résolution).
Detection of the association of active lavaka with ravines.
A : sample 1 ; B : sample 2; 1: extracts from aerial photographs ; 2 : extracts from HVR panchromatic scenes (resolution 10 m) ; 3 : extracts from ETM+ scenes (resolution 15 m) ; 4 : extracts from HVR multispectral scenes (resolution 20 m).

6. ANALYSE DE FACTEURS

6.1. Méthodologie

La méthode de recherche des facteurs susceptibles d'intervenir dans la formation des lavaka consiste à étudier les corrélations entre la carte des lavaka et la répartition des facteurs représentés dans la base de données. Il faut admettre que lorsque la répartition des lavaka coïncide avec celle d'un facteur donné (par exemple la lithologie), celui-ci intervient de manière effective. La corrélation est appréciée visuellement en comparant, par superposition dans un système d'information géographique, la carte des lavaka avec différentes cartes de facteur d'érosion, sans application de méthodes quantitatives (calcul de densité de lavaka).

Nous savons que certains facteurs peuvent être corrélés entre eux. Par exemple, le modelé est corrélé avec la lithologie. Parmi les facteurs envisageables, dont nous dressons une liste non exhaustive, seuls certains d'entre eux sont représentés dans la base de données. Certains de ces facteurs ont déjà été cités dans la littérature comme étant les causes, externes ou internes, des lavaka (Riquier, 1954, 1958), immédiates ou lointaines dans le temps (Wells and Andriamihaja, 1993). Nous regroupons ces facteurs sur le tableau 7.

TABLEAU 7 Facteurs possibles de l'érosion en lavaka. *Possible factors of lavaka erosion.*

1. Facteurs géologiques	lithologie, tectonique, orientation des couches.
2. Facteurs topographiques et géomorphologiques	angle de pente, longueur de la pente, courbure, diverses formes d'érosion : en nappe, en rigole, diverses formes de mouvement de masse : loupe de glissement, effondrement
3. Facteurs hydrogéologiques	émergence de la nappe phréatique : sources, « seeps », battement de la nappe phréatique, chimisme de la nappe phréatique
4. Facteurs pédologiques	types de sol et épaisseur de la zone altérée, présence de carapace, propriétés physiques du sol : indice de liquidité, indice de plasticité, limites d'Atterberg, indice de compaction, perméabilité, capacité d'infiltration
5. Facteurs hydrologiques	érosion des berges, sapement, encaissement de réseau, géométrie du réseau, qualité du drainage
6. Facteurs climatiques	longueur des saisons sèche et humide, changement climatique : changement de la couverture végétale, force et direction du vent : cyclone tropical, agressivité climatique : splash, hauteur des précipitations, durée d'insolation, exposition aux vents et pluies dominantes
7. Facteurs biologiques	types de végétation, enracinement
8. Facteurs anthropiques	tranchée de fortifications, piste et sentier, canalisation, rizière, champ, feux de végétation, pâturage, défrichement, répartition et densité de la population (statistiques par district), répartition et densité du bétail (statistiques par district), superficies cultivées par district.

Lavaka et géologie

Les facteurs géologiques sont la lithologie, représentée par la carte géologique au 1 : 500 000 (Besairie, 1972) (figure 9), et la tectonique récente, représentée par une carte des failles actives dont l'activité sismique n'est pas négligeable (figure 10).

La lithologie des formations rencontrées dans la région se répartit entre des roches cristallines du substratum et des roches sédimentaires de la couverture. Le substratum est constitué de roches métamorphiques et magmatiques fortement tectonisées du Panafricain (fin du Précambrien). Il s'agit principalement de roches acides, comprenant des faciès profonds représentés par des charnockites, des ankaratrites, des migmatites granitoïdes et granites migmatitiques, des migmatites et leptynites, des gneiss à grenats ou amphiboles (Besairie, 1960). Certaines de ces roches sont foliées, ce qui permet des distinctions entre par exemple les granitoïdes (peu foliés) et les migmatites (un peu plus foliées). Elles sont traversées par des gabbros intrusifs. Les sédiments associés au lac, datés du Plio-Pléistocène (Besairie, 1960) sont discordants. Ils comprennent essentiellement des sables alluvionnaires, des argiles blanchâtres, des grès, une série chaotique constituée d'argiles à grains et galets de quartz et d'argiles lacustres.

La comparaison entre la carte géologique et la répartition régionale des lavaka (figure 9B) montre une étroite corrélation entre les roches cristallines ou cristallophylliennes du socle précambrien et la présence de lavaka. Les roches plus ou moins acides (migmatites, migmatites granitoïdes, gneiss et leptynites) sont plus fréquemment affectées par des lavaka que les roches basiques (gabbros).

Cependant, il est difficile de faire des comparaisons détaillées à l'échelle locale en raison du mauvais recalage géométrique de la carte par rapport à l'image qui a servi de référence. De plus, la figure 9C (SE du lac Alaotra) montre qu'aux points a, b et c, les contours de la carte géologique recoupent des limites lithologiques, bien exprimées sur l'image par des changements de signature spectrale ou de texture. En outre, les formations lithostratigraphiques représentées sur la carte géologique sont composites du point de vue lithologique, et à chaque formation correspondent plusieurs unités de paysage, dont certaines seulement peuvent être corrélées avec des groupes de lavaka. C'est le cas, par exemple, des endroits soulignés par des doubles flèches en d, e et f sur la figure 9C. Ces diverses formations affleurent

rarement sur le terrain car elles sont recouvertes d'altérites et de végétation, mais elles s'expriment dans la répartition fine du modelé, qui ne se dégage bien que sur des images satellitaires.

L'imagerie a permis de distinguer deux ensembles lithologiques MG1 et MG2 qui sont classés comme étant un ensemble de migmatites granitoïdes sur la carte géologique conventionnelle. À ces migmatites correspondent des zones déprimées, disséquées par un réseau hydrographique très dense, alors que les roches plus dures, telles que les leptynites, forment des crêtes. Les migmatites (M) sont plus foliées que les leptynites (L). La foliation favorise l'infiltration des eaux de surface et le développement d'un manteau d'altérite plus épais par hydrolyse des silicates. Sur la figure 9C, il apparaît bien que les zones de forte concentration de lavaka coïncident avec des bandes d'affleurement parallèles de migmatites fortement érodées et de leptynites peu érodées. La capacité de pénétration de la foliation dans la masse rocheuse a donc un effet significatif sur la répartition des lavaka. Il existe une relation très générale entre la structure des roches (foliation) et leur vulnérabilité à l'altération. Ce phénomène d'altération progresse en profondeur dans la masse rocheuse en suivant les plans de foliation soulignés par des micas. Les roches grenues, comme les gabbros – ne présentant pas de foliation – sont difficilement altérables et de ce fait rarement attaquées par les lavaka. Cette absence de la foliation, plutôt que les différences de composition chimique avec les granitoïdes, explique mieux la rareté des lavaka dans les gabbros. De plus, l'abondance de pyroxènes diminue leur susceptibilité à l'altération à cause de la dispersion des micas.

Une tectonique active cassante affecte la région. Le lac Alaotra est situé dans un fossé plio-quaternaire, bordé par des failles normales (Laville *et al.,* 1998) dont l'activité est mise en évidence par la séismicité et par des décalages de la surface des sédiments plio-quaternaires de remplissage. Le bassin lacustre, de 750 m d'altitude, est entouré de montagnes escarpées et érodées, culminant entre 1 200 à 1 500 m, ayant un modelé arrondi convexe. Ces reliefs comportent des épaulements et des crêtes allongées étroites, des bas-fonds encaissés et des surfaces d'aplanissement perchées (Raunet, 1984).

L'interprétation des images TM permet de dresser une nouvelle carte de ces failles actives car elles constituent des escarpements (figure 10A). La comparaison de cette carte avec celle de la répartition des lavaka (figure 10B) ne montre a priori pas de corrélation nette entre les deux thèmes. Mais il est clair que l'activité tectonique se traduit dans la géomorphologie à l'échelle régionale.

6.3. Lavaka et géomorphologie

Il semble que l'érosion en lavaka diminue à l'échelle régionale en s'éloignant du fossé d'Alaotra. Les lavaka sont corrélés avec des reliefs élevés dont l'altitude est comprise entre 900 et 1 250 m, à l'exception des surfaces sous les massifs forestiers, indiquées en d sur la figure 11A. Cette érosion semble être entretenue par l'effondrement du bassin, ce qui a entraîné une baisse du niveau de base.

Le MNA issu de la digitalisation des cartes topographiques au 1 : 500 000 (figure 11A) ne permet pas d'apprécier de façon satisfaisante le modelé du terrain. La superposition de la carte des lavaka avec ce MNA (figure 11B) montre que certains reliefs allongés situés au sud du lac (a et b sur la figure 11A), caractérisés par des pentes fortes, sont riches en lavaka. Les pentes fortes situées en c dans la bordure ouest du lac sont également érodées. Elles sont à proximité de failles normales à rejet notable.

L'extrait d'image de la figure 11C montre très peu de lavaka dans la formation géologique résistante (a) formant une crête. Dans la formation (b) plus érodable, située en contrebas, à pentes fortes, les excavations sont plus abondantes surtout à proximité de la crête. Il est clair que les effets topographiques, même assez modestes, sont liés aux facteurs géologiques car la topographie est dérivée de la géologie.

6.4. Lavaka et pédologie

L'interaction entre le climat et les roches est à l'origine du manteau d'altérites de 10 à 50 m d'épaisseur, attaqué par l'érosion en lavaka (Raharijaona et Randrianarison, 1999). La carte pédologique au 1 : 1 000 000 (Bied-Charreton *et al.,* 1974) est très détaillée (figure 12A) en ce qui concerne les types de sol, et elle fournit de bonnes précisions sur l'apport en minéraux primaires des sols et sur leur degré d'évolution (« fortement rajeunis » et « rajeunis »). Trois principaux types de sol se trouvent dans la région : les sols hydromorphes, ferrallitiques et d'érosion. Les sols hydromorphes, à marécages tourbeux, occupent les bas fonds sur des sédiments récents. Les sols ferrallitiques sont de types divers (remaniés, rajeunis, évolués ou peu évolués, humifères). Ils se sont développés sur les roches métamorphiques du substratum. Les gneiss et migmatites foliées sont les plus vulnérables et elles forment 7 à 8 m d'altérites. Les migmatites granitoïdes et charnockites ont un sol moins épais (2-3 m). Les sols d'érosion, jeunes et

peu épais, correspondent aux lignes de crête. Nous avons regroupé le thème pédologie en 6 catégories (figure 12B) et avons classé les sols ferralitiques (sf) en trois unités : sf, humifères sous forêt ; sf, dégradés (à croûte latéritique plus ou moins argileuse et sableuse) ; sf, peu dégradés à croûte essentiellement argileuse.

Les sols ferrallitiques sont fréquemment affectés par des lavaka, sauf dans les zones sous forêt (par exemple en c sur les figures 12B et C). Toutefois, l'image TM apporte des précisions supplémentaires concernant les limites des formations pédologiques et forestières. Par exemple, l'étendue des forêts sur l'image déborde largement la limite indiquée sur la carte pédologique. Sur les bordures ouest du bassin, les lavaka sont plus nombreux dans les sols ferrallitiques dégradés à croûte latéritique (d) que dans ceux à croûte argileuse (e). Ailleurs, notamment au nord du bassin, ce type de sol (e) coïncide avec des zones de forte concentration en lavaka. La dégradation plus ou moins avancée du sol ferralitique ne suffit pas à elle seule à expliquer la formation des lavaka.

Il est important de noter que la répartition des autres catégories de sol est très irrégulière. Les sols d'apport sont dépourvus de lavaka. Les sols d'érosion de relief escarpé, connaissent au contraire une concentration plus ou moins forte en lavaka dans des endroits précis, par exemple en (a) sur les figures 12B et C. Cependant, la plupart des surfaces marquées en sol d'érosion n'ont que peu de lavaka (par exemple en (b) sur les figures 12B et C) et pourraient correspondre à des sommets de colline où le sol est maigre et le substratum rocheux en partie affleurant. Cela est dû à l'effet du manque de précision dans la délimitation des crêtes et des pentes qui sont mieux marquées sur l'image TM.

6.5. Lavaka et hydrologie

Il existe deux sortes de cours d'eau dans les régions rizicoles : les rivières qui coulent naturellement, et les cours canalisés pour l'irrigation. Il est à noter qu'un lavaka est le siège d'une ou de plusieurs sources, au moins temporaires, pouvant alimenter les rivières. La corrélation entre les lavaka et le réseau hydrographique doit être également vérifiée au niveau du bassin (échelle régionale) et des sous-bassins versants (échelle locale).

À l'échelle régionale, la superposition de la carte de lavaka avec celle des cours d'eau, toutes catégories confondues (figure 13A), ne révèle aucun lien. La comparaison avec celle des cours d'eau permanents met en évidence, d'une part des bandes quasi-parallèles particulièrement concentrées dans (a) et (b) (figure 13B) et, d'autre part, des rivières qui coupent des groupes de lavaka. Nous en déduisons qu'une bonne corrélation enregistrée entre les lavaka et les cours d'eau peut correspondre à des changements lithologiques. La combinaison de la carte des lavaka avec celle des bassins versants (figure 13C) montre une certaine indépendance des lavaka par rapport aux limites des sous-bassins versants.

À l'échelle locale, il est possible de distinguer des drains naturels particulièrement importants, soulignés par des sols nus, qui sont dus à des dépôts ou à de l'érosion. Ces drains sont identifiables sur l'image TM par des lignes blanches de largeur variable (figure 13D1). Ils sont particulièrement actifs car le creusement est accentué, et semblent être associés à une érosion intense. En fait, les flancs des vallées sont particulièrement pauvres en lavaka, comme si un excellent drainage empêchait leur formation. La figure 13D2 montre un contre-exemple qui confirme ce propos.

6.6. Lavaka et végétation

La superposition de la carte géologique avec la carte des lavaka et la limite forêt-non forêt – il s'agit de limites de forêts primaires et secondaires relevées de l'image TM (figure 14C) – confirme l'absence de lavaka sous la forêt. Leur présence ne dépend pas des autres facteurs, par exemple de la lithologie, mais elle est corrélable en partie avec l'altitude. On sait que le rôle du couvert forestier est primordial dans la lutte contre l'érosion.

6.7. Lavaka et actions anthropiques

Les effets des facteurs anthropiques ont été évalués en établissant des graphiques de corrélation entre la densité de population (ou celle des bovins) et celle des lavaka. Les données socio-économiques utilisées sont celles d'enquêtes par district (ou Fivondronana). Certes, les données datent de 1960 mais elles ont permis, en appliquant le taux de croissance de la population, d'estimer la situation démographique actuelle.

La densité des lavaka est proportionnelle à celle de la population (figure 15). Les activités humaines (divers types d'aménagement, activités économiques, etc.) peuvent déstabiliser l'équilibre du milieu et aggraver l'érosion. La pression humaine sur l'environnement est d'autant plus forte que la densité de population est croissante. L'augmentation de la densité des voies de communication (parcours de bovins, sentiers, pistes, etc.) et celle des rizières accentuent encore les processus d'érosion.