

Apports et limites de l'imagerie Spot et du modèle numérique de terrain pour l'étude du volcanisme intra-océanique : exemple des îles de Raiatea et de Tahaa (archipel de la Société, Polynésie française)

Olivier DAUTEUIL (1)
Sylvain BLAIS (1)
Delphine MIAU (1)
Gérard GUILLE (2)
René C. MAURY (3)

Contribution and limitations of SPOT imagery and digital elevation models in studying oceanic volcanism: examples of Raiatea and Tahaa (Society Islands, French Polynesia)

Géologie de la France, n° 3, 1998, pp. 37-50, 7 fig., 1 tabl.

Mots-clés : Spot, Modèle numérique de terrain, Volcanisme intraplaque, Polynésie française.

Key words: SPOT, Digital elevation model, Within-plate volcanism, French Polynesia.

Résumé

L'étude combinée d'une scène Spot et d'un modèle numérique de terrain a été réalisée sur les îles de Raiatea et Tahaa (archipel de la Société, Polynésie française) afin de déterminer la géométrie et la structure de l'édifice volcanique et de cartographier les différentes coulées basaltiques et trachytiques.

La difficulté majeure de l'interprétation d'une image Spot en domaine tropical océanique réside dans l'existence d'une couverture végétale importante qui masque tout affleurement sur le terrain et rend la cartographie par photographie aérienne délicate. L'utilisation d'images multispectrales comprenant un canal dans l'infrarouge sensible aux changements de végétation permet de contourner cette difficulté. En effet, la distribution et le type de végétation sont contrôlés par plusieurs paramètres dont la nature du sol. L'interprétation des images brutes et de différents rapports de canaux n'a malheureusement pas permis d'aboutir à des résultats significatifs à l'échelle globale

des îles étudiées. Ceci est dû essentiellement au fait que, dans cet écosystème particulier que constitue une île intra-océanique, la distribution de la végétation est essentiellement contrôlée par l'altitude et non pas par la nature du substratum sur lequel elle se développe.

L'exploitation du modèle numérique de terrain de l'île de Raiatea, réalisée à partir de carte topographique numérique a été beaucoup plus fructueuse. En effet, l'interprétation de ce type de topographie a permis de déterminer la géométrie de l'édifice volcanique qui résulte, à la fois, de l'emboîtement de deux caldeiras effondrées et du glissement du flanc oriental. Cette déstabilisation mixte est analogue à celle décrite au niveau d'autres édifices, comme à la Réunion ou à Hawaii.

Abridged English version

A combined analysis of SPOT imagery and a Digital Elevation Model (DEM) was carried out for the islands of Raiatea and Tahaa, in the Society Islands of French Polynesia, to determine the

geometry and structure of the volcano and to map the pattern of the basaltic and trachytic lava flows. Previous studies on Raiatea have suggested different shapes for the volcanic caldera. Deneufbourg (1965) proposed a simple large caldera located in the southern part of the island, while Brousse and Berger (1985) described two ringed calderas. Recently, Blais et al. (1997) suggested that the eastern flank of the caldera corresponds to gravitational sliding toward the sea.

The main technical problem in this study arises from the outcrop condition because of the highly dense vegetation that masks the rocks both in the field and on satellite images. To overcome this difficulty, we used multispectral SPOT imagery, which includes an infrared channel sensitive to vegetation changes that may be related to differences in lithology. An analysis of the different untreated channels reveals a great amount of detail on the coral reef and its associated lagoon. However, the islands show a homogeneous radiometric pattern with low contrasts. Only some small sedimentary plains and very recent flows can

(1) Géosciences Rennes, UPR 4661, Université de Rennes I, 35042 Rennes Cedex. E-mail : dauteuil@univ-rennes1.fr

(2) CEA/DASE, Laboratoire de Détection et de Géophysique, BP 12, 91680 Bruyères-le-Châtel.

(3) UMR n° 6538 « Domaines Océaniques, Université de Bretagne Occidentale, BP 809, 29285 Brest.

be extracted. For the areas covered by dense vegetation, a very low contrast can be detected that coincides with the topographic contour levels. This is interpreted as resulting from a vegetation distribution that is guided by elevation and not by lithology.

A more specific processing was performed to highlight these low contrasts due to vegetation by calculating index ratios between the different channels (Pouget et al., 1988). This processing exhibits the main facies observed on the untreated images, but no significant changes that could be interpreted as resulting from changes in lithology. Thus no clear change in vegetation distribution could be attributed to a lithological basement effect. In this tropical and oceanic context, the vegetation is thus controlled by elevation and not by lithology.

The caldera structure and the faulting pattern cannot be revealed by such a processing technique. Thus, information contained in the topography was digitized and transformed into a digital elevation model from the classical topographic map. This analysis reveals two topographic rings in the southern part of Raiatea: the larger one forms the main topographic feature, whereas the smaller one is located inside the larger one and is largely discontinuous. These ring structures display asymmetrical profiles with their steeper slopes oriented toward the central part of the island. The discontinuity of the small inner ring can be attributed to a late-stage event. The outer ring is largely dissected by broad deep valleys, while the inner corona is mainly affected on its eastern flank by narrow valleys. This difference in the erosion rate can be interpreted as resulting from a difference in age: the inner feature being younger (so less eroded) than the outer one.

The eastern flank of Raiatea is extensively cut by valleys trending N 50° E. Blais et al. (1997) have pointed out that the valley located to the east of the Faaroa trough is controlled by a set of N 50° E-trending faults. These faults overprint both ring structures located in the south of the island, indicating that they correspond to a late event.

We suggest that the present-day structural pattern of Raiatea arises from three events: a main gravitational collapse

forming the Faaroa trough, then a second collapse generating the smaller inner caldera, and finally, N 50° E-trending faults affecting the eastern part of the island. This evolution of deformation through time seems to be characteristic of volcanic islands located within plates.

Introduction

La structure globale d'un édifice volcanique résulte de plusieurs types de déformation qui proviennent d'instabilités gravitaires et des contraintes régionales (Chevallier, 1986). Les instabilités gravitaires sont consécutives soit du refroidissement, ou de la vidange de la chambre magmatique qui provoque l'effondrement de la caldeira, soit de la déstabilisation du cône par gravité à l'origine de grands glissements de terrains vers l'extérieur de l'édifice (Merle et Vendeville, 1995). Ces différents effondrements affectent le volcan à des profondeurs très variables depuis la centaine de mètres jusqu'à plusieurs kilomètres. La combinaison de deux modes d'effondrement est possible comme à la Réunion ou à Mauna Loa, et rend difficile parfois leur distinction (Chevallier, 1986).

La déformation induite par les contraintes régionales s'inscrit dans la dynamique générale de la zone : elle est contrôlée, entre autre, par les directions régionales qui guident la mise en place des magmas au travers de la plaque lithosphérique. Dans le cas de volcans édifiés sur la lithosphère océanique, la direction générale de la dorsale et celle des zones transformantes représentent les deux axes structuraux majeurs à l'échelle régionale. Beaucoup d'îles intra-océaniques ont une forme triangulaire comme aux Canaries (Carracedo, 1994). Cette géométrie est due à la présence de trois zones de rifts à 120° d'où s'épanchent préférentiellement les laves. Ces branches, formant un point triple, guident l'édification et la structuration de l'île : la caldeira centrale étant à l'intersection de ces branches. L'origine de cette géométrie est très controversée : l'une des hypothèses implique la réactivation des grandes directions régionales.

L'un des problèmes importants posés par le volcanisme intraplaque est la géométrie de la caldeira : est-elle unique ou

multiple, emboîtée, asymétrique ? Un début de solution permettra de contraindre le mode de déformation qui modèle ce type d'île. Ce problème est d'autant plus difficile à résoudre que toute île, située en milieu subtropical, possède un couvert végétal très important, masquant les affleurements et que l'érosion très active modifie rapidement la morphologie. L'imagerie satellitaire peut être un moyen d'investigation efficace pour des zones difficiles d'accès. En effet, elle doit permettre de discriminer les différentes lithologies présentes sur les îles (basaltes, gabbros, trachytes) qui contrôlent le développement de la végétation indigène. La topographie peut aussi fournir aussi des informations très contraignantes sur la structuration des îles. Ainsi, l'analyse détaillée de la topographie couplée à celle de l'imagerie satellitaire doit apporter des informations significatives pour contraindre la structure et l'évolution de la caldeira.

Dans cette étude, on se propose d'utiliser l'imagerie Spot sur les deux îles de l'archipel de la Société (Polynésie française), Raiatea et Tahaa ceinturées par un même et unique lagon. De plus, la topographie de la seule île de Raiatea a été étudiée par des méthodes numériques. Nous essaierons, ainsi, de contraindre le cadre structural de cette île et tenterons de préciser les limites des différentes coulées. Ceci mettra en évidence les limites d'utilisation de ces types d'information à des fins de cartographie structurale et pétrographique, dans un contexte insulaire subtropical qui représente des conditions très particulières d'affleurements.

Contexte géologique

La Polynésie française est constituée par cinq archipels subparallèles (Marquises, Tuamotu, Pitcairn-Gambier, Société, Australes) et suborthogonaux à la dorsale Est-Pacifique. Les îles composant ces archipels sont l'expression aérienne du fonctionnement des sources magmatiques fixes dans le manteau poinçonnant la plaque lithosphérique qui dérive au-dessus d'elle (Wilson, 1963 ; Duncan et McDougall, 1976 ; Guille et al., 1993).

L'alignement de la Société s'étend sur environ 700 km selon une direction moyenne N 120° E depuis l'île de Mehetia au sud-est située à la verticale du

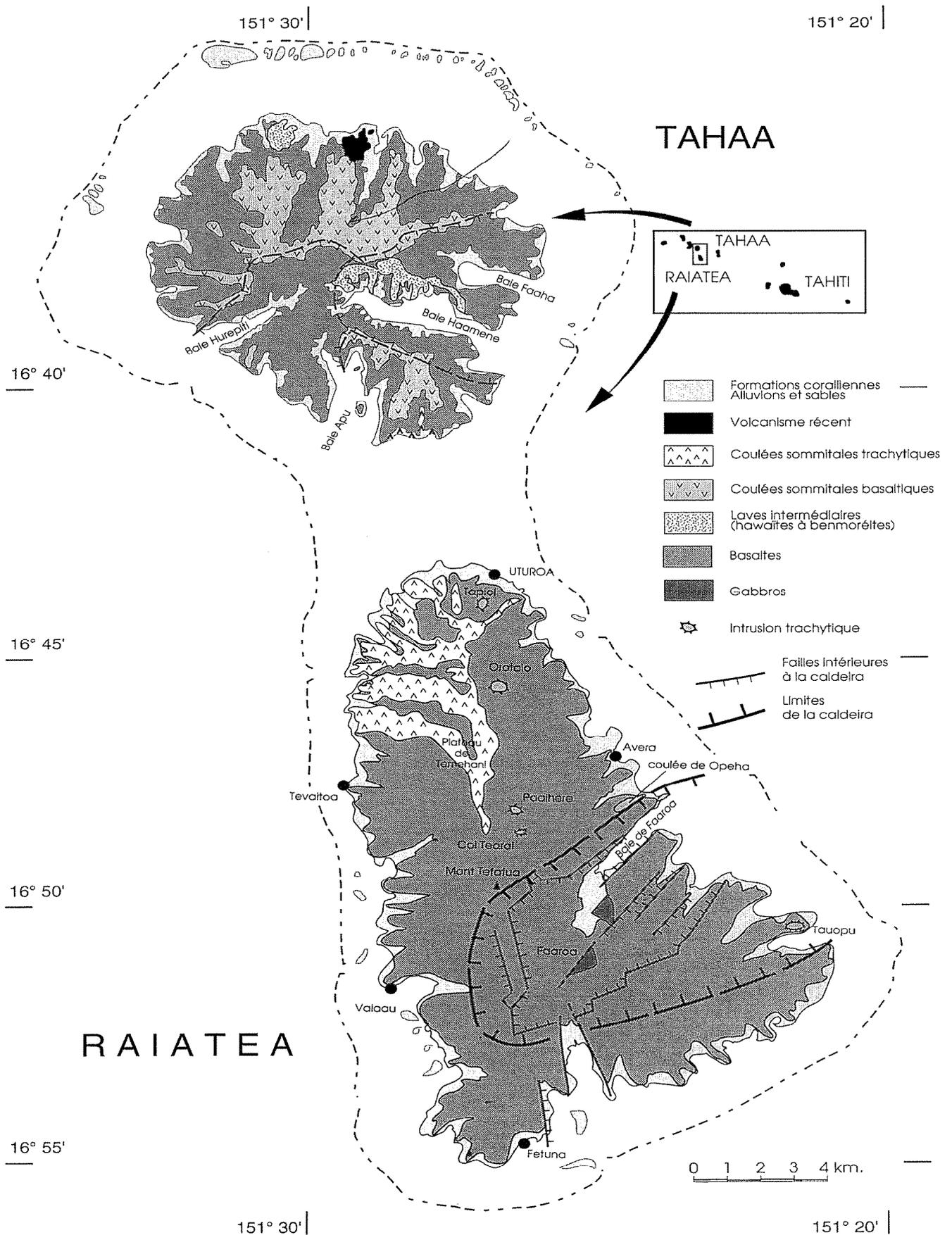


Fig. 1 - Carte géologique simplifiée des îles de Tahaa et de Raiatea. Elle a été réalisée d'après trois documents : ORSTOM (1993) pour les deux îles, Brousse et al. (1986) pour l'île de Tahaa et Blais et al. (1997) pour l'île de Raiatea.

point chaud actif, jusqu'à l'atoll de Motu One au nord-ouest (Binard *et al.*, 1993).

Les îles de Raiatea (2,75-2,44 Ma, Blais *et al.*, 1997) et de Tahaa (3,39-2,62 Ma, Gisbert, 1989) ont des âges voisins mais seule l'île de Tahaa présente une reprise de l'activité volcanique (1,41-1,10 Ma, Gisbert, 1989). Elles sont entourées par le même lagon et ont chacune leur spécificité ; elles diffèrent notamment par leur morphologie et par la nature des matériaux qui les constituent (fig. 1).

De forme subtriangulaire, l'île de Raiatea a une superficie d'environ 230 km² et le sommet le plus élevé atteint 1017 m. Les premières données cartographiques ont été obtenues par Deneufbourg (1965), complétées ultérieurement par Brousse et Berger (1985). Blais *et al.* (1997) ont, à la suite de missions récentes, apporté des données nouvelles sur la mise en place des laves, leur chimie et la chronologie des événements magmatiques. Deux ensembles volcaniques constituent cette île : le volcan bouclier formé par l'empilement de coulées basaltiques fluides d'épaisseur métrique et le plateau de Temehani d'orientation nord-sud constitué de trachytes. Deneufbourg (1965) interprète la large dépression au sud de Raiatea comme étant une caldeira simple ; Brousse et Berger (1985) en font deux caldeiras emboîtées. Blais *et al.* (1997) ont proposé que cet effondrement, connu sous le nom de dépression de Faaroa où affleurent des gabbros, résulte de glissements sous-marins des flancs du volcan comme dans l'île de Nuku Hiva dans l'archipel des Marquises (Le Dez, 1996) ou de la Réunion (Lenat et Aubert, 1982). L'édification du volcan bouclier, exclusi-

vement basaltique, s'est produit rapidement entre 2,75 et 2,52 Ma, puis cet épisode a été immédiatement suivi, entre 2,54 et 2,44 Ma, par la mise en place d'intrusions et de coulées de nature trachytique selon des fractures nord-sud (Blais *et al.*, 1997). Compte tenu de la distance de 360 km séparant Raiatea de la position actuelle du point chaud de la Société, la fourchette d'âges obtenue est compatible avec une vitesse de dérive de la plaque Pacifique de 11 cm/an par rapport à un panache mantellique supposé fixe.

De forme globalement circulaire, principalement dans sa partie septentrionale, l'île de Tahaa est découpée par quatre profondes baies dans sa partie méridionale. Cette île est, avec 90 km², beaucoup plus petite que Raiatea ; son point culminant n'atteint que 590 m. Là aussi, les premières données cartographiques ont été obtenues par Deneufbourg (1965), complétées ultérieurement par Brousse *et al.* (1986) et Gisbert (1989). Un intérêt particulier a été porté sur des enrichissements en Terres Rares découverts dans certaines roches volcaniques dans la partie nord de l'île (Joron *et al.*, 1991). Tahaa est un volcan comportant deux caldeiras, le premier effondrement étant partiellement entaillé à l'est par la seconde caldeira. Trois phases volcanologiques principales ont édifié ce volcan, la première phase étant antérieure à l'effondrement des caldeiras (Brousse *et al.*, 1986). A la fin de la première phase d'activité paroxysmale, se produit la vidange de la chambre et la surcharge due à la masse des produits émis entraîne l'effondrement des caldeiras. De petits volcans adventifs de type strombolien, à rares coulées, semblent terminer cette histoire volcanologique. A Tahaa, les massifs de gabbros

sont absents, seuls quelques filons de microgabbros et de gabbros sont signalés (Gisbert, 1989). De même, il n'a pas été mentionné de coulées puissantes et abondantes, ni d'intrusions à chimisme trachytique. Tout ceci, ajouté aux morphologies fort différentes, fait que Tahaa s'oppose nettement à Raiatea.

Scène Spot : les îles de Raiatea et Tahaa

Données utilisées et traitements numériques

Le système d'observation de la Terre Spot possède deux modes d'acquisition d'images de réflectance correspondant à différentes gammes spectrales et résolutions au sol. Le mode panchromatique (P) enregistre dans la gamme du « visible » (0,51-0,73 µm) avec une résolution au sol de 10 mètres, alors que le mode multispectral (XS) enregistre la réflectance dans trois canaux ayant chacun une gamme de longueur d'onde réduite et spécifique (XS1 : 0,5-0,59 µm - vert ; XS2 : 0,61-0,68 µm - rouge ; XS3 : 0,79-0,90 µm - infrarouge) et une résolution au sol de 20 m. La gamme utilisée reste relativement réduite et les trois canaux sont relativement corrélés. Dans la présente étude, le mode XS a été choisi en raison de sa meilleure résolution spectrale due notamment à son canal dans l'Infrarouge proche, canal sensible à la végétation. En effet, le couvert végétal naturel des îles tropicales est omniprésent masquant pratiquement tout affleurement ; seuls des changements de végétation associés à des lithologies différentes pourront être détectés. Il faut ajouter à ceci l'effet d'altitude qui provoque un étagement altitudinal de la végétation naturelle. L'île de Raiatea permet d'étudier les relations entre une lithologie assez simple mais contrastée (basaltes, gabbros basiques et ferromagnésiens, trachytes différenciés et alcalins), et la végétation subtropicale. La scène étudiée porte les KJ : 498-383, et a été prise subverticalement le 29/11/89 ; elle a été traitée au niveau 1B.

Nous avons effectué une classification simple de l'image à partir de chaque canal. Sur les histogrammes de ces trois canaux, il est possible de distinguer la mer, la ceinture corallienne, le sable humide, la terre émergée recouverte de végétation et les nuages (tabl. 1, fig. 2).

	XS1	XS2	X3
mer	0-26	30-45	11-25
terre émergée et végétation	70-145	40-80	25-50
sable humide	26-70	80-100	36-60
cordon corallien	-	110-140	36-60
nuages	> 145	> 170	>90

Tabl. 1 - La répartition des valeurs de pixel mise en évidence à partir des trois canaux. Cinq classes ont été distinguées : la mer, les terres émergées, le sable humide, le cordon corallien et les nuages.
Table 1 - Classification of the pixel values extracted from the three bands: sea, emerged land, wet sand, coral reef and clouds.

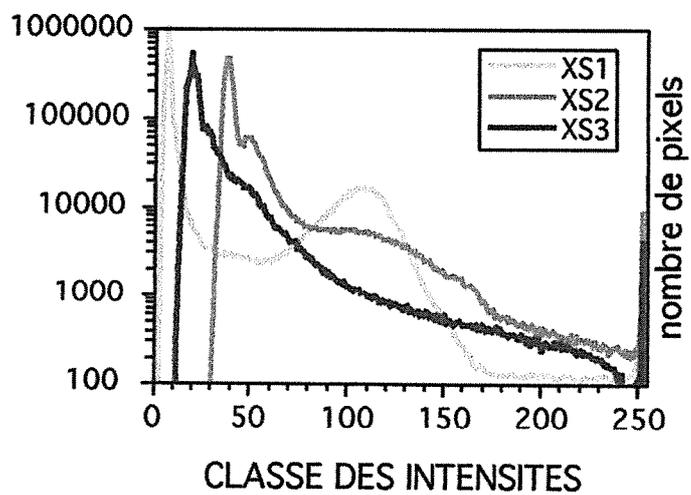
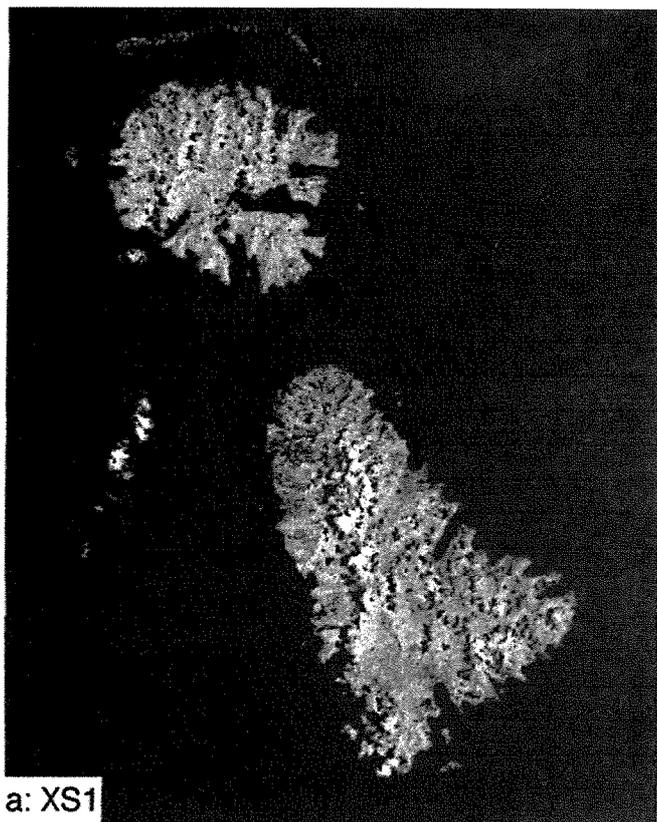


Fig. 2 - Les trois canaux XS de la scène Spot (KJ : 498 - 383) : a) XS1, b) XS2, c) XS3, d) histogramme des valeurs de pixels des trois canaux (XS1, XS2, XS3) de la scène Spot.

Fig. 2 - The three XS channels of the SPOT image: a) XS1, b) XS2, c) XS3, d) histogram of pixel values corresponding to the three bands (XS1, XS2, XS3) of the SPOT image.

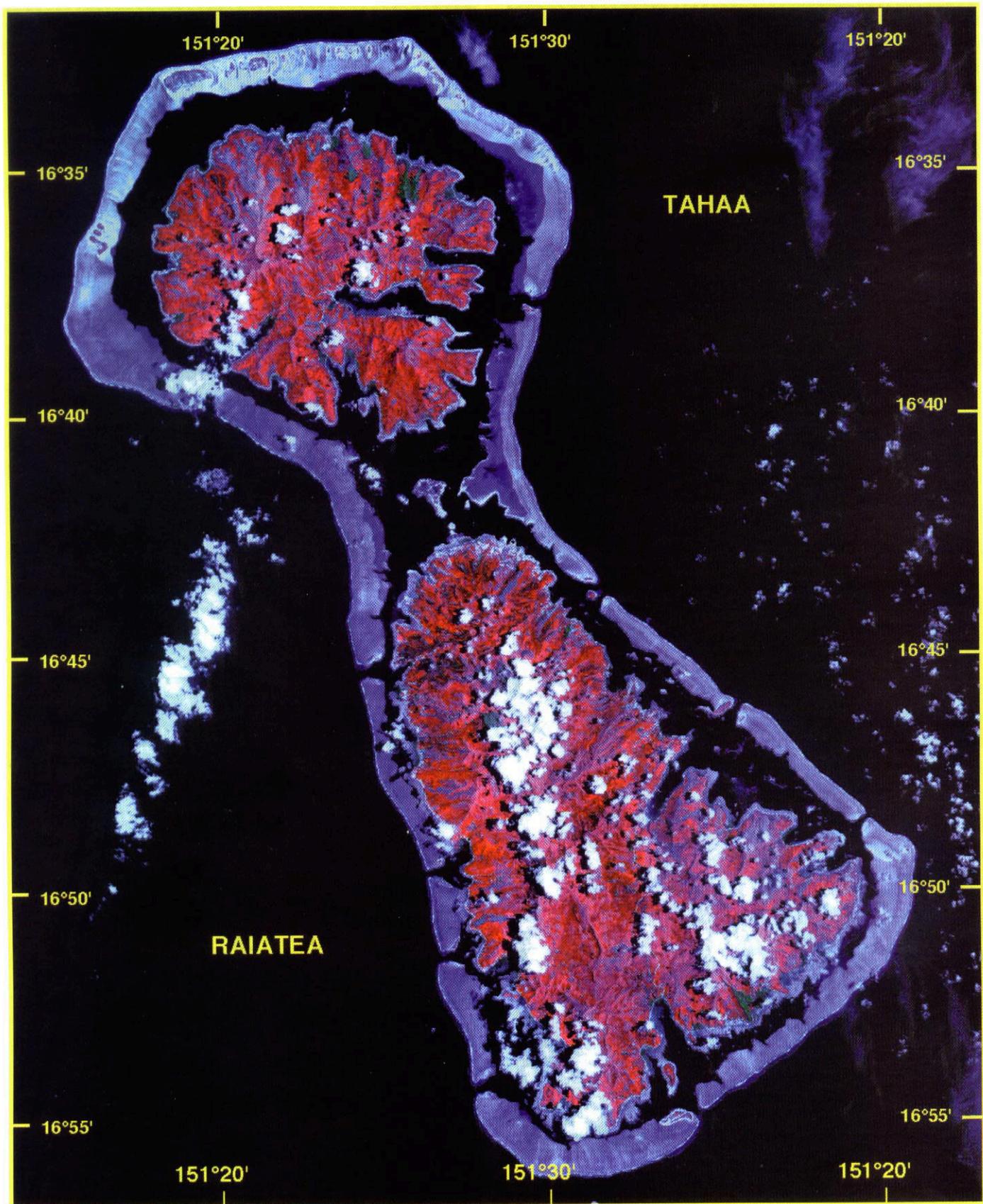


Fig. 3 - Composition colorée des trois canaux. Chaque canal a subi un étalement linéaire de la dynamique qui a permis de saturer la mer en noir et les nuages en blanc.

Fig. 3 - Colour composite from the three channels (XS1, XS2, XS3). Each channel was processed by a linear stretching. The sea was saturated in black and the clouds in white.

La composition colorée présentée en figure 3 a été réalisée à partir d'une combinaison des trois canaux, chacun ayant subi au préalable une égalisation d'histogramme auparavant. Cette figure montre clairement l'étagement de la végétation en fonction de l'altitude (couleurs rouge et bleu), le sable humide et les sédiments côtiers dans les teintes bleu clair et vert, et les coulées du nord de Tahaa en violet pâle. Ces traitements simples ne font pas ressortir les informations structurales recherchées.

Pour s'affranchir des difficultés liées à la végétation, une analyse par combinaison de canaux a été réalisée. Trois rapports de canaux ont été calculés qui correspondent à des indices de Brillance (IndB), de Végétation (IndV) et de Couleur (IndC) (Pouget *et al.*, 1988). Les équations de ces rapports sont les suivantes :

$$indB = \sqrt{XS1^2 + XS2^2 + XS3^2/3}$$

$$indV = (XS3 - XS2)/(XS3 + XS2)$$

$$indC = (XS2 - XS1)/(XS2 + XS1)$$

avec XS1, XS2 et XS3 correspondant aux valeurs respectives d'un pixel dans les trois canaux. Ces trois indices ont été choisis en raison de leur pouvoir discriminant sur la végétation qui masque les différentes unités géologiques.

Résultats

Sur chaque canal, il a été réalisé un étalement linéaire de la dynamique à partir des histogrammes (fig. 2a, 2b et 2c). La figure 2d montre la distribution spectrale de chaque canal et le tableau 1 les différentes classes qu'il est possible de distinguer à partir des histogrammes. Hormis les nuages et la mer, deux faciès radiométriques peuvent être distingués : l'ensemble comprenant le couvert végétal et les formations volcaniques, d'une part, et l'ensemble regroupant le sable mouillé et celui situé sous une faible épaisseur d'eau (de l'ordre d'une vingtaine de mètres), d'autre part. Ce dernier ensemble est présent tant autour de l'île que sur le cordon corallien.

Le canal XS1 sur les deux îles (fig. 2a) montre un faciès quasi homogène sur toute la surface, qui correspond au fort couvert végétal de l'île. Dans le canal XS2, le cordon corallien émerge sous une

faible épaisseur d'eau ainsi que le sable des plages bordant le pourtour des îles apparaissent sous un teinte gris clair (fig. 2b). Dans ce canal, les deux îles présentent des faciès radiométriques plus contrastés que dans le canal XS1. Il est possible de distinguer un faciès plus sombre dont les contours suivent celui des vallées. Ceci suggère fortement un contrôle de la radiométrie par la végétation en fonction de l'altitude. Un faciès plus clair s'étale au nord-ouest de l'île de Tahaa : il correspond aux coulées sommitales prolongées par le volcan Stromboli récent de Oohai (Brousse *et al.*, 1986). Dans le canal XS3 (fig. 2c), les terres émergées présentent un faciès assez homogène à l'exception d'une ligne périphérique correspondant au sable humide ou faiblement émergé et aux coulées plus claires du nord de l'île de Tahaa. Dans le cordon corallien, on peut distinguer aisément les chenaux et l'organisation des sédiments internes. La composition colorée (fig. 3) permet une bonne visualisation des différents faciès radiométriques. Un étagement de la végétation ressort parfaitement à la limite rouge/violet. Quelques plaines sédimentaires sont marquées par des teintes vertes, et les différents chenaux du cordon corallien apparaissent avec des nuances de bleu. La trace de la caldeira n'est pas visible avec ce type de données.

Les végétaux ayant une réponse particulière dans la gamme rouge-infrarouge, ceci se traduit par l'observation de l'étagement de la végétation visible dans les canaux XS2 et XS3. Nous avons calculé trois rapports de canaux, décrits auparavant, afin de mettre en évidence si il existait une distribution particulière de la végétation autre que celle liée à l'altitude (fig. 4). Contrairement aux canaux bruts, les histogrammes ne permettent pas d'individualiser des faciès parfaitement isolés. En effet, les trois indices choisis sont sensibles aux contrastes entre les pixels, ce qui est fondamental pour distinguer les contours lithologiques et les structures.

L'indice de brillance (fig. 4a) montre des valeurs quasi homogènes pour les deux îles et le cordon corallien qui présente beaucoup de détail dans les parties émergées. L'indice de couleur (fig. 4b) fait nettement ressortir la végétation des îles ainsi que les parties émergées du cordon corallien connues localement sous le

nom de « motu ». Hormis le pic correspondant pour la mer et toute la gamme correspondant aux nuages (>100), l'histogramme montre un simple pic d'allure gaussienne. L'indice de végétation (fig. 4c) montre des faciès radiométriques plus contrastés au niveau des îles. Il fait ressortir clairement la végétation située au sommet des crêtes, notamment au nord-ouest de l'île de Tahaa. De même, la limite entre les plages de sable mouillé et la végétation dense est dessinée par une frange large de un à deux pixels très clairs. Les coulées récentes au nord de Tahaa sont bien individualisées avec un indice plus clair.

MNT : l'île de Raiatea

Données utilisées et traitements numériques

Dans un contexte volcanique récent, la topographie représente un bon guide structural. De bons résultats ont été obtenus au niveau des dorsales océaniques où la bathymétrie constitue l'information de base (Dauteuil, 1995 ; Dauteuil et Brun, 1996). Dans l'exemple abordé au cours de cette étude, la difficulté majeure de l'interprétation de la topographie provient de l'érosion qui est très active en milieu océanique subtropical. Ne disposant d'une carte topographique que pour l'île de Raiatea, seule la topographie de cette île sera analysée en détail au cours de ce travail. Le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé provient de l'interpolation de courbes de niveaux digitalisées à partir de la carte topographique IGN à 1/40 000 éditée en 1958. Les points digitalisés ont ensuite été interpolés par la méthode de Swain (Swain, 1976) qui permet d'obtenir une grille de nœuds régulièrement espacés à partir de points distribués aléatoirement. L'interpolation est réalisée en deux étapes : tout d'abord, une grille régionale ayant un maillage lâche est calculée par recherche de la courbure minimum dans une fenêtre de calcul, puis les données sont fusionnées à cette grille régionale en utilisant une fonction Spline Cubique pour construire la grille finale.

Etant donnée la précision du document de départ, le MNT a été réalisé avec un pixel de 20 m. Les valeurs des alti-

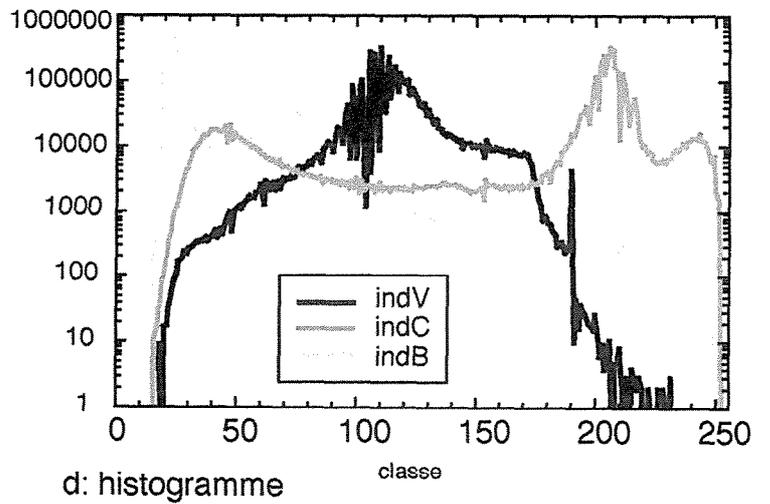
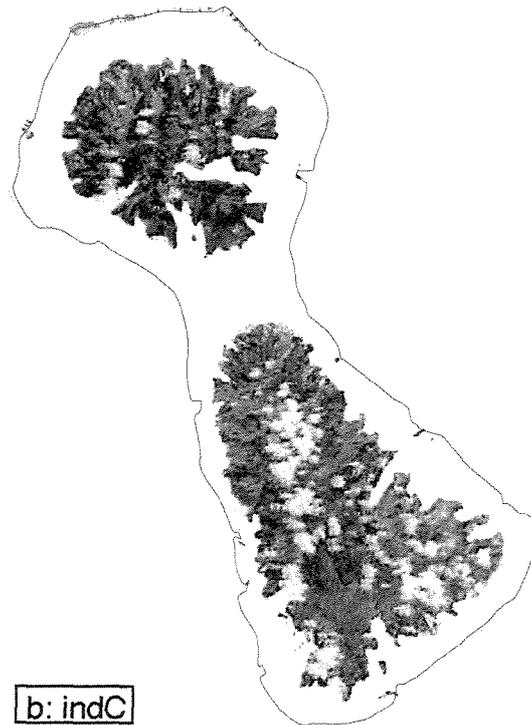


Fig. 4 - Les trois rapports de canaux utilisés dans cette étude (Ponget *et al.*, 1988).

a : indice de Brilliance $indB = \sqrt{XS1^2 + XS2^2 + XS3^2}/3$. b : indice de Couleur $indV = (XS3 - XS2)/(XS3 + XS2)$.

c : indice de Végétation $indC = (XS2 - XS1)/(XS2 + XS1)$.

Pour chaque rapport, l'histogramme est inclus dans la figure et la valeur des pics est indiquée dans le tableau 1.

Fig. 4 - The three channel indexes used during this study:

a: Brightness index $indB = \sqrt{XS1^2 + XS2^2 + XS3^2}/3$. b: Colour index $indV = (XS3 - XS2)/(XS3 + XS2)$. c: Vegetation index $indC = (XS2 - XS1)/(XS2 + XS1)$.

tudes sont obtenues avec une précision verticale de 25 m. La faible précision verticale provient de la qualité du document initial qui présente des lacunes d'information au niveau des sommets les plus hauts de l'île. En effet, en raison du fort couvert nuageux permanent, l'altitude des sommets les plus hauts n'a jamais pu être mesurée par les géographes. Le MNT montre, à ces endroits, une topographie lissée peu réaliste et fautive.

Plusieurs traitements ont été mis en œuvre pour extraire les grands traits morphologiques de la topographie de l'île. La mauvaise qualité des données et la forte érosion ne permettent pas de cartographier en détail le champ de déformation à partir de la topographie, comme cela peut être fait dans des cas favorables comme les dorsales océaniques (Dauteuil, 1995). Toutefois, les traitements mis en œuvre (calcul des pentes locales, filtres gradients directionnels, vue stéréoscopique, etc.) ont permis de préciser la géométrie de la caldeira et des directions morphologiques susceptibles d'être associées à des directions tectoniques régionales. Les filtres gradients directionnels fournissent des images ombrées de la topographie et permettent donc d'interpréter plus aisément la structuration de la morphologie. Cette méthode numérique nécessite l'utilisation d'un minimum de trois filtres ayant des directions séparées 45° pour cartographier l'ensemble des structures (Dauteuil, 1995).

Résultats

La topographie de l'île varie de 0 à 1017 m (Mont Tefatua). La distribution des altitudes ne suit pas une décroissance régulière. En effet, l'histogramme des altitudes (fig. 5) montre une décroissance très importante entre 0 et 50 m ; cette partie de la distribution correspond aux zones basses proches de la côte. Ensuite, le nombre de pixels en fonction de l'altitude diminue, la courbe-enveloppe de l'histogramme formant un plateau faiblement décroissant entre 50 et 200 m, puis le nombre de pixels décroît à nouveau. Le plateau intermédiaire de l'histogramme, entre 50 et 200 m, correspond à la dépression de Faaroa et au fond des vallées.

Deux styles morphologiques caractérisent la topographie de l'île : un secteur septentrional présentant un axe topogra-

phique central haut, orienté N165°-170° et une partie méridionale relativement basse (250 m en moyenne) limitée par des hauts reliefs grossièrement semi-circulaires.

La partie nord de l'île est découpée par des profondes vallées perpendiculaires à la côte, orientées N50° sur la côte est et N90° sur la côte ouest. Ces vallées présentent des flancs parallèles et possèdent des fonds circulaires. Les vallées orientales, au profil transverse en "U", sont plus larges (1-1,5 km) que les vallées occidentales dont le profil est en "V" (0,5-0,7 km). La partie centrale de Raiatea forme un haut plateau aux contours irréguliers et d'orientation N165°-170° (plateau de Temehani) dont les sommets culminent à plus de 1000 m. La partie extrême nord est plus basse avec une altitude moyenne de 150 m. Un petit relief limité par un accident N 50° au sud du Tapioi, forme une dépression effondrée au sud-est. Cet accident morphologique semble se prolonger à l'intérieur de l'île.

Le relief de la partie méridionale est caractérisé par des crêtes hautes (plus de 300 m) présentant une allure courbe (fig. 5). Ces crêtes apparaissent s'organiser en deux demi-couronnes discontinues et entaillées par de larges vallées (2-3 km) ; la plus externe d'entre elles correspond au trait morphologique principal de cette partie sud de l'île de Raiatea. Généralement, elles présentent une morphologie asymétrique avec un flanc raide orienté vers la dépression de Faaroa et avec un flanc plus large et de pente plus faible orienté vers l'extérieur de la dépression (fig. 6). Cette dissymétrie est particulièrement nette sur les coupes B et D de la figure 6 ; la dépression de Faaroa, au centre, constitue une zone relativement plane, contrastant morphologiquement avec les autres secteurs de l'île. Elle est limitée à l'ouest par un relief très allongé haut de 300 m, orienté N165° et connu sous le nom de Fanehui. Cet axe topographique s'arrête brusquement au nord sur le relief semi-circulaire principal qui borde cette zone. Au sud, il s'amortit doucement en changeant légèrement d'orientation au niveau de la baie de Faatemu et forme un col entre cette baie et la dépression de Faaroa.

Les vallées affectant ce secteur méridional, sont encaissées et découpent forte-

ment la côte en baies profondes sur la côte occidentale, les vallées présentent une morphologie linéaire et étroite (largeur inférieure à 0,5 km). Les vallées sont faiblement développées sur la côte sud, exceptée une baie profonde et large (la baie de Faatemu) qui est limitée à l'est par un escarpement relativement linéaire orientée N160° et long de plus de 4 km (fig. 5). D'autres reliefs, plus petits et de même orientation, sont visibles juste à l'est de cette baie. Les vallées encaissées de la côte orientale sont orientées N50° et présentent un emboîtement dans leur partie amont. Leur extension en amont forme une ligne de crêtes en zigzag limitant la dépression interne de Faaroa. Cette ligne de crêtes culmine à 250 m au-dessus du niveau de la mer.

Discussion

Cartographie lithologique des deux îles

L'un des objectifs de cette étude était de cartographier les coulées présentant des âges et un chimisme différents en zone tropicale humide en utilisant les données Spot. La principale difficulté réside dans l'importance du couvert végétal qui masque les affleurements. L'utilisation des trois canaux du mode XS qui ont des réponses spectrales différentes en fonction du couvert végétal (fig. 3), pouvait laisser envisager des résultats probants. Cependant, la distinction des basaltes constituant l'édifice principal des deux îles, des roches plutoniques et des laves différenciées n'a pas été possible. Néanmoins, grâce à cette méthode, il a pu être possible de cartographier les alluvions récentes et les bandes sableuses qui ceinturent les deux îles ainsi que le cordon corallien (fig. 2 et fig. 3b). Deux raisons peuvent être invoquées pour expliquer ces résultats négatifs :

- un chimisme pas assez contrasté entre les roches magmatiques pour permettre le développement d'une végétation particulière à chaque lithologie ;

- un milieu écologique confiné et isolé qui n'a pas permis le développement d'une végétation naturelle indigène suffisamment diversifiée pour montrer une adaptation spécifique au substratum.

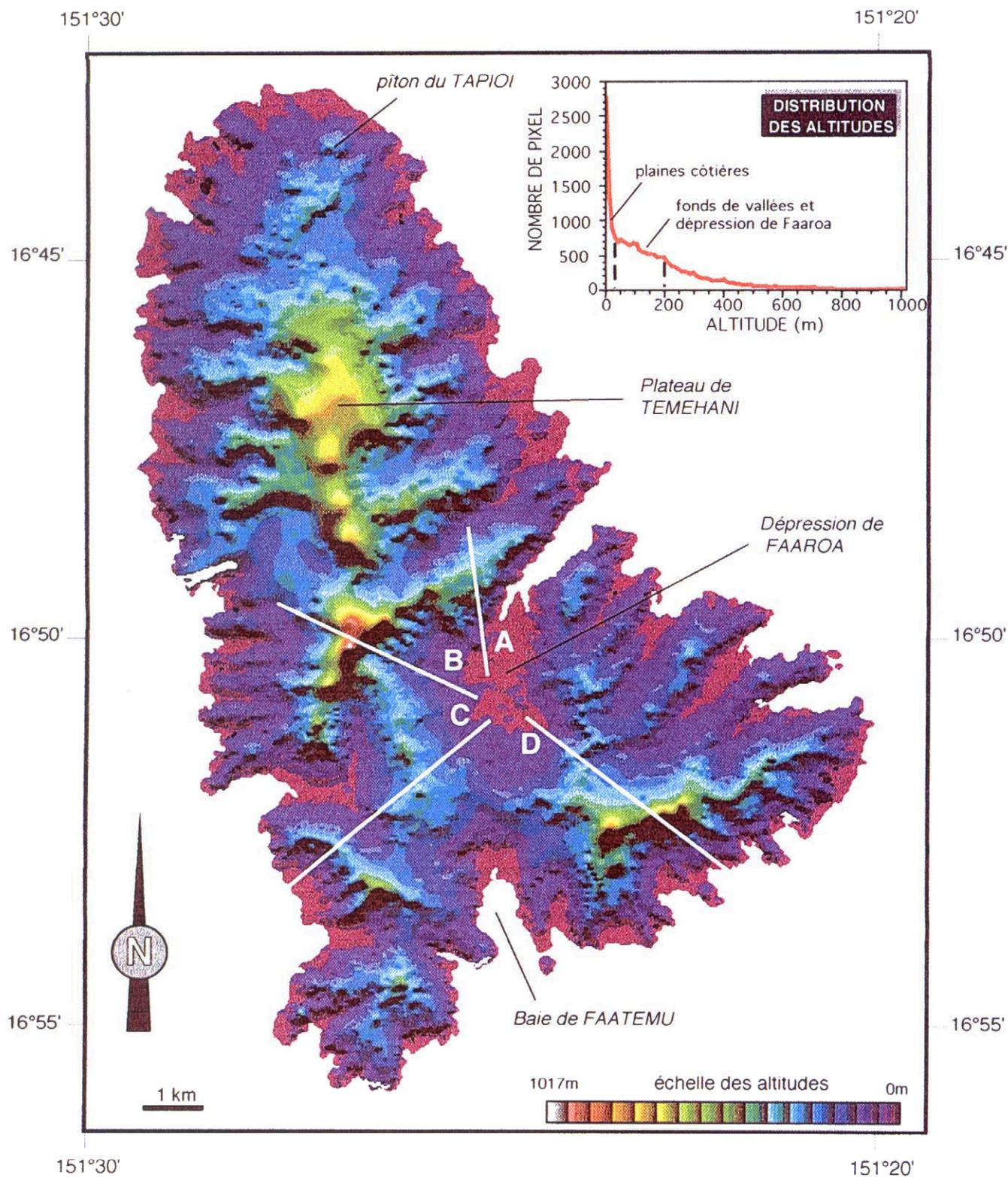


Fig. 5 - Modèle numérique de terrain de l'île de Raiatea. Cette topographie numérique a été réalisée à partir de l'interpolation de courbes de niveau digitalisées. La résolution au sol est de 20 m et de 25 m en vertical. Cette faible résolution verticale provient de la précision modérée de la carte IGN qui a servi de base à la réalisation du MNT. Cette carte a été éditée par l'IGN en 1958. Les lignes blanches indiquent la position de profils topographiques de la figure 6.
 Fig. 5 - Digital elevation model of Raiatea realized from the interpolation of digitized contours. Ground resolution is 20 m horizontal and 25 m vertical. The poor vertical resolution is due to the low precision of the 1958 IGN map that was used for the DEM. The white lines show the location of the topographic profiles of Figure 6.

Dans l'exemple étudié, le paramètre qui contrôle au premier ordre le développement d'une végétation variée est l'altitude et non pas la lithologie. Ceci apparaît clairement, par exemple, pour les coulées de trachytes s'étendant du plateau de Temehani à la côte nord-ouest de Raiatea. Les différences radiométriques et d'indices de canaux sont corrélées à l'altitude. De même, il a été impossible d'extraire des variations significatives de radiométrie ou de valeurs d'indice pour les différentes intrusions trachytiques et les massifs gabbroïques du fond de Faaroa (fig. 2 et fig. 4).

Dans la partie nord de l'île de Tahaa, on observe des faciès radiométriques plus clairs et les valeurs des indices généralement plus élevés qu'ailleurs ; ceci indique une végétation différente au niveau de ce secteur. Cette réflectance particulière correspond aux coulées sommitales de l'édifice (Gisbert, 1989).

Les informations extraites de la scène Spot n'ont pas permis de contraindre le champ de fracturation des deux îles, ni la géométrie de la ou des caldeiras ; ceci a été réalisé à partir de la topographie.

Géométrie de la caldeira de Raiatea

L'étude du Modèle Numérique de Terrain (MNT) même réalisé à partir d'un document ancien s'est révélé riche d'informations. Les traitements numériques utilisés ont permis d'imager des traits structuraux essentiels qui sont difficiles à discerner sur le document papier de la carte topographique. Ainsi, les deux couronnes de crêtes apparaissent comme les éléments physiographiques forts de l'île de Raiatea : l'une en forme de fer à cheval largement ouvert vers l'est, l'autre grossièrement circulaire limitant et affectant la dépression de Faaroa (fig. 5 et fig. 7). La plus externe, ne dépassant pas dix kilomètres de diamètre, est bien développée au nord et à l'ouest de la dépression. Au sud, elle est interrompue par la baie de Faatemu. La couronne la plus interne limite le sud de la dépression et se prolonge vers le nord au milieu de la dépression. Elle bute perpendiculairement sur la ceinture externe, et sa limite orientale est formée par une ligne de crêtes de zigzag. L'asymétrie morphologique des reliefs formés par ces deux couronnes (flancs internes raides et flancs externes plus fai-

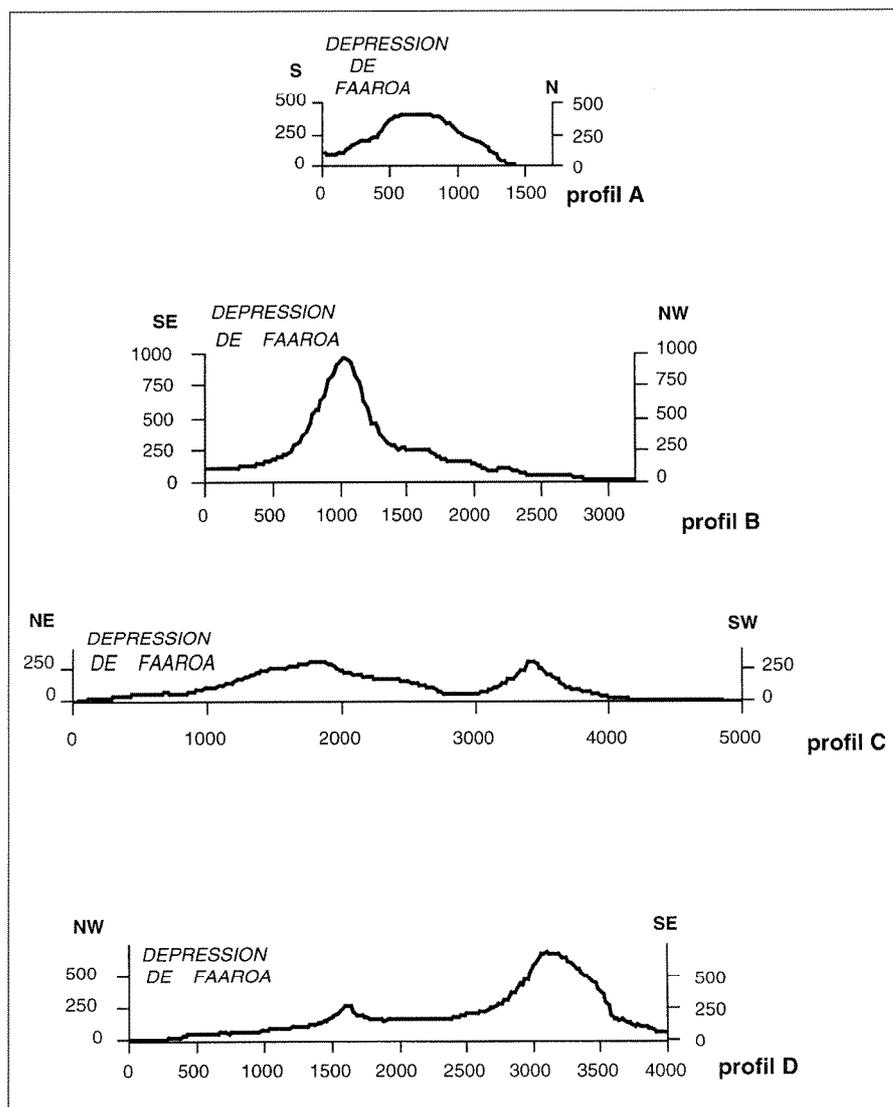


Fig. 6 - Profils topographiques radiaux autour du centre de la dépression de Faaroa, montrant l'asymétrie de reliefs qui la bordent. Leur localisation est indiquée sur la figure 5. Malgré le changement de direction de profils, la dépression a été placée systématiquement à gauche.

Fig. 6 - Topographic profiles around the Faaroa trough displaying the asymmetric shape of the calderas. The trough is located on the left of each profile, the location of which is indicated on Figure 5.

blement pentés, fig. 6) permet de proposer que la partie méridionale de l'île de Raiatea est formée de deux structures emboîtées (fig. 7). Peu d'arguments indiscutables permettent d'avancer une chronologie relative entre les deux. Toutefois, la caldeira externe semble plus affectée par l'érosion avec de grandes vallées très profondes et larges qui la découpent intensément, ceci indiquant probablement qu'elle est plus ancienne. Mais ceci doit être impérativement confirmé par d'autres études.

Ces deux caldeiras présentent une asymétrie importante avec un côté oriental plus bas et moins développé. Ce flanc de l'île est systématiquement entaillé par des

vallées en « U » qui s'arrêtent au niveau de la dépression de Faaroa. Ces vallées en « U » sont limitées au sud par une crête très haute. Ce dispositif est assez proche de celui décrit pour les cratères présentant un flanc effondré comme au Piton de la Fournaise à la Réunion (Chevallier et Bachelery, 1981) ou au volcan de l'île Marion dans l'océan Indien (Verwoerd, 1971 ; Verwoerd *et al.*, 1981). La déformation de ce flanc est interprétée comme résultant d'une série de glissements de terrain à grande échelle, repris en érosion et formant ainsi des vallées à fond plat.

La partie centrale de la dépression apparaît contrôlée par un autre style de déformation de type affaissement de cal-

deira, qui permet de mettre à l'affleurement du matériel plus profond (gabbro) à la faveur de failles (Marti *et al.*, 1997). Le flanc oriental effondré montre une érosion importante probablement favorisée par des glissements de terrain de grande ampleur. Ce type de déstabilisation d'un édifice volcanique a été décrit par Chevallier (1986) comme étant mixte, c'est-à-dire qu'il résulte à la fois des glissements de terrain et l'effondrement de la caldeira, ce qui a été décrit pour le Piton de la Fournaise (Réunion) et le Kilauea (Hawaii). La solution proposée dans ce travail (fig. 7) est différente de celles avancées dans le cadre des études précédentes (Deneufbourg, 1965 ; Brousse et Berger, 1985), notamment dans la dimension de la caldeira externe qui est beaucoup plus grande que celle suggérée auparavant. Il faut, cependant, noter que ce travail rejoint en partie celui de Brousse et Berger (1985) par la morphologie circulaire de l'effondrement interne, ce qui n'avait pas été reporté par Blais *et al.* (1997). Par contre, ces derniers avaient mis en évidence le découpage en touches de piano du flanc oriental des caldeiras.

Structure des deux îles et les directions régionales

L'île de Raiatea présente une forme générale triangulaire (fig. 1 et fig. 2) que l'on peut rapprocher de celle des îles Hierro et Tenerife aux Canaries (Carracedo, 1994) formées par trois zones de rift à 120°. L'étude morphostructurale à l'échelle de l'île de Raiatea n'a pas permis de mettre en évidence trois branches à 120°. La seule direction morphologique de dimension régionale est constituée par l'arête N165° qui arme le plateau de Temehani. Cet axe morphologique est constitué d'épaisses coulées trachytiques ralentissant l'effet de l'érosion. La direc-

tion N165° apparaît comme une direction privilégiée d'émission des laves différenciées, mais également comme direction tectonique contrôlant la morphologie du sud de l'île (baie de Faatemu). Il semble difficile de pouvoir proposer une structuration de l'île de Raiatea en trois zones de rifts comme aux Canaries. La géométrie triangulaire de Raiatea est, en fait, la résultante d'une direction tectonique majeure N165° associée, dans sa partie méridionale, à l'effondrement vers l'est de la caldeira.

L'ensemble Raiatea-Tahaa (fig. 1 et fig. 2) est orienté selon cette direction N165°. Cette direction majeure dans le Pacifique sud correspond à la direction des failles normales acquises au niveau de l'axe de la ride de l'ancienne ride Farallon (Mammerickx *et al.*, 1975 ; Diraison *et al.*, 1991). Ces failles forment un grain structural majeur qui a guidé la mise en place ultérieure des épanchements volcaniques. La direction N40°-50° observée dans les vallées en « U » et décrite par Blais *et al.*, (1997) est difficilement corrélable à la direction N80° des failles transformantes de cette plaque (ORSTOM, 1993). Cette direction est donc attribuée à la dynamique interne de l'effondrement gravitaire.

Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence les limites d'utilisation de l'imagerie satellitaire Spot dans les zones tropicales humides à fort couvert végétal. En effet, il avait été choisi d'utiliser le mode multi-spectral qui pouvait permettre d'effectuer une cartographie succincte du substratum à partir des variations de végétation consécutives aux différences chimiques entre les divers types de coulées. Plusieurs traitements numériques basés sur le calcul d'indices de canaux n'ont pas donné de résul-

tats convaincants. Dans ce contexte insulaire volcanique, même si la pétrographie et la géochimie des laves sont variées, cette différence n'est pas suffisamment forte pour contrôler l'adaptation d'une végétation spécifique à chaque type lithologique. Le développement de la végétation est principalement guidé par l'altitude.

L'analyse du modèle numérique de terrain, effectuée sur la seule île de Raiatea, s'est révélée plus riche en informations. On a pu ainsi cartographier, dans cette île, deux caldeiras emboîtées présentant un flanc oriental effondré. L'édifice a subi une déstabilisation en trois étapes : effondrement gravitaire principal dessinant la structure majeure de la dépression de Faaroa, glissement suivi par la formation d'une caldeira de dimension plus réduite à contour circulaire. L'ensemble est entaillé, par la suite, par des failles qui découpent la structure selon une direction N40-50°. Ce type d'évolution de la déformation d'un édifice volcanique semble être typique des îles intra-océaniques.

Remerciements

Une partie de la mise en œuvre des méthodes informatiques utilisées a été réalisée par Y. Quété (Géosciences Rennes). Nous remercions aussi F. Darboux pour sa collaboration active pour la réalisation du MNT et G. Diogo pour ses remarques constructives à la lecture du manuscrit. Les commentaires des deux rapporteurs (J.P. Deroin et C. King) ont largement amélioré la qualité de ce travail.

Les études de terrain sur l'île de Raiatea ont été rendues possible grâce à l'aide du CEA/LDG, de l'Université de Rennes I et du BRGM.

L'image Spot a été financée par le CEA sous licence de Spot image (CNES, 1989).

Références

- Binard N., Maury R.C., Guille G., Talandier J., Gillot P.Y., Cotten J. (1993) - Mehetia island, South Pacific : geology and petrology of the emerged part of the Society hot spot. *J. Volcanol. Geophys. Res.*, **55**, 239-260.
- Blais S., Guille G., Maury R.C., Guillou H., Miau D., Cotten J. (1997) - Géologie et Pétrologie de l'île de Raiatea (Société, Polynésie française). *C. R. Acad. Sci., Paris*, **324**, (2 a), 435-442.
- Brousse R., Berger E. (1985) - Raiatea dans l'archipel de la Société (Polynésie française). *C. R. Acad. Sci. Paris*, **301**, (2), n°2, 115-118.
- Brousse R., Gisbert T., Léotot C. (1986) - L'île de Tahaa : un volcan à deux caldeiras successives (archipel de la Société, Polynésie française). *C. R. Acad. Sci. Paris*, **303**, (2), n°3, 247-250.

- Carracedo J.C. (1994) - The Canary Islands: an example of structural control on the growth of large oceanic-island volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **60**, 225-241.
- Chevallier L., Bachelery P. (1981) - Évolution structurale du volcan actif du Piton de la Fournaise, Ile de la Réunion-Océan indien occidental. *Bull. Volcanol.*, **44**, n° 4, 723-741.
- Chevallier L. (1986) - Tectonics of Marion and Prince Edward volcanoes (Indian ocean): result of regional control and edifice dynamics. *Tectonophysics*, **124**, 155-175.
- Dauteuil O. (1995) - Morphology and fault pattern in the western part of the Blanco fracture zone (NE Pacific). *Mar. Geophys. Res.*, **17**, 1, 17-35.
- Dauteuil O., Brun J.P. (1996) - Deformation partitionning in a slow-spreading ridge undergoing oblique extension (Mohns ridge-Norwegian Sea). *Tectonics*, **15**, 870-884.
- Deneufbourg G. (1965) - Carte géologique de Raiatea et de Tahaa, 1/40 000, BRGM, Orléans.
- Diraison C., Bellon H., Leotot C., Brousse R., Barszczus H.G. (1991) - L'alignement de la Société (Polynésie française) : volcanologie, géochronologie, proposition d'un modèle de point chaud. *Bull. Soc. géol. Fr.*, **162**, n° 3, 479-496.
- Duncan R.A., McDougall I. (1976) - Linear volcanism in french Polynesia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **1**, 197-227.
- Gisbert T. (1989) - Volcanologie de l'île de Tahaa (archipel de la Société). Son enrichissement en terres rares. Thèse Université de Paris Sud, Orsay, tomes 1 et 2, 248 p. et 443 p.
- Guille G., Goutière G., Sornein J.F. (1993) - Les atolls de Mururoa et de Fangataufa (Polynésie française). I. - Géologie - Pétrologie - Hydrogéologie (édification et évolution des édifices). *Monographie DIRCEN/CEA*, 168 p., Masson Eds.
- Joron J.L., Schiano P., Turpin L., Treuil M., Gisbert T., Léotot C., Brousse R. (1991) - Exceptionnal rare earth element enrichments in Tahaa volcano (French Polynesia). *C. R. Acad. Sci. Paris*, **313**, 523-530.
- Le Dez A. (1996) - Variations pétrologiques et géochimiques associées à l'édification des volcans-boucliers de Polynésie française : exemple de Nuku Hiva et Hiva Oa (Marquises) et de Moorea (Société). Thèse Université de Bretagne Occidentale, Brest, 309 p. et annexes.
- Lenat J.F., Aubert M. (1982) - Structure of Piton de la Fournaise volcano (La Réunion Island, Indian Ocean) from magnetic investigations. An illustration of the analysis of magnetic data in a volcanic area. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **12**, 361-392.
- Mammerickx J., Anderson R.N., Menard H.W., Smith S.M. (1975) - Morphology and tectonic evolution of the east central Pacific. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **86**, 111-118.
- Marti J., Hurlimann M., Ablay G.J., Gudmundsson A. (1997) - Vertical and lateral collapses on Tenerife (Canary islands) and other volcanic islands. *Geology*, **25**, 879-882.
- Merle O., Vendeville B. (1995) - Experimental modelling of thin-skinned shortening around magmatic intrusions. *Bull. Volcanol.*, **57**, 33-43.
- ORSTOM (1993) - Atlas de la Polynésie française, ouvrage collectif. Editions de l'ORSTOM, Paris, 112 pl.
- Pouget M., Le Floch E., Kamal S., Salem B. (1988) - Utilisation de données Spot pour la cartographie des ressources renouvelables : application à la région côtière nord-ouest de l'Égypte. In: *Images satellite et milieux terrestres en régions arides et tropicales* (edited by ORSTOM), Paris, 48-63.
- Swain C.J. (1976) - A FORTRAN IV program for interpolating irregularly spaced data using the difference equation for minimum curvature. *Computers and Geosciences*, **1**, 231-240.
- Verwoerd W.J. (1971) - Geology. In: E.M. van Zinderen Bakker, J.M. Winterbottom et R.A. Dyer, Marion and Prince Edward Islands. A.A. Balkema, Cape Town, 40-62.
- Verwoerd W.J., Russel S., Berruti A. (1981) - 1980 volcanic eruption reported on Marion Island. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **54**, 153-156.
- Wilson J.T. (1963) - A possible origin for the Hawaiian islands. *Can. J. Phys.*, **41**, 863-870.