

Cartographie automatique de zones à aléas de mouvements de terrain sur l'île de Tahiti à partir de données digitales

par RICHARD GUILLANDE*, PASCAL GELUGNE**, JACQUES-MARIE BARDINTZEFF**, ROBERT BROUSSE**,
JEAN CHOROWICZ*, BENOÎT DEFFONTAINES*, et JEAN-FRANÇOIS PARROT***

Mots clés. – Tahiti, Polynésie française, Mouvements de Terrain, Modèle numérique de terrain, Aléa, Spot, SIG, Cartographie des risques.

Résumé. – Nous proposons une méthode utilisant des données numériques variées (image SPOT, carte géologique digitale, modèle numérique de terrain) pour une analyse multicritères et une cartographie automatique des risques de mouvements de terrain sur l'île de Tahiti (Polynésie française). Des outils de reconnaissance automatique de forme et d'analyse multicritères sont présentés et utilisés. Ils permettent de produire des cartes de densité de répartition du risque pour les éboulements et les glissements. Les développements possibles sont envisagés.

Automatic mapping of landslides hazards areas in Tahiti Island using digital data

Key words. – Tahiti, French Polynesia, Landslides, Digital terrain model, Risk, Spot, Gis, Hazards assessment.

Abstract. – This paper presents a new method based on different types of digital data (SPOT satellite scene, digital geological map and digital terrain model) for multicriterial analysis and digital mapping of landslides hazards in the Tahiti Island (French Polynesia, southern Pacific). The interest of three dimensional views combining the digital terrain model and the SPOT image for instability assessment, is outlined. After visual recognition, data are processed numerically to extract individual map for each risk factor. Pattern recognition and geographical information system (GIS) tools are used and described. Binarised risk factors maps are crossed to produce maps of risk accumulation for landslides. Further developments and improvements of the method are proposed.

I. – INTRODUCTION

La cartographie des zones à aléas de mouvements de terrain a déjà fait l'objet de nombreux travaux [Brabb, 1984; De Ploey et Cruz, 1979; Flageollet, 1984; Kuipers *et al.*, 1989; Newman *et al.*, 1978; Rouzeau *et al.*, 1991; Scanvic *et al.*, 1990; Thouret *et al.*, 1990]. L'existence de l'imagerie spatiale à haute résolution (SPOT) et la possibilité d'utiliser des données cartographiques digitales permettent de développer des méthodes entièrement numériques [Guillande *et al.*, 1991; Kuipers *et al.*, 1989; Scanvic *et al.*, 1990]. Ce travail concerne les aléas, c'est-à-dire les probabilités d'occurrence d'un événement donné. Ceux-ci peuvent éventuellement présenter des risques affectant les personnes ou leurs biens. Nous présentons une nouvelle méthode de cartographie basée sur la notion de zones à concentration de facteurs d'aléas de mouvements de terrain en prenant comme exemple un secteur de l'île de Tahiti.

A cause de ses reliefs abrupts et de sa forte pluviométrie, l'île de Tahiti est soumise à une forte érosion [Ferry, 1988]. Les mouvements de terrain de type éboulements et glissements sont fréquents mais rarement de grande amplitude. La cartographie des zones d'aléas est actuellement en cours et accompagne la réalisation de cartes géologiques du pour-

tour de l'île (Papeete, Brousse *et al.* [1985]; Punaauia-Paea, Gelugne et Brousse [1987]; Papara-Taravao, Brousse *et al.* [1990]). La caldeira centrale [Brousse, 1985; Léotot, 1988; Bardintzeff *et al.*, 1988; Bonin et Bardintzeff, 1989] et ses abords, très accidentés et sans voies de pénétration, sont difficiles à cartographier. La connaissance des zones à aléas en ces lieux est pourtant nécessaire en raison des travaux d'équipement hydro-électriques en cours de réalisation et programmés. De plus, la population a tendance à occuper les flancs des grandes vallées et des palnèzes de l'île dans des zones à risques d'instabilité et l'implantation urbaine et la construction d'infrastructures routières sont, elles-mêmes, créatrices de mouvements de terrain.

Pour toutes ces raisons, il est utile d'avoir un moyen rapide et fiable de détermination des zones les plus exposées. A partir de données cartographiques numériques (l'imagerie SPOT, un modèle numérique de terrain – MNT – et les cartes géologiques existantes digitalisées), nous développons une analyse multicritère par croisement de données. La zone-test est la vallée de la Punaruu dont nous possédons des données de terrain, les cartes géologiques et des formations de surface, la carte d'instabilités et de risques naturels [Gelugne et Brousse, 1987] ainsi que la carte pédologique [Jamet, 1983].

* Lab. Géologie-Géomorphologie Structurale et Télédétection, T 26-16, 1 E, Boîte 129, UPMC, 4 Pl. Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France.

** Lab. Pétrographie – Volcanologie, Bât. 504, 1^{er} étage, Univ. Paris-Sud, 91405 Orsay cedex, France.

*** Lab. Informatique Appliquée, ORSTOM, 70, route d'Aulnay, 93140 Bondy, France.

Manuscrit déposé le 9 juillet 1990; accepté le 21 décembre 1992.



II. — CADRE RÉGIONAL

Située dans l'archipel de la Société, Tahiti est considérée comme le produit du magmatisme du hot-spot de Méhétia, progressivement déplacé lors du défilement de la plaque Pacifique [Morgan, 1972; Brousse, 1985]. Tahiti-Nui, peu éloigné (130 km) de la zone active [Tallandier et Okal, 1984] est relativement jeune, ses parties émergées ayant de 1,34 à 0,45 Ma [Léotot, 1988]. Plus au sud-est, se trouvent le volcan Taravao [Léotot et Brousse, 1987] puis Tahiti-Taiarapu. Au cœur de Tahiti-Nui se trouve une caldeira de 8 km de diamètre, effondrée sur 1 500 m environ [Bardintzeff *et al.*, 1988; Léotot, 1988], en plusieurs phases, aux alentours de 1,1 Ma. Les flancs du volcan sont entaillés par de profondes vallées radiales dont les plus importantes sont au nord, la Papenoo et à l'ouest, la Punaruu (fig. 1).

La population de Tahiti, en accroissement constant par le flux des îliens des Tuamotu, Marquises et Australes, a longtemps limité son implantation à la plate-forme côtière. Depuis plus d'une décennie, de nombreux lotissements se sont construits en zone montagneuse, en raison de la saturation urbaine de la plaine côtière et des conditions météorologiques plus agréables. La zone-test choisie, de 8 × 5 km, située sur la côte ouest de l'île (fig. 1), centrée sur la vallée de la Punaruu, illustre cette urbanisation récente. La vallée très encaissée et relativement ancienne, dont le flanc nord a glissé en plusieurs endroits, est partiellement comblée par une coulée et un lahar récents [Gelugne, 1988].

Les conditions morpho-climatiques de l'île engendrent plusieurs types de mouvements de terrain, notamment des éboulements et des glissements. (i) Les éboulements correspondent à la chute de pans entiers des escarpements. La masse, unique au départ, est en général brisée et éparpillée. Toutefois, elle peut rester à peu près entière, formant un écoulement, lorsque l'ensemble détaché est très volumineux et que la hauteur de chute est faible. (ii) Les glissements, généralement en loupes, surviennent après les grandes pluies aux dépens des sols altérés (mamu) lorsque ces derniers ont été volontairement mis à nu par des aménagements routiers, l'urbanisation, les brûlis ou bien s'ils sont en altitude et sur de fortes pentes.

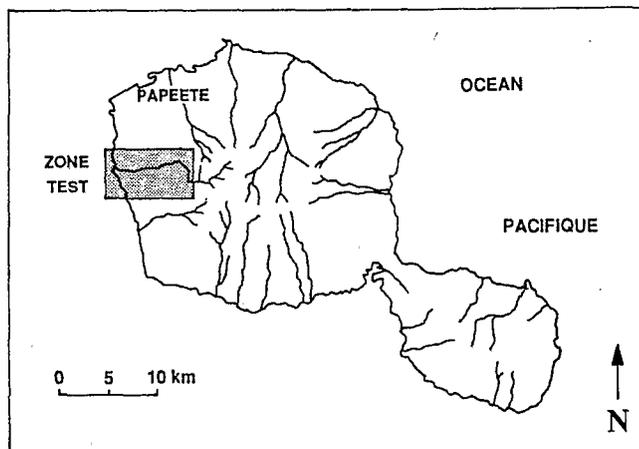


FIG. 1. — Localisation de la zone d'étude sur l'île de Tahiti-Nui.

FIG. 1. — Study area on the Tahiti-Nui Island.

III. — MÉTHODE D'ANALYSE

La méthode d'analyse des risques de mouvements de terrain a été développée sur la zone-test de la vallée de la Punaruu (fig. 2) où nous cherchons à cartographier les surfaces les plus susceptibles d'éboulements et de glissements [Gelugne *et al.*, 1988; 1990a et b, 1991, 1992; Guillaude *et al.*, 1990; Bardintzeff *et al.*, 1991, 1992]. Les données digitales utilisées sont : la carte des formations de surface (1/25 000); la carte géologique (1/25 000); l'image SPOT multispectrale du 21 juillet 1986 (KJ : 502-385) centre : 17°31'Sud, 149°35'Ouest, incidence L2°; le MNT issu de la numérisation des isohypses des cartes topographiques à 1/25 000. L'étude débute par une évaluation régionale de l'aléa de mouvements de terrain à partir de l'image SPOT et du modèle numérique de terrain (MNT). Elle se poursuit avec l'inventaire des facteurs de risque, chacun d'eux étant visualisé sous forme d'images digitales. Les zones d'aléas sont ensuite cartographiées par croisement des images.

A) Inventaire des mouvements de terrain

Cet inventaire est nécessaire pour déterminer l'existence de l'aléa et aussi pour chercher à proximité de ces mouvements les facteurs moyens et les valeurs critiques qui les concernent. Les contours des masses déplacées déjà connues et marquées sur la carte géologique ont été tracés sur les images SPOT en composition colorée. Des masses déplacées jusqu'ici non connues ont été mises en évidence (fig. 2) car la surface accidentée de ces matériaux est caractéristique et visible en dépit de la couverture végétale

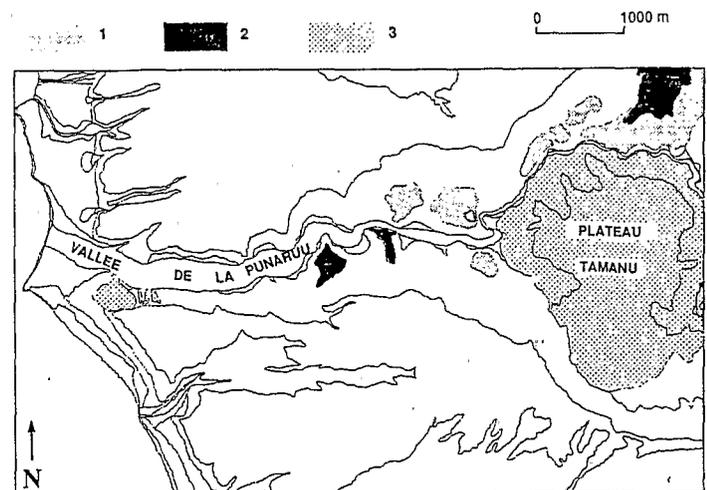


FIG. 2. — Extrait de la carte des formations de surface de Tahiti (feuille Punaauia-Paea) au 1/25 000, représentant les terrains déplacés sur la zone d'étude.

1 : mouvements de terrain anciens identifiés au cours de cette étude; 2 : mouvements de terrain figurant déjà sur la carte des formations de surface; 3 : résidus de lahars anciens consolidés.

FIG. 2. — Extract of the superficial units map of Tahiti (Punaauia-Paea sheet) 1/25,000 showing the displaced rocks in the study area.

1 : ancient ground movement identified during the study; 2 : ancient ground movement already appearing on the superficial units map; 3 : remnants of ancient lahars.

tropicale dense. Le MNT et l'image SPOT ont été superposés et représentés en blocs diagrammes, dont un exemple est présenté en figure 3. Il s'agit là, d'un outil puissant d'interprétation géomorphologique [Humbert *et al.*, 1989]. Des masses glissées sont identifiées également par leurs formes. Ainsi, des profils topographiques perpendiculaires aux versants ont été extraits automatiquement du MNT (fig. 4). Les profils 1 et 4 (fig. 4), qui traversent les deux principales masses déplacées au flanc nord de la Punaruu, montrent un épaulement sommital, un profil concave et un bourrelet convexe frontal en aval.

B) Inventaire et cartographie des facteurs d'éboulement et de glissement

Il s'agit d'examiner les facteurs des éboulements et des glissements, accessibles avec les données disponibles dans cette étude. Chacun des facteurs a une répartition spatiale qui peut être approchée par des traitements appropriés ou une analyse des données numériques initiales, aboutissant à des produits dérivés (tabl. I).

1) Formations lithologiques de surface

Les coulées du volcan de Tahiti, épaisse chacune de 3 à 5 m avec une base scoriacée (0,5 à 1 m), un corps massif prismé (2 à 3 m) et une surface scoriacée (0,5 à 1 m), sont dans le détail très hétérogènes. Les zones scoriacées peuvent jouer le rôle de semelle de glissement mais elles ne sont pas représentées sur la carte géologique au 1/25 000. En revanche, la carte au 1/25 000 des formations de surface [Gelugne et Brousse, 1987] montre les zones peu pentées où le manteau d'altération (mamu) est extrêmement important. Argileux et vacuolaire, il est susceptible de déplacements pendant de fortes pluies, plus particulièrement lorsqu'il a été mis à nu.

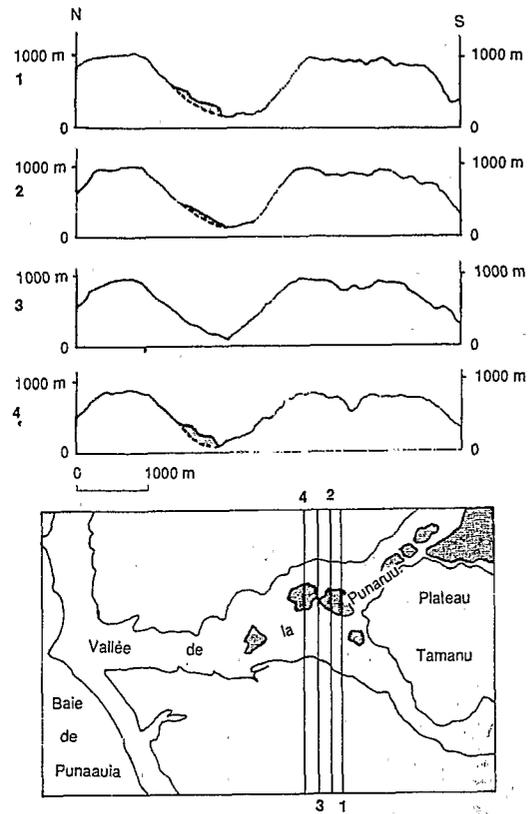


FIG. 4. - Profils topographiques à travers les glissements de terrain identifiés sur l'image SPOT et le bloc diagramme. Le profil 3 passe entre les deux masses effondrées et montre la pente d'équilibre de la vallée, qui se situe vers 40°.

FIG. 4. - Topographic profiles across the landslides identified on the SPOT image and the block-diagram. Profil number 3 passes between two collapsed structures and shows the equilibrium slope angle around 40°.

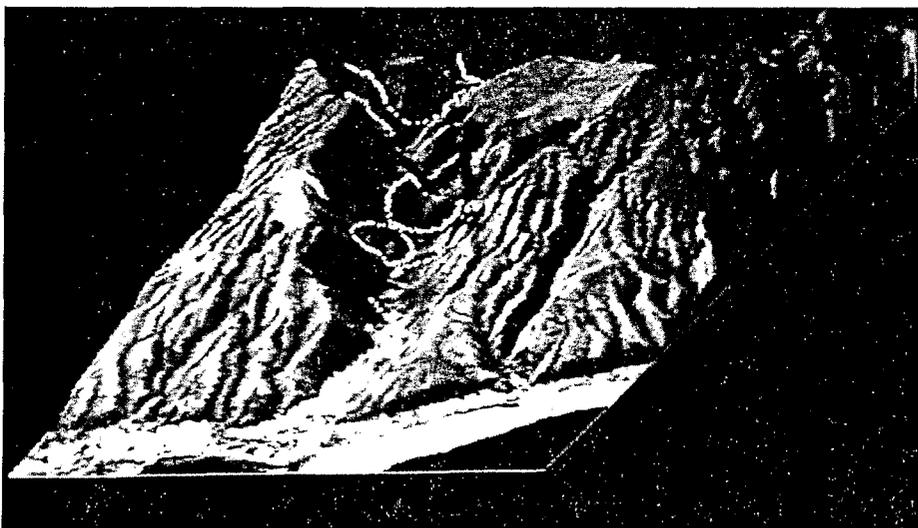


FIG. 3. - Bloc diagramme de la zone d'étude observée en direction du nord-est, obtenu par superposition du canal 1 SPOT et du modèle numérique de terrain. Les liserés blancs entourent les principaux mouvements de terrain identifiés.

FIG. 3. - Block-diagram of the study area observed towards the north-east, obtained by superposition of the band 1 SPOT on the digital terrain model. The white lines are surrounding the main landslides known in the field.

TABL. I. – Paramètres et facteurs extraits des données numériques sur la zone de travail.

TABL. I. – Parameters and factors extracted from numerical data on the working area.

Données numériques	Produits dérivés
Carte digitale des formations de surface	Formations lithologiques de surface
Modèle numérique de terrain	Angle de pente
	Orientation de la pente
	Morphologie
	Proximité aux drains du réseau hydrographique
Carte géologique digitale	Mouvements de terrain
Image SPOT	Proximité aux discontinuités images
	Végétation (indice de végétation)

2) Angle de pente

L'histogramme de répartition des angles de pente par rapport à l'horizontale (fig. 5) présente trois maxima : l'un voisin de 2° (plaines alluviales côtières), le second vers 17° (il s'agit de la surface originelle du volcan bouclier), le dernier aux environs de 42° (flancs des rivières qui dissèquent la surface originelle du volcan). Les valeurs de pente supérieures à 40° sont considérées comme un facteur majeur d'instabilité car c'est sur ces pentes que se trouvent les éboulements. Les glissements correspondent plus particulièrement aux pentes comprises entre 20 et 40°.

3) Orientation de la pente

Les parois orientées au sud-est sont exposées aux pluies des alizés, qui constituent les vents dominants des îles polynésiennes. Ces versants subissent aussi les plus grandes amplitudes d'alternance d'assèchement-hydratation.

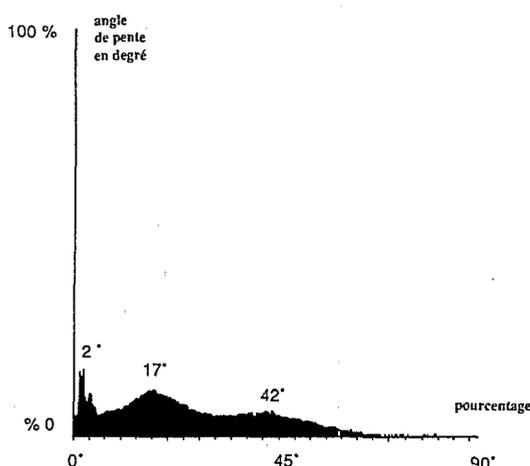


FIG. 5. – Histogramme de répartition des angles de pente, calculés à partir du modèle numérique de terrain de la vallée de la Punaruu.

FIG. 5. – Slope angle histogram calculated from the digital terrain model of the Punaruu valley.

4) Morphologie

Un versant à convexité tournée vers le ciel est très loin de son profil d'équilibre (celui-ci se caractérise par une concavité vers le ciel). De ce fait, on peut considérer que la masse bombée est en équilibre instable. Il en est de même pour les épaulements et les crêtes.

5) Proximité aux drains du réseau hydrographique

Une cause majeure d'instabilité est la sape que provoquent les rivières en pied de pente, c'est-à-dire à la base des escarpements ou dans la partie inférieure des cascades. Les parties en surplomb se détachent aisément et glissent jusque dans la rivière et peuvent créer un barrage naturel en arrière duquel se constitue une retenue temporaire créant un danger de lahar. La vallée de la Punaruu, caractérisée par l'existence de gorges étroites entre des rives fortement pentées, présente des exemples de mouvements de terrain fossiles. La carte du réseau hydrographique est extraite du MNT [Chorowicz *et al.*, 1992]. Le produit dérivé utilisé dans la présente étude est une carte de proximité des surfaces aux drains du réseau. Il a été considéré que les surfaces situées à moins de 40 m d'un drain peuvent subir une érosion de sape.

6) Mouvements de terrain

Les mouvements de terrain connus sont cartographiés à partir de la carte géologique.

7) Proximité aux discontinuités images

Les discontinuités repérées sur les images LANDSAT [Gelugne *et al.*, 1988] et SPOT correspondent pour la plupart à des fractures ou des dykes. Ces discontinuités du sous-sol seront considérées ici comme des lieux de moindre résistance du bâti géologique, favorisant le détachement des glissements et des éboulements. En terrain volcanique, la fracturation qui accompagne une faille est répartie sur plusieurs dizaines de mètres de large. Nous considérons donc comme zone fragilisée les zones situées à moins de 50 m des lignes de discontinuité.

8) Végétation

La lande à anuhe et dans une moindre mesure les aires couvertes par la forêt tropicale sont relativement stables. Par contre, les espaces dénudés, soumis à un fort ravinement, sont les lieux favoris de décollements et de loupes de glissement. Notons enfin le rôle spécifique du miconia : cette plante envahissante dont les très grandes feuilles s'alourdissent sous le poids de l'eau, peut, en tombant, déstabiliser les pans de falaise. L'indice de végétation $VEG = (XS3 - XS2)/(XS3 + XS2)$ calculé pour chaque pixel à partir des bandes spectrales XS2 et XS3 de la scène SPOT, donne une bonne idée du couvert végétal.

C) Cartographie des zones d'instabilités

Le risque d'instabilité est important lorsque plusieurs facteurs sont associés et ont une action conjuguée. Pour

chacun des facteurs nous avons créé une image binaire matérialisant la présence ou l'absence de ce facteur en chaque pixel (tabl. II). Un choix doit être fait pour considérer que le facteur existe ou non. Il n'existe pas encore de critères précis permettant de faire ce choix, aussi avons nous procédé de manière relativement empirique, comme l'indique le tableau II.

TABLE II. – Facteurs intrinsèques et conjugués d'éboulements ou de glissements et modalités de détermination.

TABLE II. – *Intrinsic and mixed rockfall and landslide hazard factors and determination mode.*

Facteur	N°	Modalité du choix
Formation lithologique	1	Mamu présent
Angle de la pente	2	angle supérieur à 40°
Orientation de la pente	3	orientation vers le sud-est (N135°E) ± 90°
Morphologie	4	présence d'un versant convexe, d'un épaulement ou d'une ligne de crête (jusqu'à 60 m)
Drains du réseau hydrographique	5	jusqu'à 40 m d'un drain
Discontinuités images	6	jusqu'à 50 m d'une discontinuité image
Végétation	7	sol nu (indice de végétation)

Nous avons utilisé 7 facteurs de mouvements de terrain dans cette étude. Nous cherchons à classer les surfaces en fonction du nombre de facteurs présents. En superposant toutes les images binaires, la valeur d'un pixel est obtenue par addition du nombre de facteurs présents en ce pixel. Pour 7 facteurs, il y a donc 8 teintes de gris : le noir, absence de facteur; teinte n° 2 : un facteur, teinte n° 3;...; teinte n° 8 : pixel où sont présents les sept facteurs. On obtient ainsi une carte de concentration de facteurs d'aléa de mouvements de terrain.

La probabilité relative d'occurrence de mouvement de terrain est fixée en fonction du nombre de facteurs présents simultanément en chaque pixel. La classe codée 1 correspond aux zones de présence d'un seul facteur quel qu'il soit. La classe 2 regroupe toutes les possibilités de croisement simultané de facteurs pris deux à deux et ainsi de suite jusqu'à la classe n. Chacune des classes de 0 à n est rendue par une teinte d'autant plus claire qu'elle matérialise un plus grand nombre de facteurs croisés (fig. 6).

IV. – DISCUSSION : POTENTIALITÉS DE RISQUES DANS LA ZONE DE LA PUNARUU

La plupart des zones d'aléas sont relativement corrélées avec les zones qui avaient été répertoriées dans la carte de Gelugne et Brousse [1987]. Aux levés de terrain de la première carte, s'ajoutent semble-t-il dans la seconde plus de détail et de finesse.

Les aléas se situent aux environs immédiats des vallées importantes (vallée de la Punaruu et vallée voisine de la Maruapo) alors que les interfluves sont stables (fig. 6). Les

aléas sont alignés sur des directions N0 70 plus ou moins 10°, qui peuvent être considérées comme des fracturations radiales du volcan tahitien. Ces failles sont le résultat du gonflement de la partie sommitale du volcan, à la verticale d'un réservoir magmatique peu profond. A ces failles radiales, qui guident le tracé des talwegs, s'ajoutent des directions perpendiculaires au volcan et généralement de faible longueur. La direction N 170 (plus ou moins 10°) correspond aux structures ayant accompagné l'accrétion de la plaque Pacifique sur laquelle est posé le volcan de Tahiti. Ces directions majeures de la plaque océanique, facilitant la sortie des laves, constituent un trait morphologique persistant de l'ensemble volcanique.

La différence essentielle entre la carte de terrain et la cartographie automatique est la sous-estimation sur la carte de terrain des risques dans les vallées mineures ou les cirques de départ des petits cours d'eau. Les cours d'eau immatures sont fortement érosifs et l'érosion régressive a pour effet de déstabiliser les têtes amont [Gelugne *et al.*, 1991, 1992; Bardintzeff *et al.*, 1991, 1992].

L'importance de l'orientation des versants est fortement soulignée par la cartographie automatique. Le versant nord de la Punaruu a une forte densité de pixels à risques alors que sa rive sud n'a que des pixels à densité moyenne à nulle (fig. 6). La différence de comportement est à mettre au compte de l'éclairement solaire reçu. Le versant nord des vallées –exposé au sud– reste à l'ombre et est constamment humide. Il subit une altération plus forte et plus constante que le versant sud à regard nord, plus sec. L'orientation au nord ou au sud des versants devra donc dans l'avenir être considérée comme un facteur d'aléa au même titre que celui que nous avons retenu de l'orientation des versants par rapport aux alizés. Le processus de traitement fait ressortir la possibilité de modifier les paramètres des facteurs de risque après un premier stade d'étude, pour les réintégrer dans le croisement des données.

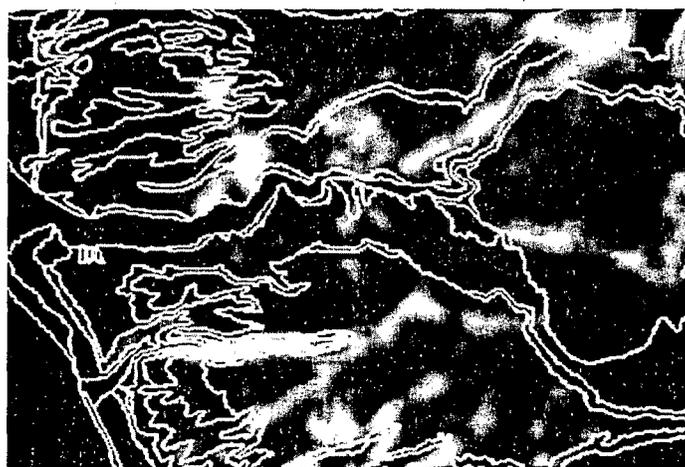


FIG. 6. – Carte résultant du croisement des facteurs de mouvements de terrain (explications dans le texte).

FIG. 6. – *Map resulting from the combination of the rockfall phenomenon (see text).*

Les facteurs actifs semblent présenter une source de risque, alors que des traits morphologiques anciens (falaises mortes côtières), de mêmes dimensions topographiques, sont stables sauf cas exceptionnel. Dans l'avenir, il faudra chiffrer l'agressivité des rivières en fonction de leur longueur par exemple et en fonction de leur âge, les plus récentes ayant un profil topographique éloigné du profil d'équilibre.

Le secteur de la Punaruu, qui a été choisi comme test est une région dans laquelle les éboulements et glissements relatés par l'homme sont présents mais relativement peu nombreux. Beaucoup plus grave est la situation à l'intérieur de la caldeira où les vallées sont nombreuses, les interfluves étroits et la pluviosité importante. Le futur programme d'évaluation des aléas prendra cette région pour objectif, d'autant que le plan, en cours, d'équipement électrique de Tahiti prévoit, dans les dix prochaines années, la création de nombreux petits barrages hydro-électriques aux têtes des principales rivières drainant l'intérieur de la caldeira.

V. – CONCLUSION

L'originalité de la méthode proposée est l'analyse de facteurs multiples à travers des critères représentés par des images binaires obtenues à partir de données digitales variées. La carte obtenue fait apparaître en chaque endroit la superposition des différents facteurs.

Cette méthode simple, basée sur le croisement de données binaires, semble donner un résultat assez comparable à ce qui peut-être fait manuellement. L'avantage de la cartographie automatique est de donner, systématiquement, et à partir d'un principe simple – le nombre de facteurs d'aléa présents en chaque endroit – une évaluation chiffrée et reproductible.

Remerciements. – Ce travail est effectué dans le cadre d'un projet financé par la CORDET et il a bénéficié d'un soutien de SPOT-IMAGE.

Références

- BARDINTZEFF J.M., BELLON H., BONIN B., BROUSSE R. & MCBIRNEY A.R. (1988). – Plutonic rocks from Tahiti-Nui caldeira (Society Archipelago, French Polynesia) : a petrological, geochemical and mineralogical study – *J. Volc. Geoth. Res.*, **35**, 31-53.
- BARDINTZEFF J.M., GELUGNE P. & GUILLANDE R. (1992). – Risques naturels d'instabilités du volcan tahitien. – Réunion «risques volcaniques», Soc. Géol. France, 25/3/1992, Paris. – Bull. Section Volcanologie.
- BARDINTZEFF J.M., GELUGNE P. GUILLANDE R. & BROUSSE R. (1991). – Natural hazard identification in Tahiti using a digital terrain model and SPOT satellite imagery. – XIII INQUA Congress, Beijing, China, August 2-9, 1991, 16.
- BONIN B. & BARDINTZEFF J.M. (1989). – Plutonic rocks from Tahiti-Nui caldeira (French Polynesia) – II – Evolution of thermodynamical parameters during magma differentiation and emplacement – Applications to others alkaline magmatic provinces – *Bull. Soc. géol. Fr.*, **8**, V, 6, 1091-1099.
- BRABB E. (1984). – Innovative approaches to landslides hazards and risk mapping. – *Proc. 4th International Symposium on Landslides*, Toronto, 1, 304-307.
- BROUSSE R. (1985). – L'âge des îles ; géologie des îles hautes – In : Encyclopédie de la Polynésie, tome 1 : les îles océaniques. – Christian Gleizal, Multipress Tahiti, 2-3 38-56.
- BROUSSE G., BOUTAULT G., EISENSTEIN A. & GELUGNE P. (1985). – Carte géologique (1/25 000), carte des formations de surface (1/25 000), carte des instabilités et risques naturels de Tahiti (1/50 000). – Feuille Papeete, Ministère de l'Équipement, de l'Aménagement, de l'Énergie, des Mines et des Ports, Papeete.
- BROUSSE R., LAVEST P. & LÉOTOT C. (1990). – Carte géologique (1/25 000), carte des formations de surface (1/25 000), carte des instabilités et risques naturels de Tahiti (1/50 000), feuille Papara – Teva I Uta – Taravao.
- CHOROWICZ J., ICHOKU C., RIAZANOFF S., KIM Y.J. & CERVELLE B. (1992). – A combined algorithm for automated drainage network extraction. – *Water Resources Res.*, **28**, 5, 1293-1302.
- DE PLOEY J. & CRUZ O. (1979). – Landslides in the Serra do Mar Brazil. – *Catena*, **6**, 111-122.
- FERRY L. (1988). – Contribution à l'étude des régimes hydrologiques de l'île de Tahiti. – Thèse de Doctorat, Univ. Paris-Sud, Orsay, 330 p.
- FILLIAT G. (1981). – Les mouvements de terrain. In : La pratique des sols et fondations. – Edition du Moniteur, Paris.
- FLAGEOLLET J.C. (1984). – Les mouvements de terrain. – Colloque de Caen. – *Doc. BRGM*, **83**, 670 p.
- GELUGNE P. (1988). – Evolution spatiotemporelle du magmatisme alcalin de Tahiti-Nui (volcanisme aérien émergé) – Altération sub-actuelle ; conséquences sur l'environnement. – Thèse de doctorat, Univ. Paris-Sud, Orsay, 415 p. + annexes.
- GELUGNE P., BARDINTZEFF J.M., BROUSSE R., GUILLOU H. & LEROUGE G. (1988). – Le volcan de Tahiti-Nui (Polynésie française) dans son contexte géodynamique intraplaque : études structurales et données LANDSAT. – 12^e RST, Lille, 27-29 avril 1988, Soc. Géol. France éditeur, Paris, 63.
- GELUGNE P., BARDINTZEFF J.M. & GUILLANDE R. (1992). – Tahiti : exemple de dégradations et de mouvements de sol en milieu intertropical. – 14^e RST, Toulouse, 13-15 avril 1992, Soc. Géol. France éditeur, Paris, 67.
- GELUGNE P., BARDINTZEFF J.M., GUILLANDE R. & BROUSSE R. (1990a). – Natural risk in the Punaruu valley in Tahiti : examination of the numerical approach through multicriteria analysis. – Abstract, *Journées Internationales Pix-iles*, Nouméa – Tahiti, 19-24 novembre 1990.
- GELUGNE P., BARDINTZEFF J.M., GUILLANDE R., BROUSSE R., CHOROWICZ J. & PARROT J.F. (1993). – Imagerie satellite SPOT et modèle numérique de terrain. Application aux problèmes d'environnement et à la reconnaissance des risques d'instabilité de terrain sur l'île de Tahiti. – *Journées Internationales Pix-iles*, Nouméa – Tahiti, 19-24 novembre 1990, 6p.
- GELUGNE P. & BROUSSE R. (1987). – Carte géologique (1/25 000), carte des formations de surface (1/25 000), carte des instabilités et risques naturels (1/50 000) de Tahiti. Feuille Punaauia-Paea, Mi-

- nistère de l'Équipement, de l'Aménagement, de l'Énergie, des Mines et des Ports, Papeete.
- GELUGNE P., GUILLANDE R. & BARDINTZEFF J.M. (1990b). – Tahiti et la Polynésie : approche numérique des instabilités naturelles du sol (MNT, image SPOT). – *13^e RST*, Grenoble, 2-4 avril 1990, S.G.F. éditeur, Paris, 52.
- GUILLANDE R., GELUGNE P., BARDINTZEFF J.M., BROUSSE R. & CHOROWICZ J. (1990). – Digital mapping of soil instabilities using multicriteria analysis in the Tahiti island. – *Journées Internationales Pix-iles*, Nouméa – Tahiti, 19-24 novembre 1990.
- GUILLANDE R., CARO P. & CHOROWICZ J. (1991). – A first approach to digital mapping of landslides hazards in the Andes of Columbia using remote sensing techniques (GARS-Project). – *Episodes*, **14**, 364-367.
- HUMBERT M., MASURE P. & SCANVIC J.Y. (1989). – Mouvements de terrain, aménagement et imagerie SPOT. – *Bull. Soc. Fr. Photogram. Télédét.*, **114**, 34-36.
- JAMET R. (1983). – Tahiti (Polynésie française) – Carte pédologique de Tahiti (échelle 1/40 000) : 5 feuilles, NO-NE-SO-SE et presqu'île de Tairapu. Notice : les sols et leurs aptitudes culturales et forestières – ORSTOM, *Collection notice explicative*, **107**, 124 p.
- KUIPERS B.R., ZANDEN D.J. & ASCH T. van. (1989). – An information system for large scale quantitative hazard analysis of slope stability. – *Proc. 2nd Congress International Conference on Geomorphology*, Frankfurt.
- LÉOTOT C. (1988) – Cycles éruptifs géochimiques et géochronologiques du volcan de Taravao (archipel de la Société), modèle de hot spot tahitien et de l'alignement de la Société (Polynésie française) – Thèse de Doctorat, Univ. Paris-Sud, Orsay, 366 p.
- LÉOTOT C. & BROUSSE R. (1987). – Entre les deux îles de Tahiti, la région de Taravao est un volcan autonome à deux caldeiras ouvertes au sud-ouest (archipel de la Société). – *C.R. Acad. Sci.*, Paris, **304**, II, 2, 99-102.
- MORGAN W.J. (1972). – Deep mantle convection plumes and plate motions. – *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **56**, 203-213.
- NEWMAN E.B., PARADIS A.R. & BRABB E.E. (1978). – Feasibility and cost of using a computer to prepare landslide susceptibility maps of the San Francisco Bay region, California. – *US Geol. Surv. Prof. Paper*, **1443**, 24 p.
- ROUZEAU O., SCANVIC J.Y., LEROI E. et coll. (1991). – Réalisation au moyen des images SPOT et Landsat d'une carte de sensibilité des sols aux mouvements de terrain de la vallée du Chicamocha (Colombie). – Rapport BRGM, Orléans, R32968, 55 p.
- SCANVIC J.Y., ROUZEAU O. & COLLEAU A. (1990). – SPOT, outil d'aménagement, exemple de réalisation par télédétection et analyse multicritères d'une cartographie des zones sensibles aux mouvements de terrain. Le site de La Paz en Bolivie. – Rapport BRGM, Orléans, R31532.
- TALLANDIER J. & OKAL E.A. (1984). – The volcan seismic swarms of 1981-1983 in the Tahiti-Mehetia area, French Polynesia. – *J. Geophys. Res.*, **89**, B13, 11216-11234.
- THOURET J.C., SALINAS R. & MURCIA A. (1990). – Eruption and mass-wasting induced processes during the late Holocene destructive phase of Nevado del Ruiz volcano, Colombia. – *J. Volc. Geoth. Res.*, **41**, 203-224.

