

P9

**MODELISATION BATHYMETRIQUE D'UN LAGON D'ATOLL, APPLICATION A  
LA MODELISATION TRIDIMENSIONNELLE D'UNE ILE ET DE SON LAGON**

**BATHYMETRIC MODELLING OF AN ATOLL LAGOON, APPLICATION TO THE  
THREE DIMENSIONAL REPRESENTATION OF AN ISLAND AND ITS LAGOON**

**S. ANDREFOUET (1), F. CHENON (2), L. LOUBERSAC (3), H. VARET  
(2), B. WIBAUX (3)**

(1) *ESSI Sophia Antipolis FRANCE*

(2) *SMA/SPT Papeete POLYNESIE FRANCAISE*

(3) *IFREMER/SPT Papeete POLYNESIE FRANCAISE*

**RESUME**

*On présente en première partie, une méthode permettant après segmentation d'image d'inverser les formules reliant la bathymétrie d'un lagon à la radiométrie des deux canaux XS1 et XS2 de SPOT et d'en déduire un modèle bathymétrique à maille de 20 m sur les petits fonds (0 à 10 m). Ce modèle est lui-même calé par calculs de régression entre la bathymétrie déduite de la donnée satellite et des mesures effectuées in situ.*

*L'exemple proposé est celui du lagon de l'île d'Aitutaki aux Iles Cook. L'erreur relative du modèle proposé s'établit à 10% et l'on s'attache à discuter des limitations de la méthode.*

*En seconde partie, on présente le mixage du modèle bathymétrique, obtenu par la méthode exposée précédemment, à un modèle numérique de terrain dérivé de la digitalisation des courbes de niveau fournies par le Département of Survey des Iles Cook. On présente la méthode de fabrication du MNT terrestre et de mixage au modèle bathymétrique, et l'on propose une représentation tridimensionnelle de l'ensemble île haute-lagon.*

19 FEV. 1996

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 43072

395

Cote : Δ

ORSTOM Documentation



010003877

Les intérêts de telles modélisations sont développés en conclusion de l'étude.

#### ABSTRACT

The first part of this paper presents a methodology which conducts to the elaboration of a 20m grid bathymetric model of shallow bottoms (0-20 m) deducted from the inversion of the physical laws relying the bathymetry to the radiometry in the two channels XS1 and XS2 of SPOT. The fitting of this bathymetric model is realized thanks to regression computations between the calculated bathymetry and in situ bathymetric observation.

The proposed example is the Aitutaki lagoon (Cook Island). The relative error of the model has been estimated to 10 % and the limitations of the method are discussed.

The second part presents the way to mix the bathymetric model as obtained to a digital terrain model derived from the digitalization of altitude curves from a topographic map. The methodologies used to elaborate the digital terrain model and its association to the bathymetric one are described and a three dimension representation of the island-lagoon environment is proposed.

The conclusion exposes the interest of such digital model making.

#### INTRODUCTION

L'île d'Aitutaki fait partie du Territoire des Iles Cook, à l'ouest de la Polynésie française. Elle est située à 18°52 et 159°48 W et a déjà fait l'objet de plusieurs études scientifiques : (Summerhayes 1971, Stoddart 1975, Dahl A. 1981, Richmond 1986, Lemaire et al. 1987).

Pour le sujet qui nous concerne, on distingue trois études séparées :

- la mise au point d'un modèle bathymétrique à pas de 20m,
- l'établissement du modèle numérique de terrain,
- le couplage des deux modèles terrain et bathymétrique

A chaque fois seront précisées les méthodes théoriques utilisées, les données nécessaires et les résultats obtenus.

## MISE AU POINT D'UN MODELE BATHYMETRIQUE

### Méthodes générales de cartographie bathymétrique par satellite

#### Les données

On distingue deux types de données :

- Les données satellitaires : l'information radiométrique varie en fonction des canaux utilisés et de leur possibilité de pénétration du milieu marin. Ainsi les canaux de longueur d'onde supérieure au rouge sont-ils peu informatifs. Dans le cas des images SPOT, seuls les canaux XS1 (vert-jaune) et XS2 (rouge) apportent une information pertinente le premier pénétrant en eau claire sur une vingtaine de mètres, le second jusqu'à cinq mètres environ.

- Les mesures terrain : ces mesures locales renseignent sur la profondeur et fournissent éventuellement des informations sur le type de fond et certains autres caractères physiques, (turbidité,...).

#### Les méthodes

Les deux types de données évoquées ci-dessus autorisent trois méthodes :

- Une approche physique : une formule relie les paramètres du milieu à la radiométrie mesurée par le satellite et à la profondeur.

Soit dans le canal  $i$ , la relation :

$$(1) \quad \begin{aligned} L_i &= L_{imp} + (0,54 L_{if} - L_{imp}) \exp(-2K_i Z), \\ L_{imp} &= \text{luminance en mer profonde,} \\ L_{if} &= \text{luminance du fond,} \\ K_i &= \text{coefficient d'absorption diffuse,} \\ L_i &= \text{luminance mesurée,} \\ Z &= \text{profondeur.} \end{aligned}$$

Par inversion de cette formule et par connaissance des paramètres physiques on peut tirer la profondeur  $Z$ .

Une approche terrain : la méthode basée sur la connaissance de données terrain ignore les paramètres physiques qu'on considère constants sur une image, le principe est de faire une correspondance entre la radiométrie mesurée par le satellite et la bathymétrie au niveau des points de calage, puis d'étendre à toute l'image la table de correspondance ainsi créée. Cette méthode est utilisée par le SHOM pour l'élaboration de spatiocartes marines (Garlan 1989) grâce à la formule :

$$(2) \quad Z = A \log (XS1-XS1mp) + B \log (XS2-XS2mp) + C$$

Les points de calage permettent d'évaluer A, B et C. Cette méthode est bien adaptée à un fond de nature homogène.

Une approche hybride : cette méthode, mise au point par la SPT : (Loubersac et al. 1989) utilise les paramètres physiques pour classier les fonds en fonction de la réflectance à partir d'une image SPOT. Puis, pour chaque classe, calcule les coefficients d'une équation analogue à l'équation (2) grâce à des mesures in situ.

C'est cette méthode que nous avons retenue pour l'expérience menée sur Aitutaki.

### **Etude de cas : l'île d'Aitutaki**

#### *a) Les données :*

Elles consistent en :

- Une image SPOT, 1B, XS de 20m de résolution, acquise le 23/06/86 et vierge de nuages (cf. planche P9A).

- 58 points de mesures donnant la profondeur et la nature du fond relevés lors d'une campagne du CCOP/SOPAC en 1986. (Richmond 1986).

#### *b) Description détaillée de la méthode :*

De sorte à classier la réflectance : on linéarise l'équation (1) en utilisant les pseudo-canaux :

$$XS1' = \log (XS1 - XS1mp)$$

$$XS2' = \log (XS2 - XS2mp)$$

(Lyzenga, 1981) a en effet montré qu'en dans un repère  $XS_i'$ ,  $XS_j'$  les points caractérisant la radiométrie mesurée s'alignent suivant des droites de pente  $K_i/K_j$  dont l'écartement est fonction de la variation du type de fond.

La figure 1 montre dans le repère  $XS_1$ ,  $XS_2$  l'ordonnement des valeurs radiométriques en fonction de la profondeur et du type de fond.

Donc, par rotation d'axes arctg ( $K_i/K_j$ ) on peut définir deux nouveaux axes YZ et YF, dont les expressions en fonction de  $XS_i'$  et  $XS_j'$  seront indépendantes de la profondeur (pour YF) et du type de fond (pour YZ). L'histogramme de YF permet de segmenter l'image en trois classes en fonction des modes de l'histogramme. Une quatrième classe est attribuée pour les zones de profondeur supérieure à 5 mètres où  $XS_2$  n'est plus informatif.

- L'étape suivante de la méthode consiste à utiliser des points de calage pour trois opérations.

### 1. L'évaluation du rapport $K_i/K_j$ :

On connaît au niveau de points d'appuis  $Z$ ,  $XS1'$ ,  $XS2'$  leurs coordonnées planimétriques et la nature du fond. De (1), on déduit :

$$(2) K_i = (XS1' (Z)) - XS1' (Z') / 2 (Z-Z')$$

De même pour  $K_j$ .

Une moyenne effectuée sur tous les points utilisés pour le calage donne un rapport :

$$\frac{KXS1}{KXS2} = 0,4 \text{ soit une rotation d'axe de } 13^\circ,49.$$

### 2. Le calage du modèle :

L'équation linéaire de  $YZ$  en fonction de  $XS1'$  et  $XS2'$  permet de définir les équations suivantes :

$Z = B_a + C_a YZ$  ( $a=1..3$ ) pour les 3 premières classes issues de la segmentation,

et  $Z = B_4 + C_4 XS1'$  pour la classe donnée par  $XS1'$  seul.

Les points de mesure donnent  $B_a$  et  $C_a$ .

Les bathymétries obtenues pour chaque classe sont recomposées pour obtenir la bathymétrie finale sans discontinuité entre chaque zone. (cf. planche P9B).

### 3. La validation du modèle

Pour 53 points d'appui dont la réponse spectrale est sans ambiguïté on obtient un coefficient de corrélation entre  $Z$  (vraie) et  $Z$  (sat) de 0,94 soit :

$$(3) z(\text{vraie}) = 0,995 Z(\text{sat}) + 0,24$$

#### c) Résultat

Le lagon d'Aitutaki doit être considéré comme un cas favorable en raison de la clarté de ses eaux et sa faible profondeur, toutefois il est à noter la variabilité spectrale assez importante de la nature des fonds.

Le modèle pourrait être amélioré en affinant la classification des réflectances en fonction du type de fond. (Utilisation du canal P, analyse plus fine de l'histogramme).

Les points de calage utilisés doivent également être purs d'un point de vue radiométrique. Le pixel correspondant recouvrant 400 m<sup>2</sup> ne doit pas être à cheval entre 2 zones de

profondeur très différente ou de type de fond différent. La bathymétrie obtenue par la méthode est sous-évaluée ce qui va dans le sens des résultats acquis par d'autres méthodes (Garlan 1990).

## ETABLISSEMENT DE MODELES NUMERIQUES DE TERRAIN

### Méthodes générales de génération de MNT

Un MNT est défini comme un fichier d'altitude connue aux noeuds d'une grille régulière (image raster du relief). On peut le calculer à partir de deux sources de données :

#### a) *Utilisation des couples stéréoscopiques :*

Deux images SPOT prises avec des angles de vue différents sur la même zone permettent d'établir une correspondance point par point sur chaque image, puis en calant le modèle grâce à des points d'appui provenant d'une carte, on établit l'altitude en chaque point.

#### b) *Utilisation de cartes topographiques :*

Plusieurs étapes sont nécessaires :

- la numérisation des courbes de niveau présentes sur la carte,
- la saisie des points remarquables et lignes caractéristiques,
- le lissage des courbes obtenues,
- l'interpolation et la création des courbes de niveau intermédiaires,
- la validation et les corrections.

La dernière étape dépend largement de la méthode d'interpolation retenue ainsi que des critères de qualité voulue.

La méthode que nous avons choisie pour calculer le MNT de l'île d'Aitutaki est celle qu'utilise le logiciel OROLOG. (Depraetere 1990).

### **Etude de cas : l'île d'Aitutaki**

#### a) *Les données :*

Les courbes de niveau ont été numérisées en partant d'une carte UTM au 1/17 500 fournis par le Département of Survey des îles Cook. Le trait de côte de certains îlots et le contour du récif extérieur ont été saisis sur une carte au 1/25 000 (cf. planche P9C).

On dispose des courbes de 0 à 120 mètres d'altitude avec un pas de 10 m, soit environ 22 000 points numérisés.

Cette oscillation peut être évaluée quantitativement (Depraetere 1990).

## Résultats

Un premier MNT calculé en contraignant la validation des calculs d'altitude sur 4 axes ne peut être retenu. ce nombre d'axe est trop sévère puisque des points de la grille du MNT ne sont pas validés, par contre le trait de côte est extrait automatiquement. Pour Aitutaki, on fixe finalement le nombre d'axe minimal à 3 puis on élimine les valeurs parasites situées dans le lagon grâce à un masque sur la zone non terrestre élaboré à partir du MNT calculé avec 4 axes.

Enfin, une série de tests sur les valeurs des pondérations permettent d'approcher au mieux un MNT au pas de 20 m dont les oscillations autour des altitudes 0, 10, 20.. 120 m sont atténuées, et qui lisse les marches d'escaliers notamment dans la zone de faible pente au Sud de l'île, (cf. planche P9D).

## **COUPLAGE DES DEUX MODELES MNT-BATHYMETRIE**

### *a) Les données :*

Les deux modèles sont au pas de 20 m en projection MTU. L'image XS de départ est en niveau 1B, mais elle est recalée géométriquement pour utiliser les points d'appui du CCOP/SOPAC

### *b) Le couplage :*

Il s'agit en fait de calculer une image par rapport à une autre, c'est à dire effectuer une correction géométrique de niveau S, Douze points d'amers situés sur le trait de côte et parfaitement identifiables sur les deux images permettent le calcul de deux polynômes de déformation 2D. L'image référée et l'image de référence sont alors superposées pour obtenir le produit final. Cf. planche P9E pour lequel l'exagération verticale de la bathymétrie par rapport aux altitudes est de 10 et planche P9F pour une vue de détail.

## **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

Le présent article a cherché à montrer que le couplage entre un modèle de terrain issu de la numérisation de courbes de niveau d'une carte et un modèle bathymétrique issu des données satellite et de données de terrain est possible. Chaque modèle fait appel à des méthodes qui ont leurs propres limitations :

## b) Méthode de calcul :

OROLOG utilise une méthode vectorielle, qui conserve la structure intrinsèque du terrain en travaillant sur les courbes plutôt que sur un nuage de points répartis aléatoirement.

Pour chaque point de la grille du MNT, on recherche tout d'abord l'intersection entre un système de quatre axes (N-S, E-O, NO-SE, NE-SO), dont l'origine est le point considéré, et l'ensemble des courbes de niveau. Sur chaque axe, un calcul d'interpolation est lancé : si le nombre d'intersections est suffisant, une courbe composée de splines cubiques est approchée à partir des points d'intersection dont les altitudes sont connues. Il y a donc une interpolation par axe et 4 axes possibles par point de la grille du MNT soit 4 valeurs d'altitudes. Si une des interpolations est impossible (nombre d'intersection insuffisant pour obtenir un polynôme de degré 3) la valeur d'altitude sur l'axe n'est pas définie. Chaque point de la grille du MNT a donc 0, 1, 2, 3 ou 4 valeurs. Ces résultats sont moyennés pour obtenir l'altitude finale qui sera affectée au MNT. Si une contrainte sur le nombre d'axe minimal existe, cette altitude finale peut ne pas exister.

La complexité du calcul de moyenne entre les altitudes sur chaque axe est fonction de la pondération  $P_i$  affectée à chacune des altitudes  $Z_i$  :

$$A = \sum_{i=1}^4 P_i Z_i$$

Les critères de pondérations sont  $P_i$  dépendent de :

- L'étagement, c'est à dire la différence d'altitude entre les 4 courbes de niveau encadrantes.
- La distance horizontale entre les 2 courbes de niveau les plus proches.

En conséquence, des pondérations dans les directions verticales et horizontales sont appliquées. L'influence apparaît sur le MNT dont la qualité est évaluée en fonction de 3 critères principaux :

- résolution du MNT : en vue du couplage avec la bathymétrie, un pas de 20 m est nécessaire,

- continuité des surfaces du MNT : une étude qualitative montre que le MNT brut, sans lissage, présente des "marches d'escalier" notamment dans les zones où les courbes de niveau sont espacées et parallèles,

- oscillation du MNT : l'histogramme du MNT brut présente des modes centrés sur les altitudes correspondant aux valeurs des altitudes des courbes de niveau numérisées, ce qui est anormal. Ces valeurs d'altitude n'ont pas à être prépondérantes sur le MNT, il faut donc atténuer ces modes.

- Limitation en précision relative : tranches d'eau limitées aux premiers vingt mètres, problème des pixels non purs pour le modèle bathymétrique,

- Artéfacts dûs aux oscillations sur l'histogramme des altitudes et aux marches d'escalier pour les zones pauvres en données fiables dans le cas du Modèle Numérique de Terrain....

Les applications classiques de l'information dérivée de chaque modèle sont conservées : aide à la navigation, études des ressources marines pour le modèle bathymétrique, hydrologie, risque naturels, aménagement urbain ou agricole pour le modèle numérique terrestre.

Néanmoins, le couplage réalisé et la représentation tridimensionnelle qui en résulte trouve tout son intérêt dans l'étude des milieux insulaires du Pacifique Sud où il est difficile dans toute approche intégrée de ne pas tenir compte des interactions entre les milieux terrestres et lagunaires.

On pense notamment aux relations entre les occupations des bassins versants et leurs impacts sur le milieu côtier récepteur à l'aval, de même qu'à l'intégration et la manipulation des données au sein de systèmes d'information géographique gérant à la fois les occupations des domaines publics terrestres et maritimes indissociables dans le contexte insulaire propre aux petites îles du Pacifique.

#### REFERENCES

DAHL A.L., 1981. Report on marine surveys of Rarotonga and Aitutaki, nov. 1976. *South Pacific Commission, Nouméa, 13 p.*

DEPRAETERE C., 1990. Notes OVNIH du laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM vol. 4 : Lamont, vol. 5 : Topolog, vol. 6 : Orolog. *Méthodes et guide utilisateur des logiciels. ORSTOM, Montpellier.*

GARLAN T., 1989. Cartographie spatiale du littoral corallien : topographie et bathymétrie. *Rapport final de PEPS n° 203. EPSHOM réf. 00689 24 p. 3 annexes.*

JUPP D.L.B., S.S. HEGGEN, K.K.MAYO, S.W. KENDALL, J.R. BOLTON, B.A. HARISSON, 1985. *The Brian Handbook. CSIRO Division of water land resources. Natural resources series number 3.*

LEMAIRE O., L. LOUBERSAC, L. D'OZOUVILLE, B. RICHMOND., 1987. Evaluation de l'apport de SPOT dans le cadre du programme de prospection des ressources minérales de l'atoll d'Aitutaki (Iles Cook). *Etude préliminaire de l'impact du passage du cyclone Sally. SPOT 1, utilisation des images, bilan et résultats. Paris nov. 1987. CNES pp. 1095/1103.*

LOUBERSAC L., P.Y. BURBAN, O. LEMAIRE, F. CHENON, H. VARET. 1989. Nature des fonds et bathymétrie du lagon de l'atoll d'Aitutaki (Iles Cook) d'après des données SPOT 1. *Photo Interprétation* 89-5 et 6, 29/39 pp.

LYZENGA D.R., 1981. Remote Sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 2. 71-82 pp.

PROY C., 1986. Intégration du relief aux traitements d'images de télédétection. *Thèse de Docteur Ingénieur*.

RICHMOND B., J.R. HEIN, 1986. Lagoonal drilling at Aitutaki, Cook Islands 5 May-1 July 1986. *Field report n°1 CCOP/SOPAC Fiji, UNDP Project Ras/81/102*. 22 pp.

STODDART D.R., P.E. GIBBS, 1975. Almost-atoll of Aitutaki, reef studies in the Cook Island, South Pacific Atoll Res. *Bull.* 190 : 1-158.

SUMMERHAYES C.P. 1971. Lagoonal sedimentation at Aitutaki and Manuae in the Cook Islands : a reconnaissance survey N.Z. *J. Geol. Geophys.* 14 : 351-363.

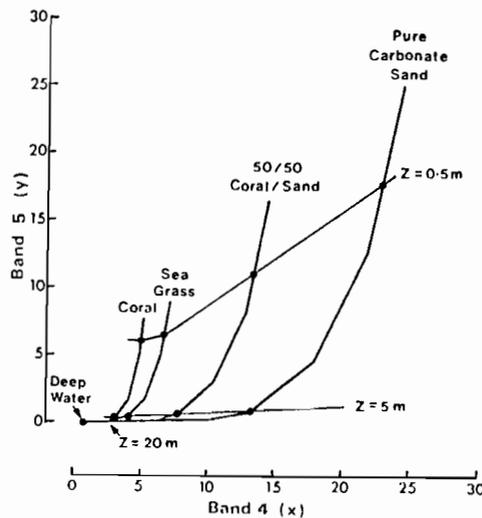
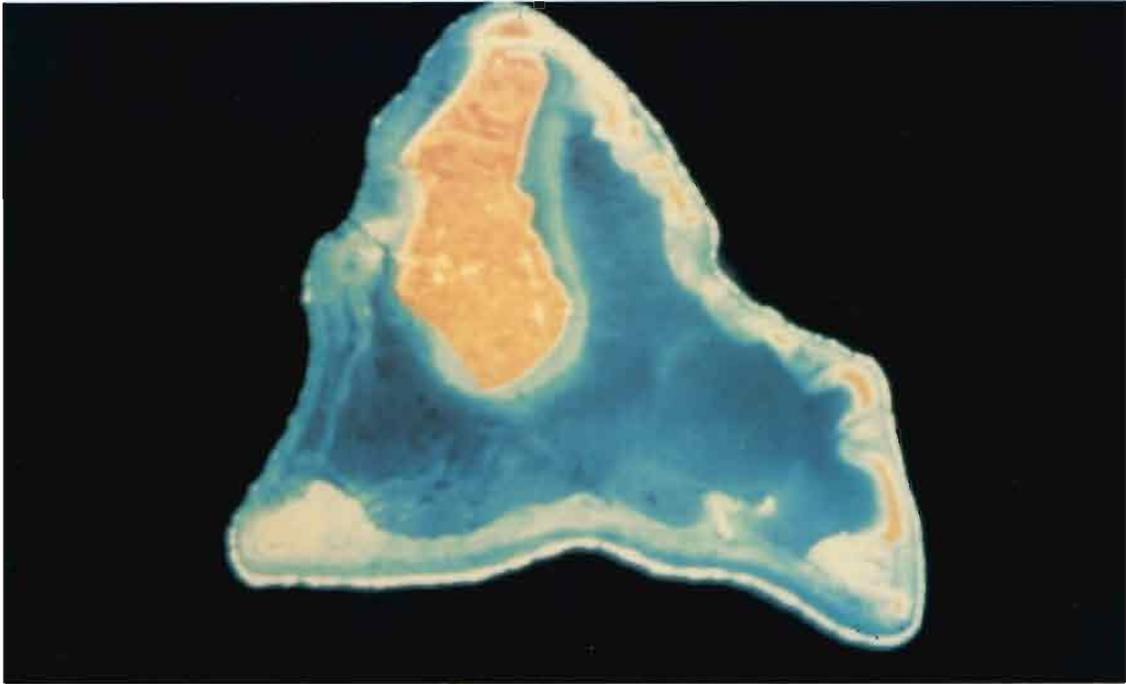
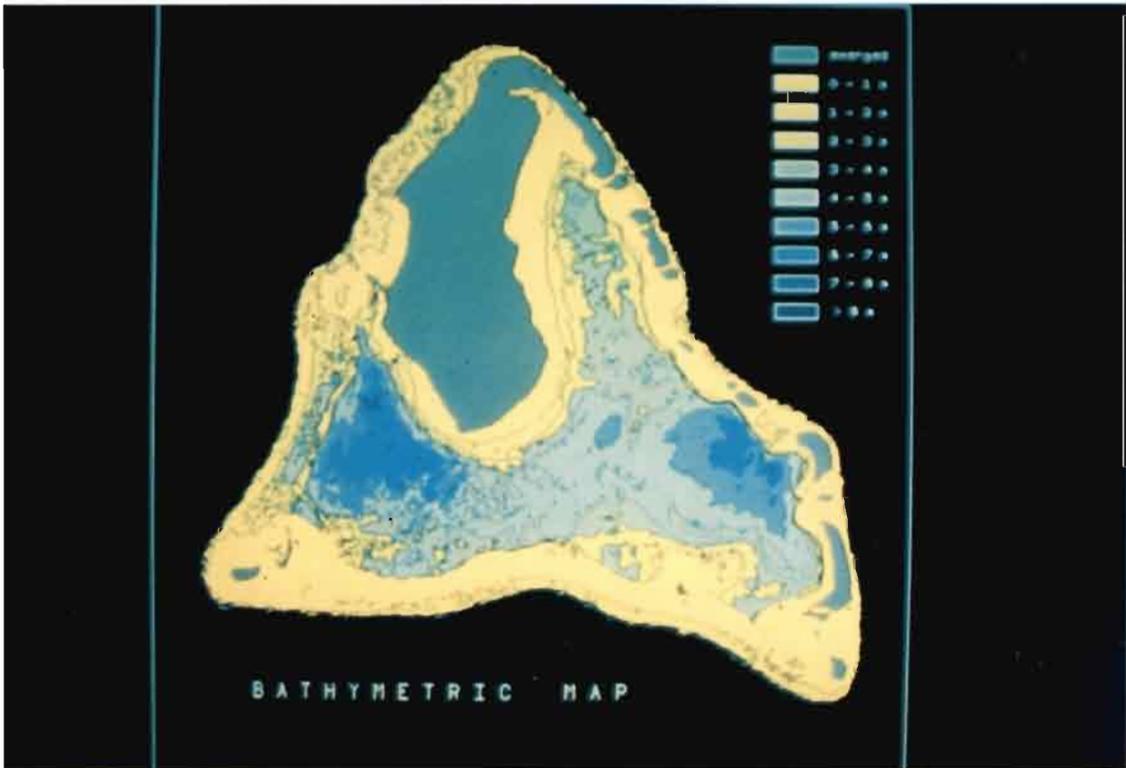


Figure 1 : Comportement radiométrique de quatre types de fonds en fonction de la bathymétrie pour les canaux MSS4 et 5 de LANDSAT équivalents aux canaux XS1 et XS2 de SPOT (Jupp et al., 1985).

P9

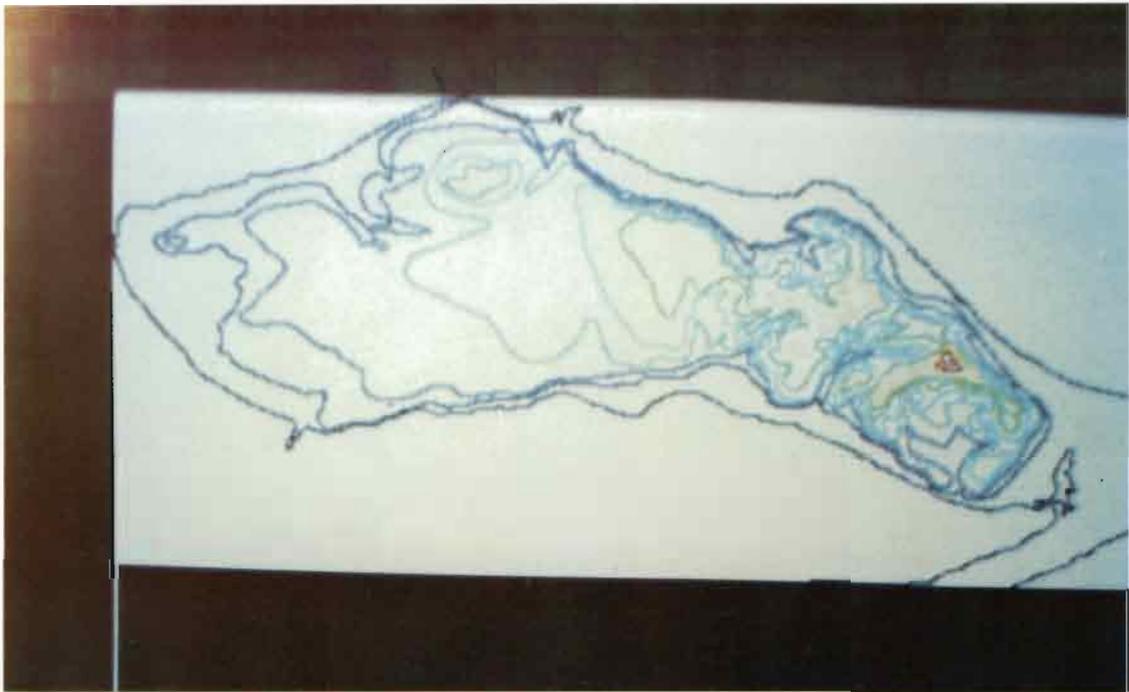


P9A : Aitutaki (Iles Cook) images SPOT 1B XS du 23/6/86, C CNES 86/dist SPOT IMAGE.

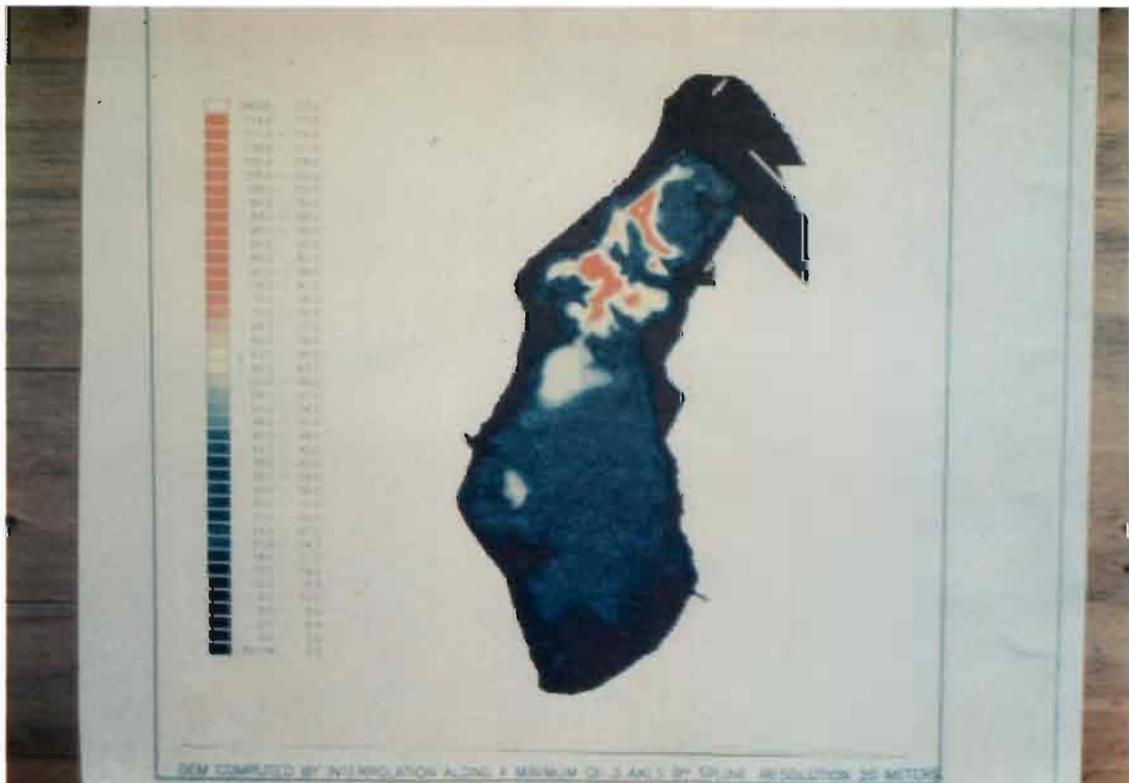


P9B : Modèle bathymétrique (2D) issu de l'exploitation des données SPOT et de l'entrée de mesures in situ.

P9



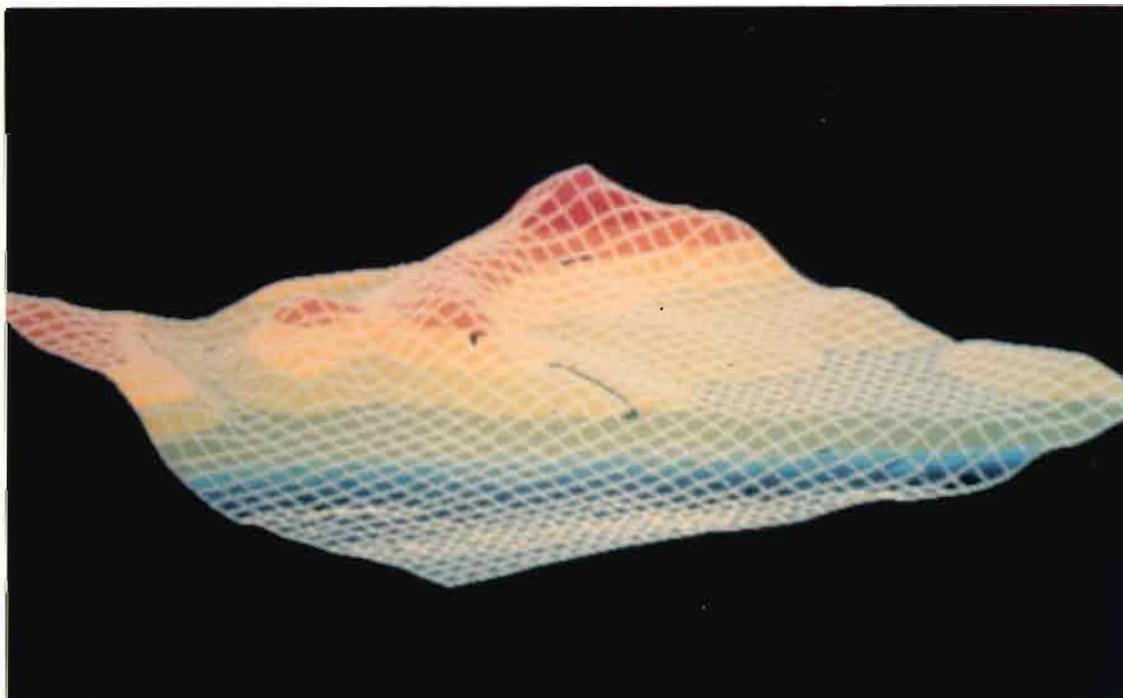
P9C : Courbes de niveau numérisées sur Aitutaki.



P9D : Vue 2D du MNT final au pas de 20m.



P9E : Vue 3D du mixage du modèle numérique de terrain et du modèle bathymétrique.



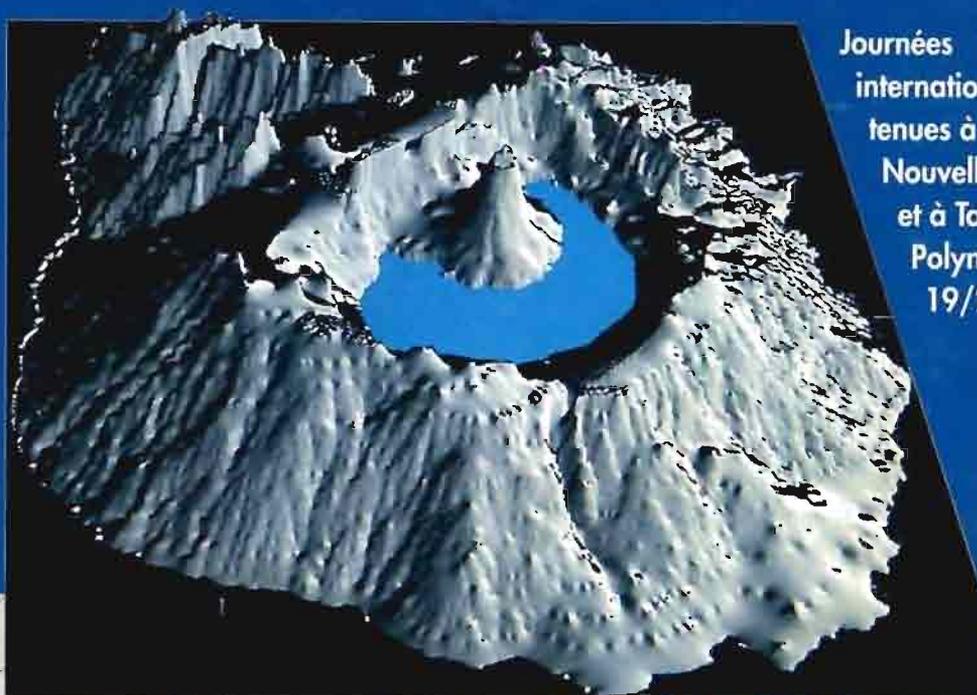
P9F : Vue 3D de détail du couplage des deux modèles. Partie centre Est de l'île d'Aitutaki.

# "PIX'ILES 90"

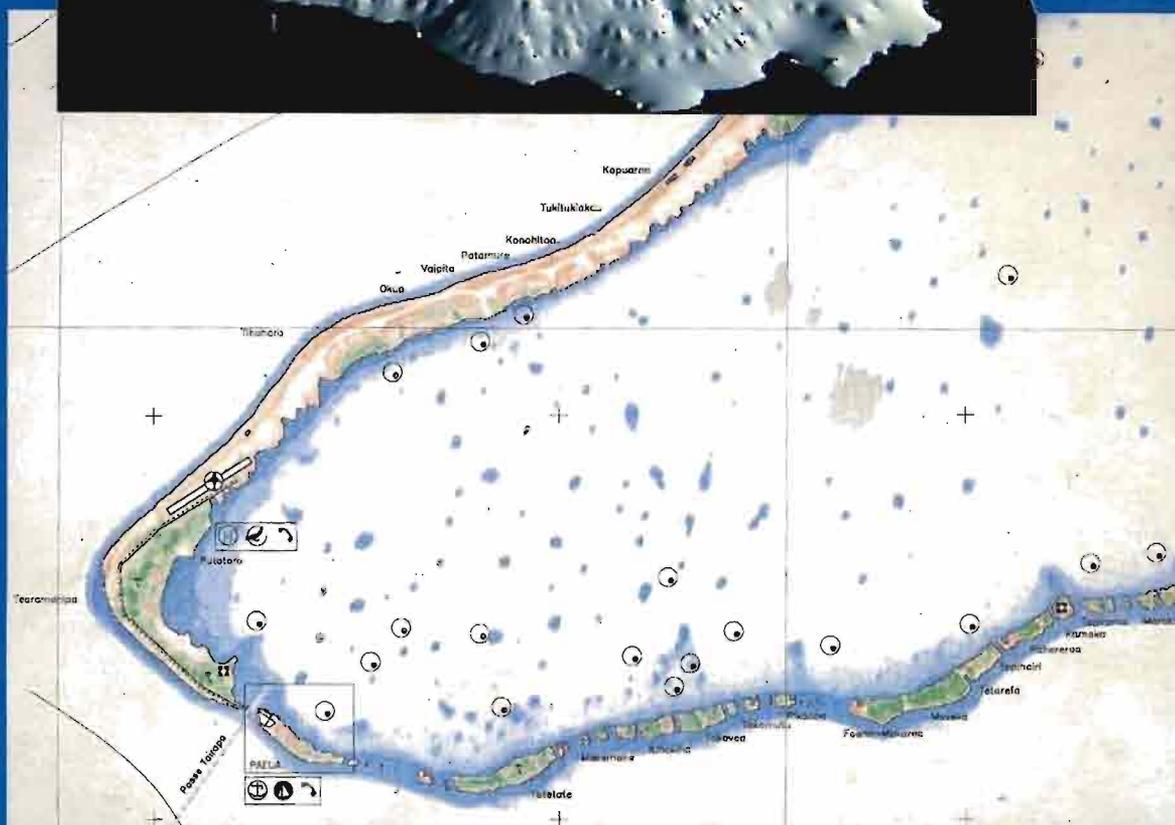
TELEDETECTION ET MILIEUX INSULAIRES DU PACIFIQUE : APPROCHES INTEGRES

REMOTE SENSING AND INSULAR ENVIRONMENTS IN THE PACIFIC :  
INTEGRATED APPROACHES

International  
workshop  
held at Noumea  
New Caledonia  
and Tahiti  
French Polynesia  
Nov. 19/24 1990



Journées  
internationales  
tenues à Nouméa  
Nouvelle-Calédonie  
et à Tahiti  
Polynésie Française  
19/24 nov. 1990



ORSTOM



TERRITOIRE DE  
POLYNÉSIE FRANÇAISE

# "PIX'ILES 90"

**Journées internationales tenues à Nouméa - Nouvelle-Calédonie  
et à Tahiti - Polynésie Française  
19 / 24 novembre 1990**

**International workshop held at Noumea - New Caledonia  
and Tahiti French - Polynesia  
November 19 / 24 1990**



© ORSTOM, Nouméa, 1992

Imprimé par le Centre ORSTOM  
de Nouméa  
Septembre 1992

