Télédétection, 2003, vol. 3, n° 1, p. 59-67
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

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

CARACTÉRISATION DES ZONES D'ÉROSION HYDRIQUE À PARTIR DES PARAMÈTRES GÉOMORPHOMÉTRIQUES : CAS D'UN BASSIN VERSANT DES HAUTES-TERRE DE MADAGASCAR

RAKOTONDRAOMPIANA SOLOFO [a,b], RANDRIANARISON TAHINA[a] et COLLET CLAUDE [c]

a Laboratoire de géophysique de l'environnement et de télédétection,
Institut et observatoire de géophysique d'Antananarivo (IOGA),
Université d'Antananarivo, B.P. 3843, 101, Antananarivo, Madagascar
Courriel : sorako@wanadoo.mg

b Département de géologie, École supérieure polytechnique d'Antananarivo,
Université d'Antanarivo, Madagscar

c Unité de géomatique, Institut de géographie, Université de Fribourg.
Pérolles, CH-1700, Fribourg, Suisse.
Courriel : claude.collet@unifr.ch

(soumis le 4 juin 2002 ; révisé le 29 juillet 2002 ; accepté le 13 novembre 2002)

Malgré les multiples actions menées pour lutter contre ce fléau, l'érosion des sols reste pour Madagascar l'un des phénomènes naturels les plus destructifs. Dans le contexte des pays de l'Hémisphère sud, les cartes topographiques représentent la source d'information à référence spatiale la plus accessible et la plus sûre. Aussi est-il intéressant de considérer l'exploitation de son contenu topographique dans un environnement SIRS pour l'aménagement des bassins versants.

La présente étude concerne un bassin versant des Hautes-terres de Madagascar. Les données sont numérisées et géoréférencées. Ces données sont issues des cartes topographiques et géologiques, de photographies aériennes et d'une image satellitaire. Elles ont été mises en forme pour constituer une base de données géographiques (BDG) comprenant les différentes couches thématiques suivantes : l'altitude, la pente, les courbures horizontales et verticales, l'hydrographie, la tectonique, le réseau routier et les parcelles actuellement soumises à l'érosion.

La méthodologie adoptée consiste simplement à extraire de chaque couche d'information les valeurs des caractéristiques du relief correspondant aux zones d'érosion. Ces données sont ensuite mises sous forme d'histogrammes. Le rôle des caractéristiques physiques du relief dans le déclenchement des érosions est mis en évidence à partir de ces représentations.

Mots-clefs : érosion ; signature géométrique ; MNA, SIG ; risque naturel.

CHARACTERISATION OF AREAS SUBMITTED TO WATER EROSION BASED ON GEOMORPHOMETRIC PARAMETERS : CASE OF WATERSHED IN THE HIGHLAND EROSION REGION OF MADAGASCAR

In spite of many projects to struggle against soil erosion, it is still one of the most destructive natural phenomena in Madagascar. As, in developing countries context, topographic maps are one of the unique source of spatial information available, it is interesting to evaluate how topographic information processed within a GIS can be used as effective tools for watershed management.

This study concerns a watershed in the high lands of Madagascar where soil erosion is particularly intensive. Available data are topographic maps, geological maps, old aerial photographs and a satellite image. They are digitised and georeferenced. Layers of the geographic database obtained from these data are: elevation, slope, horizontal and vertical curvature, hydrographic network, tectonic lineaments, roads and tracks network and soil eroded area.

Data processing consists to extract from each layer thematic information corresponding to eroded area. Such resulting information is then combined, compared and interpreted.

Keywords : erosion ; geometric signature ; DEM ; GIS ; natural hazard.

1. INTRODUCTION

L'érosion des sols est assurément le phénomène naturel le plus destructeur à Madagascar. On estime entre 200 et 400 tonnes / ha / an la quantité de sol enlevée par l'eau et rejetée à la mer (Bourgeat, 1970). Dans les Hautes-terres centrales de Madagascar, l'érosion se manifeste principalement sous la forme de « lavaka » (mot malgache signifiant trou ou ravin). Il s'agit de grandes excavations visibles à flanc de colline créées par la circulation de l'eau de pluie sur des

zones dénudées ou fragilisées (figure 1). Un lavaka peut présenter des dimensions pouvant atteindre quelques centaines de mètres. En moyenne, il se présente avec une largeur de quelques dizaines de mètres, une longueur d'une centaine de mètres et une profondeur de 10 à 30 m. Il existe également d'autres formes d'érosion hydrique comme l'érosion en nappe, l'érosion en griffe, le glissement de terrain et l'affaissement (Randriamanga *et al*., 2003). Les impacts de tels phénomènes géologiques sur l'environnement physique et humain sont considérables (Bourgeat, 1970 ; Saïd Mohamed et Rakotondraompiana, 2001). On peut citer, entre autres, l'ensablement des bas-fonds servant de zones de culture et plus particulièrement de riziculture. Ceci entraîne une baisse de la production agricole et, finalement, un déplacement de population paysanne. Les causes principales de la dégradation de l'environnement, du moins dans son aspect visuel, sont la déforestation (le bois est utilisé directement comme source directe d'énergie, ou pour obtenir du charbon) et la pratique des feux de brousse pour le pâturage (Saïd Mohamed et Rakotondraompiana, 2001). Mais d'autres paramètres peuvent aussi avoir une influence active.

Les données d'altitude constituent généralement les données les plus facilement disponibles. Ce type de données est généralement bien représentatif du terrain et est connu avec une bonne précision. Dans le contexte économique et social des pays en voie de développement, les données topographiques sont même le plus souvent les seules données à être toujours disponibles. Aussi est-il intéressant de développer l'utilisation du relief dans la gestion d'un bassin versant. Pour cela nous nous proposons d'extraire les caractéristiques géométriques et spatiales (Pike, 1988) des parcelles soumises à l'érosion et ensuite de déduire l'influence du relief dans le déclenchement des érosions. Le traitement de ces données est fait par l'intermédiaire d'un système d'information géographique (SIG).

Dans cet article, on présente les résultats des travaux menés dans le cadre d'un programme de recherche sur le suivi et la prédiction des érosions en lavaka à Madagascar. Après avoir présenté la zone d'étude, les différentes données utilisées et les traitements adoptés, on présente les résultats obtenus dans le cas du bassin versant de la Sahasarotra, Hautes-terres centrales de Madagascar. La dernière partie est consacrée à l'interprétation des résultats.

2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude se trouve approximativement à 120 km au nord d'Antananarivo, la capitale de Madagascar (figure 2). Elle est localisée dans la partie nord-ouest du bassin versant de la Sahasarotra, dans la région de Beloha, commune de Sadabe. Le climat est de type tropical d'altitude avec une alternance nette de deux saisons : une saison sèche tempérée de mai à octobre et une saison plus froide et humide de novembre à avril. La pluviométrie annuelle est de 1 200 à 1 400 mm. D'après les dires de la population locale, la pluie se fait plus rare d'année en année.

Le bassin versant a une superficie d'environ 19 327 ha. Quelques vestiges de forêt sont visibles dans la partie sud du bassin et dans le fond des vallées. La plus grande partie du bassin versant est dominée par des pseudo-steppes.

Le substratum géologique de la région est constitué par des roches du Précambrien essentiellement migmatitique et gneissique (Hottin, 1976), tel qu'illustré sur la figure 3. Ce socle précambrien est couvert d'un manteau d'altération (latérites) de 15 à 50 m d'épaisseur. Il n'affleure que très rarement et ponctuellement. Bourgeat (1970) a trouvé trois niveaux de surface d'aplanissement à la latitude d'Antananarivo : la surface supérieure avec des altitudes autour de 1 650 m ; la surface intermédiaire (1 350 m à 1 450 m) et les niveaux locaux d'aplanissement se présentant avec des altitudes variables mais toujours inférieures à 1 350 m.

Dans la partie nord de la zone d'étude, le relief est très accidenté avec des vallées encaissées. L'érosion y est active. La géomorphologie de la partie sud du bassin versant présente une juxtaposition de dômes anticlinaux allongés de direction NE-SO. Le relief est monotone, recoupé par des crêtes granitiques. L'érosion y est moins active que dans la partie nord.

La région de Beloha-Sadabe se trouve à la périphérie d'une zone à activité sismique relativement importante (Bertil, 1996 ; Rambolamanana, 1999). La tectonique cassante se présente sous la forme de fractures bien visibles sur la relief. Pour Laville *et al.* (1996), la région de l'Alaotra qui se trouve plus au nord de la zone d'étude est un rift en voie de formation.

Sur le plan socio-économique, l'activité principale de la population est la riziculture irriguée dans les bas-fonds. On y pratique également de la culture maraîchère. Autrefois, la forêt était exploitée pour le bois d'ébénisterie et de construction. Actuellement, le peu de forêt qui reste est coupé par la population locale pour la production de charbon de bois. Ceci constitue l'une des causes principales de la dégradation du milieu naturel.



FIGURE 1 Paysage de lavaka. *Lavaka landscape.*

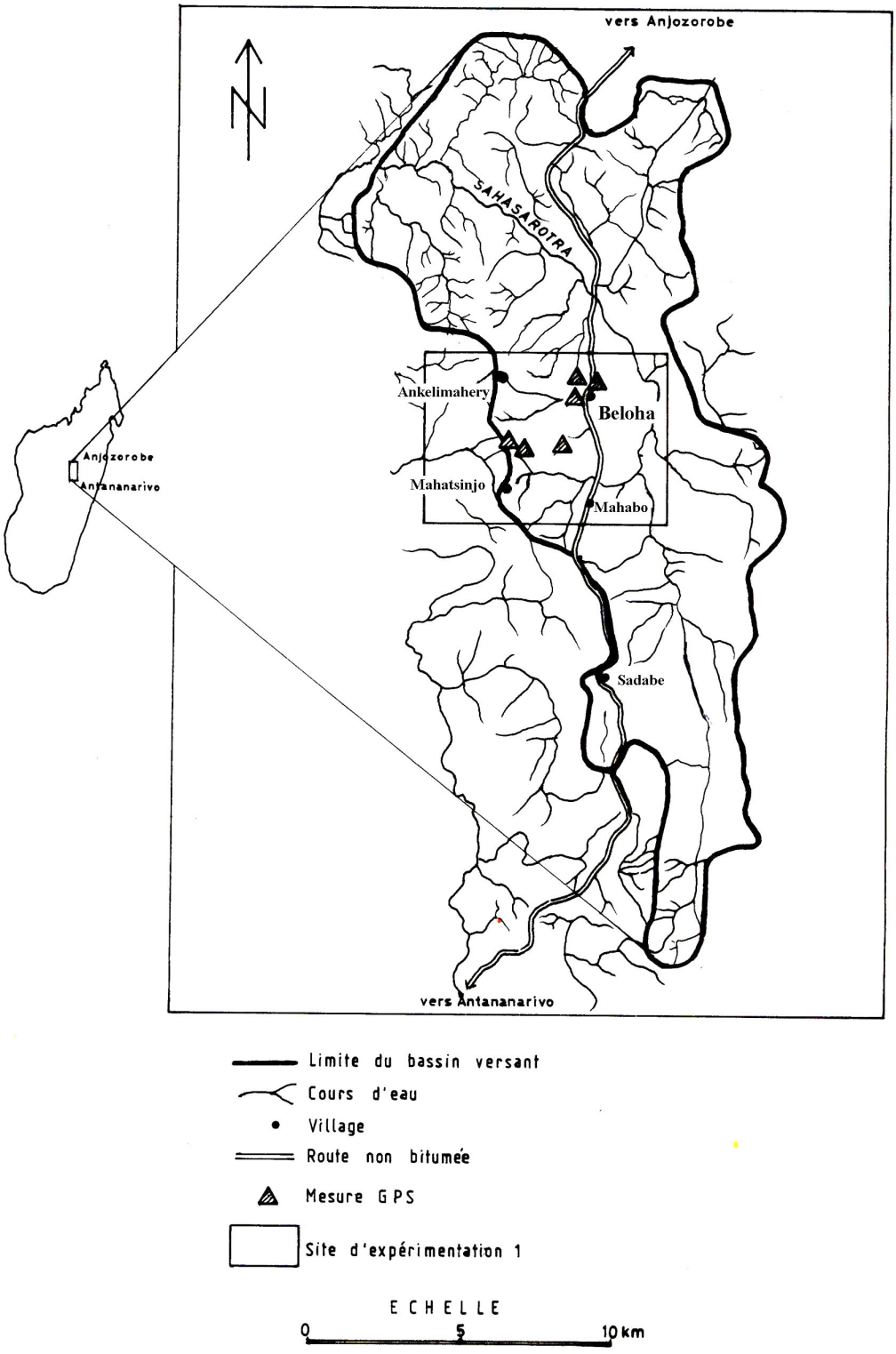


FIGURE 2 Carte de localisation de la zone d'étude : le bassin versant de la Sahasarotra. *Location of the study area : the Sahasarotra watershed.*

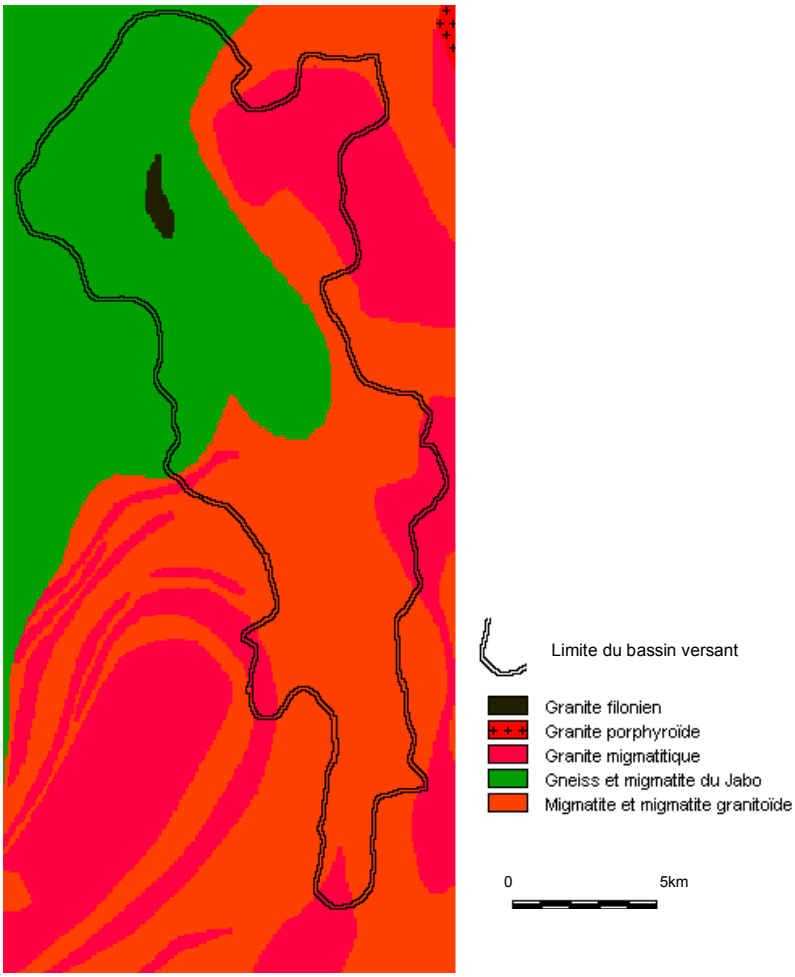


FIGURE 3 Carte géologique. *Geological map.*

3. DONNÉES

Toutes les données de cette étude ont été mises sous forme numérique. Elles constituent une base de données géographiques (BDG). La plupart de ces couches ont une structure image (au format Idrisi), tandis que certaines ont une structure objet (au format vecteur ArcView).

3.1. Altitude

Les données d'altitude sont issues de la numérisation des cartes topographiques au 1 : 100 000 (Foibe Taosarintanin'i Madagasikara, 1954, 1969). L'équidistance des courbes est de 25 m. Sur ces cartes topographiques, la plupart des lavaka ne sont pas visibles. Quelques structures de grandes tailles sont néanmoins bien représentées. Dans ce cas et afin de retrouver au mieux les conditions physiques avant érosion, nous avons effectué une interpolation manuelle des courbes de niveau pour donner à ces zones les aspects qu'elles auraient eu s'il n'y avait pas d'érosion. Ces données sont ensuite interpolées pour constituer une grille régulière et géoréférencée de 30 m de côté. Tous les traitements ultérieurs sont réalisés à partir de cette grille. Un modèle numérique d'altitude (MNA) disponible sous forme de grille numérique permet de faire des calculs de pente, de courbure, de classification des altitudes, etc. Le réseau hydrographique, le réseau routier et la répartition des zones d'habitation sont également obtenus par numérisation à partir des mêmes cartes topographiques.

3.2. Géologie

Des cartes géologiques au 1 : 100 000 fournissent les informations sur différentes formations géologiques et les structures tectoniques constituées essentiellement de failles (Rantoanina, 1966 ;

Service géologique, 1965, 1966). Ces dernières ont été numérisées pour mettre en relation leur thématique avec celle des autres couches. L'observation et l'interprétation du relief en vue perspective ont permis la mise à jour de ces données.

3.3. Photographies aériennes et image satellitaire

On dispose d'une couverture de photographies aériennes en noir et blanc à l'échelle du 1 : 40 000. Ces photographies, datées de 1949, sont de très bonne qualité. Elles ont été numérisées, puis géoréférées à partir des points remarquables de chaque photographie. On dispose également des canaux numériques TM3, TM4 et TM5 d'une image Landsat de 1994. Cette image est également géoréférencées dans le même système que les autres couches de la BDG.

Un contrôle sur le terrain, effectué au mois d'octobre 2 000 c'est-à-dire peu avant l'arrivée des premières pluies, a conduit à quelques ajustements mineurs de nos données.

4. MÉTHODOLOGIE

D'après les observations faites sur le terrain et sur la base des données précédemment décrites, le choix s'est porté sur la production d'indices considérés comme les plus pertinents dans le processus de déclenchement de l'érosion.

La géomorphologie conditionne entre autres le ruissellement des eaux de pluie. Les paramètres qui peuvent la caractériser sont l'altitude, la pente, les courbures verticales et perpendiculaires ainsi que l'orientation de la pente. La sensibilité des sols à l'érosion dépend également de sa nature plus ou moins friable. La nature des sols est déterminée par celle du substratum rocheux. On a utilisé la carte géologique au 1 : 100 000 de la région. Les activités tectoniques peuvent fragiliser le sol non seulement à cause des cassures qu'elles peuvent provoquer à l'échelle de la croûte terrestre mais aussi des oscillations des particules de sol. Le réseau de cours d'eau draine l'ensemble des eaux de pluie qui sont déversées dans le périmètre. Une partie de ces eaux circule en sous-surface avant de rejoindre le réseau de surface en contrebas. Ceci est un autre facteur fragilisant du sol.

Les zones d'érosion étant bien visibles sur les photographies aériennes, une couche « érosion » a été élaborée à partir de l'interprétation des 10 couplets stéréoscopiques de photographies aériennes. Cette carte est ensuite mise à jour à partir de l'image TM plus récente. Pour cela, on a utilisé les canaux TM3, TM4, TM5, l'indice de brillance et l'indice de végétation normalisé. Il en est de même de la carte d'occupation des sols.

Les paramètres considérés *a priori* comme pertinents sont : l'altitude, la pente, la direction de la ligne de plus grande pente, les courbures horizontale et verticale, la nature du substratum rocheux, la tectonique, la proximité au réseau hydrographique et la proximité des centres d'activité humaine. Dans notre BDG, nous disposons d'une couche « érosion » délimitant les zones actuellement recensées comme érodées, d'une couche « occupation des sols », d'une couche « voies de communication » où est représenté le réseau de routier essentiellement constitué de pistes et d'une couche « zone d'habitation » où l'on représente les villages.

La démarche consiste alors à extraire les valeurs de chacun de ces paramètres de terrain dans les zones d'érosion actuellement cartographiées. En effet, les parcelles correspondant aux zones érodées sont mises à 1 et le reste à 0. On multiplie ensuite les différentes couches par le masque ainsi obtenu. Ceci permet de récupérer les valeurs des paramètres correspondant aux seules parcelles d'érosion. Les valeurs extraites sont ensuite mises sous forme d'histogramme pour en apprécier la pertinence comme facteur favorable au déclenchement de l'érosion. Une fréquence d'apparition uniforme implique que les zones d'érosion se répartissent aléatoirement sur le spectre de valeurs de ce paramètre et qu'il n'a pas d'influence spécifique sur le processus d'érosion.

La production des paramètres topographiques et de voisinage fait appel aux capacités d'analyse spatiale du SIG en mode image (Collet, 1992). L'homogénéité des unités d'observation spatiales (les mailles) autorise ensuite la mise en relation de leurs propriétés dans les différentes couches constituées.

5. RÉSULTATS

Avec une superficie de 727 ha, les zones actuellement érodées représentent 4 % de la superficie totale du bassin versant. Sur la figure 4, on présente les valeurs de paramètres spécifiés des zones érodées sous forme d'histogrammes.

Pour l'évaluation des influences du réseau hydrographique, de la tectonique cassante, du réseau routier et des lieux d'habitation sur le déclenchement de l'érosion, de nouvelles couches ont été produites, caractérisant les distances par rapport à ces réseaux. C'est sur ces nouvelles couches d'information que l'opération de masquage a été appliquée. Les histogrammes de la figure 5 illustrent la distribution des fréquences de valeurs ainsi obtenues.

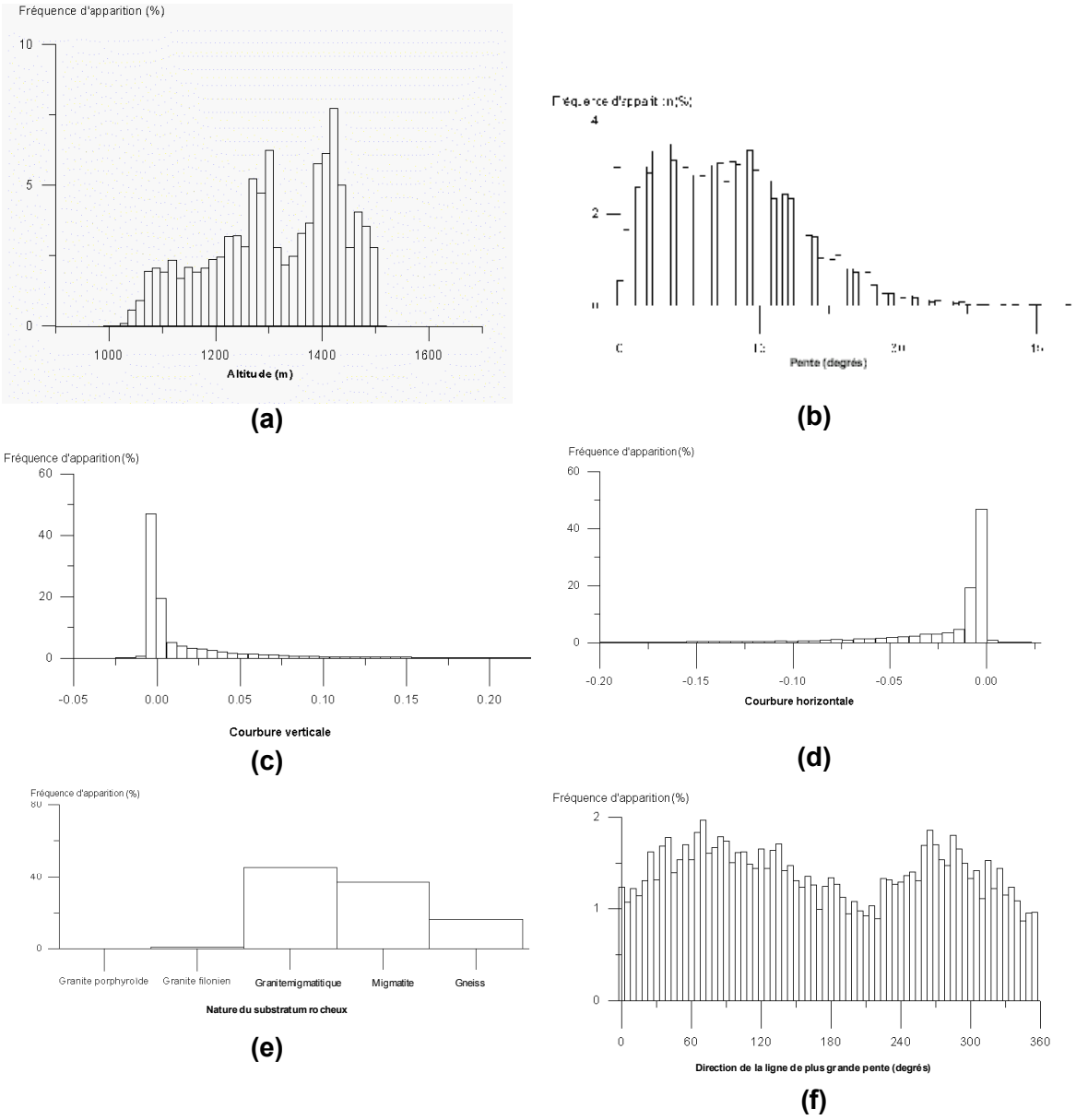


FIGURE 4 Histogrammes montrant la répartition des pixels « érosion » suivant les paramètres d'altitude (a), de pente (b), de courbure verticale (c), de courbure horizontale (d), de nature géologique du substratum rocheux (e), de direction de la ligne de plus grande pente (f). Nombre total de pixels = 11 632. *Histograms illustrating the distribution of « erosion » pixels according to the following parameters: elevation (a), slope (b), vertical curvature (c), horizontal curvature (d), geological nature of rocks (e), direction of the steepest slope line (f). The total number of pixels is 11 632.*

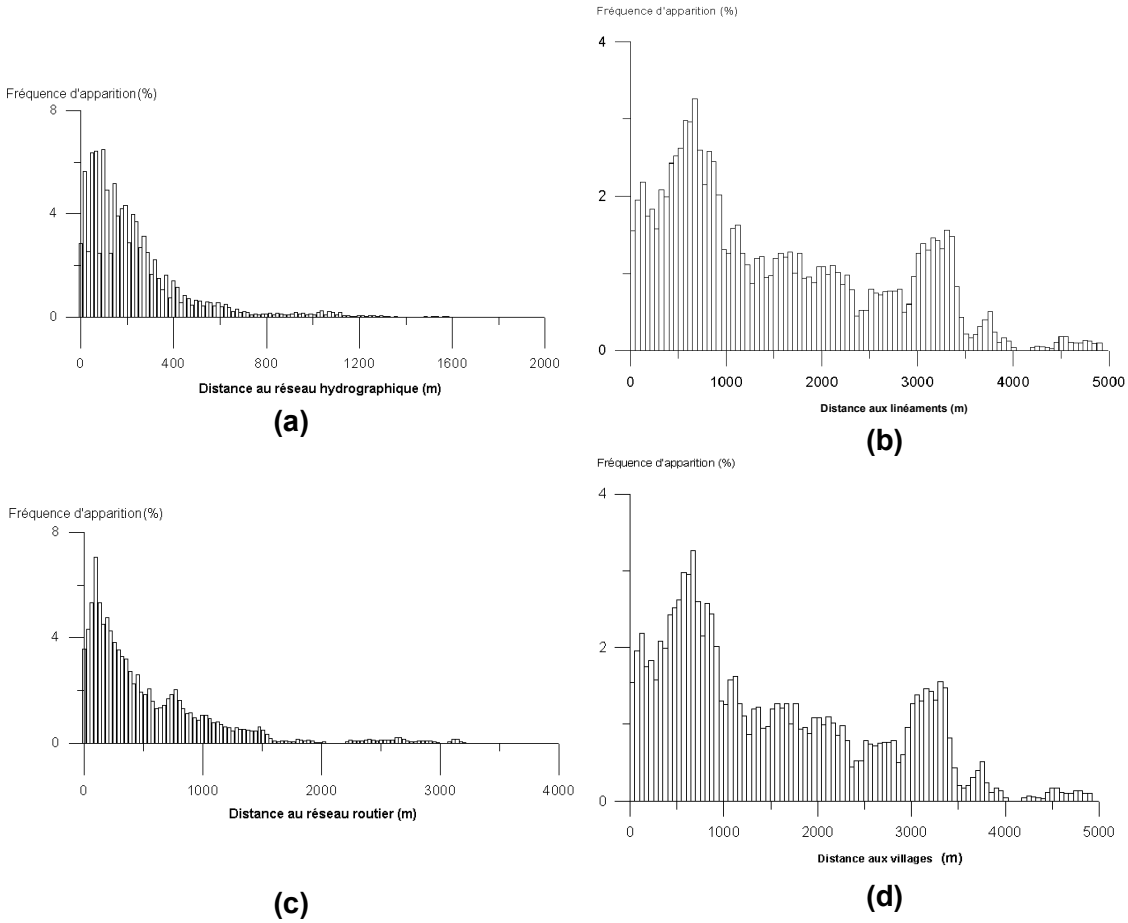


FIGURE 5 Histogrammes montrant la répartition des pixels *« érosion »* suivant les paramètres distance au réseau hydrographique (a), distance au réseau tectonique (b), distance au réseau routier (c), distance aux zones d'habitation (d). Nombre total de pixels = 11 632. *Histograms illustrating the distribution of « erosion » pixels according to the following parameters: distance to river network (a), distance to tectonic network (b), distance to road network (c), distance to habitat (d). The total number of pixels is 11 632.*

6. INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Les histogrammes mettent en évidence les facteurs considérés *a priori* comme pertinents dans le processus menant au déclenchement de l'érosion hydrique des sols : altitude, pente, courbures verticale et horizontale, direction du pendage, tectonique, nature géologique du substratum rocheux, distance par rapport au réseau hydrographique, la distance par rapport au réseau routier et la distance par rapport aux villages.

La répartition des altitudes (figure 4A) fait apparaître que la surface d'aplanissement supérieur (Bourgeat, 1970) est peu sensible à l'érosion. L'érosion survient surtout dans les zones appartenant aux deux autres surfaces d'aplanissement de niveau inférieur. C'est autour des valeurs de 1 300 et 1 400 m que l'on rencontre la plus forte concentration de figures d'érosion. Contrairement à ce que l'on peut s'attendre, l'érosion ne se manifeste pas forcément le long des pentes les plus fortes (figure 4B). Le plus grand nombre de mailles *« érosion »* sont visibles le long des pentes dont les valeurs sont comprises entre 5° et 20°. La même conclusion peut être tirée pour les courbures verticales et horizontales. Les figures d'érosion se manifestent préférentiellement le long des flancs où les valeurs de courbure horizontale comme verticale, sont proches de zéro (figures 4C et D). Ce sont les lignes d'inflexion de la surface.

Sur la figure 4E, montrant la répartition des zones érodées en fonction du type de substratum rocheux, on indique clairement que ce sont dans les sols formés sur de la migmatite et sur du gneiss que l'on retrouve le plus grand nombre de

figures d'érosion. En revanche, il y a très peu d'érosion dans les sols sur granite.

Sur la figure 4F, on montre la répartition des pixels « érosion » par rapport à la valeur de la direction de la pente du relief. Quelle que soit cette direction, on a une répartition peu différente des pixels. Du moins dans cette région, on peut donc conclure que la direction d'exposition de la pente au soleil ou aux pluies n'a que peu d'influence sur le déclenchement de l'érosion hydrique des sols.

L'influence du réseau hydrographique est plus conforme à l'attente. Plus on s'éloigne d'un cours d'eau, moins le sol est sensible à l'érosion (figure 5A). Ceci nous montre que le réseau hydrographique et la circulation des eaux souterraines ont une influence importante sur le processus de déclenchement de l'érosion des sols. Il en est de même de l'influence de la tectonique. Hormis un pic à 600 m, il semblerait que plus on s'éloigne des linéaments tectoniques, plus le sol est stable (figure 5B).

Sur la figure 5C, on montre la répartition des mailles *« érosion »* par rapport à la distance au réseau routier. On peut considérer que la zone d'influence de ce facteur anthropique va jusqu'à 2 000 m environ. La zone d'influence des zones d'habitation peut, quant à elle, être estimée entre 1 500 et 2 500 m.

7. CONCLUSION

Cette étude nous a permis de mettre en évidence les relations entre les faits observées (érosion) et les caractéristiques géomorphométriques des zones actuellement soumises à l'érosion hydrique. On a clairement montré quel sont les milieux géologiques et les tranches d'altitude où l'on rencontre le plus fréquemment les structures d'érosion. Les influences d'autres paramètres physiques sont également montrées. Enfin, la relation de proximité entre zones érodées et présence humaine, matérialisée ici par les villages et le réseau routier, met bien en évidence l'influence des activités humaines dans le processus de déclenchement de l'érosion.

Cette étude est une étape vers une utilisation pratique du relief numérisé comme outil d'étude et de gestion des bassins versants. Des perspectives d'amélioration seraient de mener une analyse multivariée des données pour finalement aboutir à une prédiction des zones sensibles à l'érosion.

Remerciements

Nous remercions l'Agence Universitaire Francophone (AUF) pour son soutien financier à travers le programme « *Actions en recherche partagée-Télédétection* ». Nous remercions également tous les collègues de l'Université d'Antananarivo qui ont participé aux travaux de terrain et qui nous ont aidés dans le traitement ou l'interprétation des données. Nous remercions également Christine King, du BRGM, et un lecteur anonyme pour leur aide à l'amélioration de la présentation de ce travail.

Références

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

Bourgeat, F. (1970) Contribution à l'étude des sols sur socle ancien de Madagascar.

Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, France.

Collet, C. (1992) Systèmes d'information géographique en mode image. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, p. 139-162.

Foibe Taosarintanin'i Madagasikara (1954) Carte topographique feuille Q-46. Foibe Taosarintanin'i Madagasikara (FTM), Antananarivo, Madagascar, 1 : 100 000.

Foibe Taosarintanin'i Madagasikara (1969) Carte topographique feuille P-46. Foibe Taosarintanin'i Madagasikara (FTM), Antananarivo, Madagascar, 1 : 100 000.

Hottin, G. (1976) Précambrien de Madagascar. Bulletin du Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM), vol. IV, p. 151-199.

Laville, E.; Piqué, A., Plaziat, J.C., Gioan, P., Rakotomalala, R., Ravololonirina, Y. et Tidahy, E. (1996) Le fossé du lac Alaotra, témoin de l'extension crustale E-W récente et actuelle à Madagascar. Actes des journées scientifiques sur le Rifting malgache, Université d'Antananarivo, p. 123-136.

Pike, R. (1988) The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. Mathematical Geology, vol. 5, n° 20, p. 491-511.

Rambolamanana, G. (1999) Topography of the Moho under the central region of Madagascar. International Center for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italie.

Randriamanga, S, Collet, C., Rakotondraompiana, S. et Randrianarison, L.T. (2003) Étude par télédétection des géorisques dans la région d'Anjozorobe, Madagascar. Télédétection, vol. 3 (accepté pour publication).

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

Saïd Mohamed, A. et Rakotondraompiana, S. (2001) Les impacts de l'érosion hydrique des sols sur l'environnement physique et humain. Cas de la région d'Alasora, Antananarivo. Rapport interne, Formation spécialisée en étude d'impact environnemental, École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université de l'Océan Indien, Antananarivo, Madagascar.

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

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