

P12

PRODUCTION EN MILIEU URBAIN D'UNE IMAGE AMELIOREE, RECTIFIEE
ET RESTITUEE EN COULEURS NATURELLES : METHODE SIMPLE DE
TRAITEMENT SUR MICROSYSTEME DE DONNEES SPOT PANCHROMATIQUE ET
MULTISPECTRALE. VILLE D'AUCKLAND (NOUVELLE-ZELANDE) ET
LOGICIEL MULTISCOPE

PRODUCTION OVER URBAN ENVIRONMENT OF A RECTIFIED AND ENHANCED
NATURAL COLOR IMAGE : A SIMPLE METHODOLOGY FOR PROCESSING SPOT
PANCHROMATIC AND MULTISPECTRAL DATA ON MICROCOMPUTER. AUCKLAND
TOWN (NEW ZEALAND) MULTISCOPE SOFTWARE

D. LASSELIN (1), G. R. COCHRANE (2)

(1) Groupement pour le Développement de la Télédétection
Aérospatiale, 18 avenue Edouard Belin 31055 Toulouse CEDEX
FRANCE

(2) Department of Geography, University of AUCKLAND, Private
Bag Auckland NEW ZEALAND

RESUME

Le but de ce travail est de mettre au point un algorithme simple et standard, permettant d'obtenir un document photographique grand public en couleurs naturelles sur une zone urbaine, en essayant de tirer le meilleur avantage des images satellitaires à haute résolution, en particulier celles de SPOT. Le document final est repéré dans un référentiel cartographique, donc superposable à une carte aux erreurs dues à la précision des transformations géométriques ainsi que celles dues au relief près. Notre méthode a été mise au point sur un couple d'images SPOT Panchro et XS sur la ville d'Auckland (Nouvelle-Zélande). Tous les traitements ont été

19 FEV. 1996

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire 425

N° : 43075

Cote : A

ORSTOM Documentation



010003880

réalisés sur micro-système de traitement d'images équipé du logiciel MULTISCOPE.

Les traitements regroupent des opérations de type corrections géométriques, transformations $(R,V,B) \leftrightarrow (I,T,S)$, rééchantillonnage et rehaussement. La priorité a été donnée à l'amélioration de l'image, tant géométrique que radiométrique, en vue d'une meilleure discrimination locale.

Les outils de traitement employés ont été volontairement choisis les plus classiques possibles, et sont maintenant disponibles sur presque tout micro-système de traitement d'images. De plus, cette méthode a l'avantage d'être reductible, intégralement ou partiellement selon les objectifs fixés, sur toute image, sans avoir de connaissance a priori du terrain.

Enfin, le document final, même s'il constitue un résultat par lui-même, peut être le point de départ de bien des applications (cartographie, photo-interprétation, aménagement, préparation de sortie terrain...)

ABSTRACT

This work aims at finalizing a simple and standard algorithm that enables to obtain a photographic document in natural colours over an urban zone which would be intended to the public, while trying to get the best out of the high resolution satellite images, particularly the SPOT ones. The final document is staked out in a cartographic system of reference, and therefore, it can be superposed on a map showing errors caused by the accuracy of the geometric transformations and those due to the closeness of the relief. Our method has been finalized on a couple of Panchro and XS SPOT images over the town of Auckland (New Zealand). All the processings were made on an image processing microcomputer fitted out with the MULTISCOPE software.

The processings comprise operations of geometric correction, transformation $(R, V, B) \leftrightarrow (I, T, S)$, re-sampling and heightening. Priority is granted to the improvement of the image, both geometric and radiometric, with a view to a better local discrimination.

The processing tools used were intentionally selected as conventional as possible, and are now available in almost any image processing microcomputer. Moreover, this method has the advantage of being renewable, wether integrally or partly according to the chosen objectives, on any image without knowing the ground a priori.

At last, the final document, although it does not constitute a result itself, may be the starting point for many applications (cartography, photo-interpreting, land planning, preparation of ground outlings...).

INTRODUCTION

L'apparition des nouveaux capteurs haute résolution (HRV de SPOT en particulier) et surtout les progrès enregistrés ces 10 dernières années dans le matériel informatique ont entraîné le développement de logiciels de traitement d'images sur micro-ordinateurs, en particulier dans la gamme des compatibles IBM sous MS-DOS.

Ces logiciels progressent constamment et rapidement, à la fois dans leurs fonctionnalités et leur ergonomie. Mais ces outils, pour être utilisés pleinement, doivent maintenant mettre à la disposition des utilisateurs de la télédétection - qui sont avant toute chose des thématiciens- des méthodes simples, à leur portée et qu'ils soient capables de mettre en oeuvre eux-mêmes sur ces micro-systèmes auxquels ils ont maintenant de plus en plus accès.

Un des problèmes qui se posent à l'urbaniste ou l'aménageur (qui travaillent sur des éléments de taille comparable à la résolution des capteurs civils les plus évolués) est de tirer le meilleur parti des images satellitaires à haute résolution. Le document final recherché sera amélioré et superposable à une carte topographique à grande échelle. Ces images, contrairement aux photographies aériennes et même si elles ne les remplacent pas, lui offrent en effet un nouveau regard sur une agglomération urbaine dans son ensemble.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET CHOIX DES DONNEES-IMAGES

L'agglomération choisie est celle d'Auckland en Nouvelle-Zélande, qui présente une grande diversité de milieux :

- urbain dense avec de nombreux immeubles dans le centre ville,
- zone portuaire près du centre-ville,
- urbain pavillonnaire constituant la majorité des quartiers résidentiels,
- zone aéroportuaire au sud
- nombreuses zones industrielles,
- zones vertes urbaines (parcs, équipements sportifs en tous genres : golfs, terrains de sport, hippodrome...)
- bois et forêts essentiellement au sud-ouest de la ville,
- nombreuses zones de pâturages et vignobles au sud-est,
- mer, hauts fonds sableux et chenaux.

Par contre, il n'y a pas ou peu de cultures.

Pour parvenir à notre but, il était indispensable de disposer d'une image SPOT Panchromatique. En effet, sa résolution de 10m est la plus fine de tous les satellites civils et donc la mieux adaptée à l'étude du milieu urbain.

Mais pour compléter cette information monospectrale (un seul canal), il fallait allier à la haute résolution spatiale une diversité spectrale permettant de distinguer les différents éléments et d'élaborer un document en couleurs. Ceci a été obtenu avec une image SPOT multispectrale (3 canaux et 20m de résolution).

Il aurait également été possible de combiner une image Landsat TM (6 bandes spectrales à 30m de résolution) à l'image SPOT Panchromatique. Ce cas peut être envisagé et ne change en rien l'enchaînement des traitements qui suivent.

En outre, nous nous sommes rapprochés le plus possible d'un cas d'étude quelconque où :

- Pour des raisons financières (crédits insuffisants pour acheter des images SPOT de niveau 2 directement superposables à la carte topographique et donc entre elles), nous avons utilisé 2 images prétraitées au niveau 1B, donc non superposables à la carte topographique, ni entre elles.

- Pour des raisons techniques et météorologiques, les images P+XS (même date de prise de vue pour les 2 images) ne sont pas toujours disponibles à une date voulue. La date de prise de vue de l'image XS dont nous disposons est postérieure de 9 mois 1/2 à celle de l'image Panchro. Ceci représente un cas extrême, d'autant qu'il existe des images P+XS sur Auckland.

Nous disposons donc des images SPOT suivantes :

- K/J 440/424, instrument HRV2, mode Panchromatique du 14-08-87,
- K/J 440/424, instrument HRV1, mode XS du 31-05-88.

Nous possédons en outre comme références cartographiques les cartes topographiques suivantes:

- NZMS 262 sheet 3, Auckland, scale 1:250 000, Edition 1, 1983,
- NZMS 260 Sheet R11 Auckland, scale 1:50 000, Edition 1, 1981 couvrant presque l'intégralité de la zone traitée,
- NZMS 271, street map of Auckland, scale 1:20000, Edition 3, 1984 et ne couvrant que la partie centrale de notre zone d'étude.

Le système de traitement d'images à notre disposition est un micro-ordinateur compatible IBM PC-AT, 386 portable, avec disque dur de 110 Mo, équipé d'une carte graphique Number Nine 512*512 pixels et d'un moniteur de visualisation. Il est connecté à un dérouleur de bandes. Tous les traitements ont été réalisés avec le logiciel MULTISCOPE, version 1.31 implanté sur ce système.

Le premier travail a consisté à délimiter la zone d'étude et à extraire les sous-images correspondantes. Nous avons retenu une zone de 35*37 km (sous-image de 3500 lignes*3700 colonnes) sur l'image Panchromatique et avons ensuite extrait

une fenêtre de l'image XS couvrant totalement la zone précédente (40*42km soit 2 000 lignes*2 100 colonnes). Il n'a pas été possible de traiter la scène entière pour des raisons de capacité de disque dur.

Voir la localisation sur l'extrait de carte au 1/250 000 fig. 1.

SUPERPOSITION GEOMETRIQUE DES 2 IMAGES

Méthodologie générale adoptée

Plutôt que de superposer directement chacune des 2 images à la carte topographique (ce qui nécessite 2 transformations géométriques en "parallèle"), nous avons préféré effectuer les 2 corrections en "série" :

- Corriger l'image XS par rapport à l'image Panchro dans un premier temps, la ramenant donc à 10m de résolution.

- Combiner ensuite radiométriquement les 2 images (cf. chapitre 4) avant de corriger l'image résultante par rapport à la carte topographique.

Ce choix a été déterminé une fois de plus par la capacité du disque dur. En effet, nous avons choisi de ré-échantillonner l'image lors de la correction géométrique par rapport à la carte. Cette transformation augmente considérablement le volume des données (cf. Superposition Cartographique et Rééchantillonnage) et nous a donc conduit à effectuer cette opération après la combinaison radiométrique. La précision cartographique de l'image finale ne s'en trouve pas affectée.

Principe des corrections géométriques

Notre logiciel permet d'effectuer des transformations de type polynômial de degré n quelconque dont le principe et les différentes étapes sont les suivantes :

. *Choix de l'image à corriger et de l'image de référence.* Celle-ci peut être une carte topographique, ce qui est le cas dans la seconde transformation (cf. Superposition Cartographique et Rééchantillonnage).

. *Choix de points d'appui.* Détermination des coordonnées (X0,Y0) dans l'image à corriger et (X0',Y0') dans l'image de référence d'un certain nombre de points homologues bien répartis dans l'image. Ces points d'appui sont identifiés de façon interactive à l'écran et/ou sur la carte. Ex : carrefour, pont, etc. Leurs coordonnées sont mesurées :

- au curseur sur l'écran dans un référentiel (colonnes, lignes) pour les images,
- sur table à digitaliser ou plus simplement à la règle s'il s'agit d'une carte topographique.

. Choix du degré n du système polynômial (n entier non nul) et calcul du modèle direct de transformation. Ce modèle polynômial de transformation s'exprime sous la forme :

$$\Gamma X' = a_{n,0} X^n + a_{n-1,1} X^{n-1}Y + \dots + a_{i,j} X^i Y^j + \dots + a_{1,1} XY + a_{1,0} X + a_{0,1} Y + a_{0,0}$$

π

$$\Sigma Y' = b_{n,0} X^n + b_{n-1,1} X^{n-1}Y + \dots + b_{i,j} X^i Y^j + \dots + b_{1,1} XY + b_{1,0} X + b_{0,1} Y + b_{0,0} \quad \text{où :}$$

- i et j sont des entiers tels que $0 \leq i+j \leq n$,
- les coefficients $a_{i,j}$ et $b_{i,j}$ sont réels
- (X', Y') représentent les coordonnées d'un point de l'image de référence en fonction de (X, Y) à corriger. C'est donc le modèle direct de transformation, permettant de passer de l'image brute à l'image corrigée.

Pour exemple, dans le cas où $n=1$, l'expression se simplifie comme suit :

$$\Gamma X' = a_{1,0} X + a_{0,1} Y + a_{0,0}$$

π

$$\Sigma Y' = b_{1,0} X + b_{0,1} Y + b_{0,0}$$

Ce système d'équations de degré n possède $(n+1)(n+2)$ inconnues qui sont les coefficients $a_{i,j}$ et $b_{i,j}$. Un point d'appui apporte une solution particulière de ce système en X et en Y . Théoriquement, pour résoudre ce système de façon exacte, il nous faut un nombre de couples de points homologues égal à $(n+1)(n+2)/2$, ce qui nous donne : 3 points pour des corrections de degré 1, 6 points pour un degré 2 et 10 points pour un degré 3...

Mais ce nombre constitue un strict minimum théorique. Les points d'appui sont en effet pointés avec une certaine incertitude : coordonnées curseur entières et correspondant au pixel le plus proche. De plus, des erreurs de pointé peuvent également survenir. Un nombre de points d'appui plus important est donc nécessaire et le logiciel utilise la méthode des moindres carrés pour déterminer les inconnues. Cette méthode consiste à répartir les erreurs de pointé sur tous les points, en essayant d'ajuster au mieux l'image à corriger sur l'image de référence. Ceci se fait en minimisant la somme des carrés des distances entre les points d'appui (X_0', Y_0') effectivement pointés sur l'image de référence (position théorique) et leurs positions réelles dans l'image corrigée calculée par le modèle. L'on considère en pratique qu'il faut un nombre de points d'appui au minimum double de celui précédemment défini.

Une transformation de degré 1, la plus simple, est une transformation affinée. Elle peut se décomposer en 3 opérations élémentaires qui sont : rotation, translation et facteurs d'échelle (en X et en Y). Une telle transformation s'avère souvent suffisante pour superposer 2 images entre elles, en particulier pour les images SPOT qui possèdent, de part leur formation, une très bonne qualité géométrique.

Les transformations de degré supérieur permettent de corriger des distorsions plus complexes et donc de minimiser les résidus. Mais ceci peut s'avérer être un piège dans le cas où par exemple, un point d'appui est mal pointé sur l'une des images. Le modèle cherche alors à déformer l'image pour faire correspondre au mieux tous les points d'appui, y compris ce point. Ceci nous donne en sortie une image corrigée complètement déformée pour un degré n important ($n \geq 3$). Par contre, avec les transformations simples du 1er degré, le point incriminé présentera de forts résidus et sera donc supprimé ou repointé.

La détermination du degré adéquat à employer n'est donc pas toujours aisée. La démarche que nous avons suivie pour les 2 corrections géométriques est la suivante :

- calcul d'un modèle du 1er degré,
- examen des résidus sur les points d'appui (calculés et édités par le logiciel,)
- élimination des points présentant des résidus trop importants (supérieurs à 2 pixels par exemple),
- itération jusqu'à obtention de résidus satisfaisants sur tous les points : recalcul d'un nouveau modèle...
- enfin calcul éventuel d'un modèle de degré supérieur si le nombre de points d'appui restant est suffisant et si cela s'avère nécessaire.

L'examen des résidus peut donc nous amener à redéterminer les coordonnées de certains points d'appui, ou à en déterminer de nouveaux.

. Création de l'image corrigée superposable à l'image de référence.

Le modèle direct finalement validé permet de connaître la position dans l'image corrigée d'un point de l'image brute. Mais pour corriger des plans-images, le logiciel calcule en fait le modèle inverse du modèle validé. Ce modèle est lui aussi un modèle polynômial de degré n. Il exprime pour un point donné (X',Y') de l'image corrigée, les coordonnées (X,Y) du point homologue dans l'image brute dont il faut aller chercher la radiométrie pour l'appliquer au point (X',Y'). Ces coordonnées ne sont évidemment pas des entiers, et il faut donc interpoler la radiométrie cherchée.

Le logiciel part donc en fait d'une image corrigée "vide", à la même résolution que l'image de référence (grille de points dont la radiométrie est nulle). Pixel par pixel, il calcule les radiométries de chaque point de l'image corrigée par interpolation.

L'interpolation choisie pour ces calculs est de type bicubique, c'est à dire interpolation sur les valeurs des 16 pixels du voisinage.

Ce type d'interpolation est plus précis mais aussi plus long au niveau du calcul que les autres interpolations proposées par le logiciel, à savoir :

- Approximation du plus proche voisin consistant à prendre la radiométrie du pixel le plus proche.
- Interpolation bilinéaire sur les 4 pixels environnants.

Le premier traitement objet de ce chapitre a donc consisté à superposer les images entre elles et donc de ramener l'image XS (20m de résolution) superposable à l'image Panchro (10m de résolution et donc prise comme référence).

Détermination des amers

Prise de points d'appui sur l'image XS

Les points d'appui ont été d'abord choisis sur l'image XS à corriger sur laquelle ils sont censés être plus difficiles à identifier. Nous avons pris pour contrainte qu'ils soient également identifiables sur la carte, ceci afin de reprendre ces mêmes points lors de la seconde correction visant à amener l'image en superposition à la carte.

Une soixantaine de points ont été choisis, ce qui est beaucoup plus que le minimum requis pour entreprendre ce type de corrections.

Nous ne pouvions cependant prévoir à priori que :

- Une transformation de degré 1 suffirait.
- Tous les points ou presque seraient identifiables sur l'image de référence Panchro, malgré le changement de date (plus de 9 mois entre les 2 prises de vue).

De plus et comme nous l'avons dit précédemment, il est préférable de disposer d'un nombre de points d'appui environ double par rapport au nombre minimum de points nécessaires.

Après saisie, ces points ont été indexés et sauvegardés dans un fichier de type "Annotation" venant en superposition à l'image.

Localisation des points homologues sur l'image Panchro.

Il convenait ensuite de saisir de nouveau ces points d'appui sur l'image Panchro de référence. Pour minimiser les manipulations et gagner du temps, nous avons repris le fichier de points saisis et indexés sur l'image XS et lui avons fait subir les transformations suivantes (de type manipulation de fichiers de coordonnées) :

- Homothétie d'un facteur 2 pour le ramener à la même échelle que l'image Panchro.

- En pointant un seul point d'appui sur l'image Panchro, détermination d'un vecteur translation, appliqué à tous les points et permettant de ramener globalement les points d'appui en superposition sur l'image Panchro.

- En déplaçant ensuite les points localement et un par un, ajustement du pointé de chacun des points.

Remarques : Ceci n'a été possible que parce qu'il s'agissait d'images provenant du même capteur, avec des angles de prise de vue peu éloignés (0,7° Est pour l'image Panchro et 6,4° Est pour l'image XS) et au même niveau de traitement initial, donc possédant sensiblement la même géométrie de visée.

Si l'une de ces conditions n'avait pas été remplie, il aurait fallu ajouter une rotation. Les 3 lois simples appliquées au fichier de points initial sont donc dans ce cas équivalentes à une transformation polynômiale de degré 1.

Avantages de cette procédure :

- Les points d'appui sur l'image de référence sont directement indexés, avec donc la même indexation que sur l'image à corriger. Il n'y a donc pas d'erreur possible dans la correspondance des points homologues.

- L'étape finale n'est qu'une simple translation locale de chaque point d'appui (de quelques pixels et sensiblement de même direction pour des points localisés dans une même région de l'image). Ceci constitue un gain de temps appréciable pour la localisation de ces points homologues.

Expression du polynôme de transformation et validation de la correction XS->P.

Dans notre cas, des corrections géométriques polynômiales de degré 1 se sont avérées satisfaisantes et donc suffisantes pour amener les images en superposition entre elles avec une bonne précision.

Après élimination sévère de points présentant des écarts trop importants, 35 points d'appui bien répartis dans l'image ont été retenus. L'expression du modèle direct de déformation pour ramener l'image XS superposable à l'image Panchro est la suivante :

$$\begin{aligned}GX' &= 2 X + 2.426.10^{-2} Y - 322 \\ \pi \\ \Sigma Y' &= -2.44.10^{-2} X + 2 Y - 283\end{aligned}$$

où (X', Y') représentent les coordonnées du point de l'image XS corrigée en fonction de (X, Y) de l'image XS brute.

Les écarts maximum DX et DY sur les points d'appui (différence maxi, en X et en Y, entre la position théorique du point, déterminée au curseur, et sa position calculée par le modèle précédent (position réelle) sont :

DX = 1,68 pixels et DY = 1,66 pixels (1 pixel valant 10m).

Les écart-types σ_X et σ_Y des résidus en X et en Y sur les 35 points d'appui valent :

$\sigma_X = 1,00$ pixels et $\sigma_Y = 0,92$ pixel (1 pixel valant 10m).

Les coordonnées des points d'appui ont été déterminées au curseur sur les 2 images, et donc avec des valeurs entières de pixels. L'image XS originale ayant 20m de résolution, cet écart-type correspond à la précision de pointé et valide la transformation. Une transformation polynômiale de degré supérieur est donc inutile. Ceci est dû en partie à la bonne qualité géométrique des images SPOT.

Nous n'avons évidemment gardé que la partie commune des 2 images, correspondant à l'image Panchro. Après application de la transformation, nous disposons maintenant d'une image contenant 4 canaux géométriquement superposables (XS1, XS2, XS3 et Panchro), de taille 3500 lignes * 3700 colonnes et ayant tous 10m comme pas d'échantillonnage.

Il nous faut maintenant combiner radiométriquement les 2 images en une seule.

COMBINAISON RADIOMETRIQUE DES DONNEES

Notre document final en couleurs étant une composition colorée, nous devons maintenant combiner radiométriquement nos données de façon à ramener le nombre de canaux de 4 à 3. En effet, ce nombre constitue le nombre maximum de canaux visualisable en synthèse additive des couleurs. Pour cela commençons par rappeler les bandes spectrales correspondant aux 4 canaux :

$\Gamma_{XS1} : 0,50 - 0,59 \mu\text{m}$
 $J_{XS2} : 0,61 - 0,68 \mu\text{m}$
 $\pi_{XS3} : 0,79 - 0,89 \mu\text{m}$
 $\Sigma_{PAN} : 0,51 - 0,73 \mu\text{m}$

La solution la plus simple et adoptée par (Pédron et al., 1987) consiste à supprimer un des canaux XS et à le remplacer par le canal Panchro. Il peut donc s'agir de XS1 ou de XS2, tous deux très corrélés et dont les bandes spectrales sont incluses dans la bande spectrale Panchromatique. Nous avons choisi de supprimer XS2 et avons bâti une composition colorée fausses couleurs en affectant les canaux :

XS1 au Bleu, Panchro au Vert et XS3 au Rouge.

Le résultat en est présenté en planche P12A.

Nos images ayant des dates de prise de vue distantes de 9 mois 1/2, une telle visualisation présente de nombreux artéfacts en vert ou magenta dues aux évolutions ou changements de type :

- zones de chantiers,
- bateaux et sillages de bateaux,
- niveau et turbidité des mers différents, faisant apparaître de nombreux bancs de sable sur l'image Panchro.

De plus avec cette méthode, la finesse du Panchro se trouve concentrée sur un seul canal. Nous avons donc abandonné cette voie.

D'autres techniques consistent, par différentes formulations à intégrer une part du canal Panchromatique aux canaux XS, en recherchant une bonne corrélation avec les canaux XS originaux :

- SPOT Image pour la génération des produits P+XS, tout comme (Saint et al., 1984), ont choisi de mixer le Panchro aux canaux XS1 et XS2. Le canal XS3, distinct spectralement, reste inchangé, étant simplement rééchantillonné à 10m. Mais il s'agit dans leur cas d'images P et XS à la même date de prise de vue.

- C'est également la méthode adoptée par (Cliche et al., 1985) et par (Chavez, 1984 et 1986).

Pour s'affranchir des artéfacts peu esthétiques énoncés précédemment, nous avons donc préféré répartir le Panchro de façon équivalente sur les 3 canaux XS, en utilisant une méthode basée sur une transformation $(R,V,B) \leftrightarrow (I,T,S)$. Cette méthode permettant de mixer des données de sources différentes a été décrite par (Haydn et al., 1982), reprise par (Hallada, 1986), (Welch et al., 1987) et approfondie par (Carper et al., 1990). Elle nous a permis de gommer les artéfacts dus aux évolutions et d'augmenter le contraste de l'image résultante. Elle se décompose comme suit :

- Conversion $(R,V,B) \rightarrow (I,T,S)$, c'est à dire passage d'un référentiel (Rouge, Vert, Bleu) auquel ont été affectés les canaux respectifs (XS3, XS2, XS1) à un référentiel (Intensité, Teinte, Saturation).

- Remplacement du canal Intensité I par le canal Panchromatique, ces 2 canaux présentant une corrélation satisfaisante (cf. tableau 1).

- Conversion inverse $(I,T,S) \rightarrow (R,V,B)$. L'on obtient donc en sortie 3 néo-canaux très corrélés aux canaux XS d'origine, mais dans lesquels la composante intensité correspond au canal Panchro (cf. tableau 1).

Discussion et validation de l'image résultante (cf. planche P12B) :

- Les 3 nouveaux canaux allient maintenant la finesse du Panchro au niveau résolution à la richesse spectrale du XS au niveau radiométrique. Les artéfacts dus au changement de date se trouvent ainsi gommés.

- Sur l'image résultante, la discrimination de l'habitat se trouve renforcée par rapport aux images initiales, et spécialement par rapport à la végétation.

- Par contre, la discrimination à l'intérieur du thème végétation est moins bonne que dans l'image XS. Son intensité générale est abaissée, la faisant apparaître plus sombre. Ceci est dû au remplacement brutal du canal intensité par le canal Panchro. On peut rehausser la luminosité par adaptation de dynamique, mais ceci se fait au détriment du bâti qu'on est obligé de saturer. Notre but étant de discriminer celui-ci, nous avons accepté ce défaut déjà relevé par (Carper et al., 1990) et résolu sur un cas particulier en remplaçant l'Intensité par une combinaison des canaux Panchro et XS3.

Pour obtenir un produit grand public et plus facilement interprétable par l'utilisateur, nous avons ensuite voulu obtenir un résultat en couleurs naturelles, ce qui n'est pas directement possible avec les 3 canaux XS originaux ou les 3 néo-canaux XS+P que nous venons de créer.

PASSAGE EN COULEURS NATURELLES

La méthode choisie pour ramener notre image de 3 canaux correspondant à des mesures effectuées dans les domaines de longueur d'ondes respectifs Vert, Rouge et Proche-Infra-Rouge (le canal Panchro n'intervenant globalement que pour améliorer la résolution) à des canaux proches de mesures faites dans le Bleu, Vert et Rouge est empirique et reproductible avec un résultat satisfaisant sur presque toute image disposant de ce type de canaux. Elle consiste à affecter les couleurs primaires Bleu, Vert et Rouge aux canaux respectifs suivants : XS1, XS1+XS2+XS3 et XS2.

Avec ces nouvelles correspondances, on affecte en fait :

- Le Bleu à la bande spectrale verte XS1, petite approximation car la bande bleue, si elle existait sur SPOT serait très corrélée à la bande verte.

- Le Vert à la somme des 3 bandes XS1+XS2+XS3 nous donne un canal dont la réponse pour la végétation se trouve rehaussée par rapport aux autres canaux. Ce canal est équivalent à un indice de brillance.

- Le Rouge à la bande Rouge XS2 correspondante.

Cette méthode a l'avantage d'être simple et de ne nécessiter aucune vérité terrain.

En effet, une autre méthode aurait pu consister à passer directement en couleurs naturelles en effectuant une transformation du canal "Teinte" obtenu lors du passage $(R,V,B) \Rightarrow (I,T,S)$. Cette transformation, basée sur des vérités terrain au niveau couleur, aurait consisté à ramener chaque objet dans sa teinte naturelle. En première approximation, il s'agit d'une rotation des teintes. On ramène la végétation par exemple du rouge au vert. La transformation inverse $(I,T,S) \Rightarrow (R,V,B)$ ramène ensuite directement l'image en couleurs naturelles.

Quoique sans doute plus exacte, cette méthode a l'inconvénient d'être plus longue à mettre au point, nécessite des "vérités couleurs" et sans doute plusieurs reprises pour affiner le résultat.

D'autres combinaisons linéaires de canaux, généralement plus complexes sont possibles pour obtenir un résultat visuel similaire. Mais notre but n'était pas de passer en revue tous les algorithmes de reconstruction de couleurs naturelles, ni de trouver une formulation mieux adaptée à l'image, mais non transférable et surtout beaucoup plus longue à mettre au point sur microsysteme.

On constate cependant sur l'image une baisse générale de l'intensité de la végétation, qui apparaît en rouge sombre sur la composition colorée en fausses couleurs bâtie avec nos 3 nouveaux canaux. Ceci entraînera la même baisse de luminosité dans l'image restituée en couleurs naturelles, où la végétation apparaîtra en vert sombre. Cette imperfection n'est pas due à l'algorithme utilisé pour reconstituer des couleurs naturelles, mais à l'étape précédente, et particulièrement au remplacement du canal intensité par le canal Panchro.

SUPERPOSITION CARTOGRAPHIQUE ET REECHANTILLONNAGE

Principe - Choix de la résolution

L'étape suivante a donc consisté à ramener l'image en superposition à la carte tout en la ré-échantillonnant. La transformation est là aussi de type polynomiale. Un degré 3 a été retenu pour le polynôme après examen des résidus sur les points d'appui. L'interpolation a là-aussi été choisie de type bicubique.

Nous avons choisi de rééchantillonner l'image à une résolution inférieure à 10 mètres pour améliorer la discrimination et le contour des éléments linéaires et des bâtiments. Le choix de 7,5 mètres se justifie par les faits suivants :

- Un essai a été réalisé avec une résolution de 5m. L'information originale se trouve dans ce cas trop "diluée" pour être ensuite rehaussée de façon satisfaisante par filtrage (étape ultérieure).

- Ramener cette résolution de 10m à 7,5m multiplie le volume des données et donc la taille des fichiers par $(10/7,5)^2 \approx 2$, alors que passer de 10m à 5m les multiplie par 4 !

D'ailleurs pour des raisons de volume des données, nous avons été contraints de redécouper l'image en supprimant entre autre les zones de remplissage créées par la rotation lors de la transformation géométrique.

Détermination des amers

Prise de points d'appui sur l'image

Nous avons repris le fichier des amers de l'image Panchromatique auquel nous avons fait subir quelques corrections minimales : vérification du pointé de chaque point car nous disposons maintenant d'une image plus riche spectralement (3 canaux) et où le pointé est donc bien meilleur. Cette vérification entraînera pour certains points une correction de 1 ou 2 pixels.

Localisation des points homologues sur la carte topographique

Lors de la première correction, les points d'appui avaient été choisis et repérés sur la carte. Il nous a donc suffi de déterminer leurs coordonnées X et Y par simple mesure à la règle sur cette même carte qui dispose d'un quadrillage kilométrique.

La précision de la mesure sur la règle étant de l'ordre du 1/10mm, ceci correspond à une erreur de détermination de 5m sur la carte au 1/50 000. Les mesures de coordonnées (X,Y) ont donc été effectuées à 5 mètres près.

Il nous a ensuite fallu changer de repère pour passer de ces coordonnées cartographiques (X,Y) exprimées en mètres à des coordonnées (X',Y') exprimées en pixels dans un référentiel (lignes, colonnes) tel que :

$$\begin{aligned} \Gamma X' &= (X - 50000)/7,5 \\ \pi \\ \Sigma Y' &= (95000 - Y)/7,5 \end{aligned}$$

Cette transformation comprend :

- Une translation d'un vecteur $(X1, Y1) = (-50000, 95000)$ pour ramener l'origine carto proche de l'origine image (changement d'origine).

- Une inversion de l'orientation de l'axe des Y de façon à ramener les coordonnées en Y des points dans le sens positif vers le Sud (conforme au sens positif des lignes d'une image numérique).

- Enfin pour les raisons exprimées dans le paragraphe "Principe. Choix de la résolution" quand au choix de la résolution, nous avons donc divisé les coordonnées des points par 7,5 (changement d'échelle).

Expression du polynôme de transformation et validation de cette seconde correction géométrique

42 couples de points homologues ont été retenus, ce qui est plus que suffisant au regard des 10 au minimum exigés pour une transformation de degré 3. L'expression du modèle inverse de déformation pour ramener l'image superposable à la carte est la suivante :

$$X' = - 4,555 \cdot 10^{-10} X^3 + 9,505 \cdot 10^{-10} X^2 Y - 4,794 \cdot 10^{-10} XY^2 + 1,364 \cdot 10^{-9} Y^3 + 5,262 \cdot 10^{-7} X^2 - 9,487 \cdot 10^{-7} XY - 6,006 \cdot 10^{-6} Y^2 + 1,300 X - 0,273 Y + 706$$

$$Y' = + 1,196 \cdot 10^{-10} X^3 + 4,475 \cdot 10^{-10} X^2 Y - 2,144 \cdot 10^{-11} XY^2 - 7,701 \cdot 10^{-10} Y^3 - 1,348 \cdot 10^{-6} X^2 - 2,373 \cdot 10^{-6} XY + 4,521 \cdot 10^{-6} Y^2 + 0,284 X + 1,300 Y + 744$$

où (X', Y') représentent les coordonnées du point de l'image originale dont il faut aller chercher la radiométrie pour l'appliquer au point (X, Y) de l'image à corriger. Voir le paragraphe Détermination des amers pour plus de détails.

On constate la faible valeur des coefficients d'ordre supérieur à 1 (de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-11}) ce qui montre qu'une transformation de degré 1 serait presque suffisante.

Les écarts maximum DX et DY sur les points d'appui sont :

. DX = 3,62 pixels et DY = 3,67 pixels (1 pixel valant 7,5m).

Les écart-types σ_X et σ_Y des résidus en X et en Y sur les 42 points d'appui valent :

. $\sigma_X = 1,45$ pixels et $\sigma_Y = 1,56$ pixel (1 pixel valant 7,5m).

Pour les raisons d'espace disque évoquées précédemment, la partie utile et conservée de l'image est de taille 3 800 lignes*4 200 colonnes, avec 7,5m de résolution. Cette zone équivaut à une image de 2 850 lignes*3 150 colonnes avec 10m de résolution, à comparer à l'image 3 500 lignes*3 700 colonnes à 10m de résolution avant correction. La partie amputée n'est donc pas très étendue.

Validation de la superposition cartographique

L'image obtenue après cette seconde correction géométrique n'est pas une carte à part entière. Elle est équivalente à une image SPOT de niveau 2. Les déformations par rapport à la carte restent cependant faibles et sont de 3 natures :

- La précision des corrections géométriques faite en 2 étapes est de l'ordre de 10 mètres en écart-type.

- La précision de pointé sur la carte (1/10mm au 1/50 000 équivalent à 5m) et la précision de la carte elle-même (1/10mm également).

Les déformations dues au relief. Celles-ci ne sont pas très importantes dans notre cas d'étude car :

- La dénivelée sur l'ensemble de la zone d'étude est de 250 mètres maximum, 150 à 200m maxi en milieu urbain.

- Et surtout la scène Panchro possède un angle de prise de vue quasi vertical de $0,7^\circ$ Est. Cette scène, correspondant à l'intensité de l'image est celle qui sert de base cartographique à l'image. La scène XS, ayant un angle de prise de vue plus important ($6,7^\circ$ Est) n'intervient que pour la teinte et la saturation.

Le relief induit donc une erreur de localisation négligeable de quelques mètres maximum.

La localisation cartographique est donc assurée dans notre cas d'étude avec moins de 25 mètres d'incertitude en écart-type. Mais ceci est dû en grande partie à la quasi verticalité de la scène Panchro servant de structure à l'image, et ne serait certainement plus valable dans un cas quelconque.

REHAUSSEMENT

Afin d'améliorer le piqué de l'image, le contraste local et donc la discrimination, nous avons appliqué à chacun des canaux de la nouvelle image un filtre linéaire 3×3 de rehaussement moyen, rehaussant les hautes fréquences.

La transformation appliquée à un point donné est une fonction linéaire des points de son voisinage immédiat 3×3 . Une matrice de coefficients a_i de taille 3×3 est donc définie. De plus l'opérateur choisit un facteur de pondération P de façon à ne pas saturer l'image finale et une constante additive C de façon à recentrer la dynamique de l'image transformée.

La matrice des coefficients utilisée pour notre rehaussement moyen est la suivante :

-1	-1	-1
-1	+12	-1
-1	-1	-1

avec P = 5 et T= 5

Ce filtrage consiste à additionner l'image initiale avec son Laplacien correctement pondéré. Pour le rehaussement précédemment défini, on peut écrire :

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|c|c|}
 \hline -1 & -1 & -1 \\
 \hline -1 & +12 & -1 \\
 \hline -1 & -1 & -1 \\
 \hline
 \end{array} \\
 \text{Rehaussement}
 \end{array}
 = \frac{1}{5}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|c|c|}
 \hline -1 & -1 & -1 \\
 \hline -1 & +7 & -1 \\
 \hline -1 & -1 & -1 \\
 \hline
 \end{array} \\
 \text{Laplacien}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|c|c|}
 \hline 0 & 0 & 0 \\
 \hline 0 & +1 & 0 \\
 \hline 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 \end{array} \\
 \text{Image initiale}
 \end{array}$$

Ce filtre fait partie de la bibliothèque classique des filtres proposée par un logiciel de traitement d'images. Un filtre similaire a été employé par Pédrón et al. (1987) sur une image de la ville de Toulouse (France). Il faut noter qu'un rehaussement à tendance à bruyier l'image, à faire mieux ressortir ses défauts. Ceci est en particulier visible sur toute la partie mer de notre image, zone radiométriquement très homogène et possédant une réponse relativement faible dans tous les canaux, donc un rapport signal sur bruit plus faible. Les défauts d'égalisation de la réponse des détecteurs se trouvent donc plus visibles sur cette partie.

Remarques :

- Il est possible de pondérer l'effet du rehaussement en modifiant la valeur du coefficient central. Plus celle-ci est importante, plus l'importance de la radiométrie du point central du voisinage est renforcée par rapport aux autres valeurs, et donc plus l'effet de rehaussement est faible. Une valeur 16 par exemple nous donnera un rehaussement faible, une valeur 10 un rehaussement fort.

- Les 3 canaux rehaussés présentent un coefficient de corrélation de 95% avec les canaux dont ils sont issus.

RESTITUTION DU RESULTAT FINAL

Pour avoir un résultat final de meilleure qualité que les imprimantes couleurs, souvent limitées tant par la taille des images (au dessus d'une taille standard, sortie sous forme de lés) que par le nombre de couleurs restituées, nous avons préféré générer une bande magnétique du résultat final au

format VIZIR (restituteur laser couleur de la SEP). Cette fonction est en effet disponible sur notre logiciel.

Le VIZIR permet de restituer sur film photographique couleur une image numérique, point par point. 3 faisceaux laser Bleu, Vert et Rouge sont focalisés, superposés et viennent insoler le film avec une tâche élémentaire de 25 ou 50µm. L'achat d'un restituteur de ce type n'est envisageable que par un gros organisme. Mais il est possible de sous-traiter cette restitution pour un prix raisonnable, à SPOT-IMAGE par exemple.

Dans notre cas, nous avons choisi une taille du spot de 50µm et une adaptation de dynamique linéaire sur chacun des canaux. La taille de l'image sur film est donc de 3 800*50µm = 19cm par 4 200*50µm = 21cm et nous donne une échelle de restitution sur film de 1:150 000. Cette taille reste en dessous de la taille maximum acceptée par un agrandisseur photo professionnel, à savoir 24*24cm.

Des agrandissements de l'ensemble du film avec coefficient 3 et 6 ont été réalisés pour obtenir des tirages respectivement au 1:50 000 et au 1:25 000. Il ne nous a malheureusement pas été possible de restituer sur film un habillage cartographique. Ceci pourra être fait sur le tirage papier, en superposant une grille régulière sur calque.

D'autre part, des agrandissements partiels au 1:20 000 (coefficient 7,5) cf. planche P12C ont été tirés de façon à y superposer un extrait de la carte au 1/20 000, reproduit en Noir et Blanc (cf. fig. 2). A partir d'un transparent correspondant à la figure 2, superposable à la planche P12C, il est possible de situer, voire directement de cartographier, les évolutions depuis la dernière mise à jour de la carte.

Cette mise à jour de la carte topographique pourrait éventuellement se faire interactivement à l'écran, si la carte était intégrée de façon numérique dans un système d'information géographique permettant de visualiser une image numérique en fond d'écran.

CONCLUSION

Il est donc maintenant possible sur micro-système de traitement d'images, de traiter des données satellitaires en disposant d'une bibliothèque de fonctions de plus en plus riche, en obtenant un résultat de qualité sur des images de taille importante. Ceci n'était pas envisageable il y a quelques années. Cette étude ne porte bien sûr que sur un cas particulier d'étude où la bonne précision de la superposition cartographique est due aux conditions de prise de vue et à la dénivellée peu importante. Elle se limite également au milieu urbain, la discrimination de la végétation n'étant pas optimale sur le résultat final. Nous espérons cependant que ce document servira aux thématiciens, spécialement aux

urbanistes, et leur montrera, si besoin est, que l'outil télédétection satellitaire, et plus particulièrement le traitement d'images est à leur portée...

BIBLIOGRAPHIE

CAP SESA REGIONS, 1989. *Manuel de référence du logiciel Multiscope*, version 1.3.

CARPER W.J., T.M. LILLESAND, R.W. KIEFER, 1990. The Use of Intensity-Hue-Saturation Transformations for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 56, No. 4, pp. 459-467.

CHAVEZ P.S., 1984. Digital Processing Techniques for Image Mapping with Landsat TM and SPOT Simulator Data, *Proceedings of the eighteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Paris, France, pp. 101-116.

CHAVEZ P.S., J.A. and J.R. BOWELL, 1984. Comparison of the Spectral Information Content of Landsat Thematic Mapper and SPOT for Three Different sites in the Phoenix, Arizona Region, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 54, No. 12, pp. 1699-1708.

CHAVEZ P.S., 1986. Digital Merging of Landsat TM and Digitized NHAP Data for 1:24,000-scale Image Mapping, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 52, No. 10, pp. 1637-1646.

CLICHE G., F. BONN, P. TEILLET, 1985. Integration of the SPOT Panchromatic channel into Its Multispectral Mode for Image Sharpness Enhancement, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 51, No. 3, pp. 311-316.

COCHRANE G.R., 1989. Innovative Remote Sensing Developments for the 1990s : a Major Technological Revolution, *Proceedings of fifteenth New Zealand Geography Conference*, Dunedin.

EDWARDS M., G.R. COCHRANE, 1989. Practical Contributions of SPOT data for New Zealand Geography, *Proceedings of fifteenth New Zealand Geography Conference*, Dunedin.

EDWARDS M., COCHRANE G.R., and LASSELIN D., 1989. Auckland Coastal Studies, *Proceedings of fifteenth New Zealand Geography Conference*, Dunedin.

EDWARDS M., G.R. COCHRANE, D. LASSELIN, 1989. Urban Functional Mapping from SPOT Pan data, *Proceedings of fifteenth New Zealand Geography Conference*, Dunedin.

GALTIER B., P. GEIGER, 1985. La spatiocarte : une image satellite combinée à des données topo cartographiques et orientées vers les bases de données géographiques futures.

Téledétection et gestion des ressources : l'aspect opérationnel, A.Q.T..

GAVORET M., 1988. False color and pseudonatural color for SPOT images as a basis for space map. Production procedures. CERCO, *The Spot system and its cartographic applications*, Saint-Mandé 6-15 Juin 1988.

HALLADA W.A., 1986. Cover image on Tchernobyl of *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 52, No. 10.

HAYDN R., G.W. DALKE, J. HENKEL, J.E. BARE, 1982. Application of the IHS Color Transform to the Processing of Multisensor Data and Image Enhancement, *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Arid and Semi-Arid Lands*, Cairo, Egypt, pp. 599-616.

KOWALISKI P., 1978. Vision et mesure de la couleur, Masson.

LASSELIN D., 1988. La Couleur, *cours du GDTA-Formation*.

LASSELIN D., 1988. Visualisation et amélioration globale d'image numérique de télédétection, *cours du GDTA-Formation*.

LASSELIN D., 1989. Transformations et améliorations locales d'images numériques de télédétection, *cours du GDTA-Formation*.

LEFEVRE-FONOLLOSA MJ., H. CRUCHANT, 1986. Couleur, Perception et Télédétection, *rapport CNES*.

PEDRON C., J. TOURNET, J. CUSSOL, G. SAINT, C. LEPRIEUR, 1986. Adaptation des données numériques SPOT au milieu urbain, *Coll. Int. SPOT-1, premiers résultats en vol*, Toulouse, pp. 121-126.

PEDRON C., J. TOURNET, J. CUSSOL, C. LEPRIEUR, 1987. Intégration des données SPOT à un système d'informations géocodées, *Coll. Int. SPOT-1, utilisation des images, bilan, résultats*, Paris, pp. 515-530.

SAINT G., G. WEILL, 1984. SPOT Simulation Methodology : Simulated vs. Satellite Image Parameters, *SPOT simulation Applications Handbook, Proceedings of the 1984 SPOT Symposium*.

SCHADT R., G.R. COCHRANE, 1989. Vegetation and water studies from SPOT Pan data, *Proceedings of fifteenth New Zealand Geography Conference*, Dunedin, August 1989.

WELCH R., 1982. Spatial resolution requirements for urban studies, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 3, No. 2, 139-146.

WELCH R., M. EHLERS, 1987. Merging Multiresolution SPOT HRV and Landsat TM Data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 3, pp. 301-303.

Tableau 1 : Tableau de corrélation entre les divers canaux de l'étude calculé sur un extrait 1024*1024 pixels autour du centre-ville, et représentatif du milieu urbain. Exprimé en pourcentages. N'ont été reportés les coefficients utiles à l'étude.

Canaux	Int.	XS1	XS2	XS3	XS1+P
PAN	61	74	78	25	
XS1+P		77			
XS2+P			82		89
XS3+P				84	

Images SPOT :

- K/J 440/424, instrument HRV2, mode Panchromatique du 14-08-87
- K/J 440/424, instrument HRV1, mode XS du 31-05-88

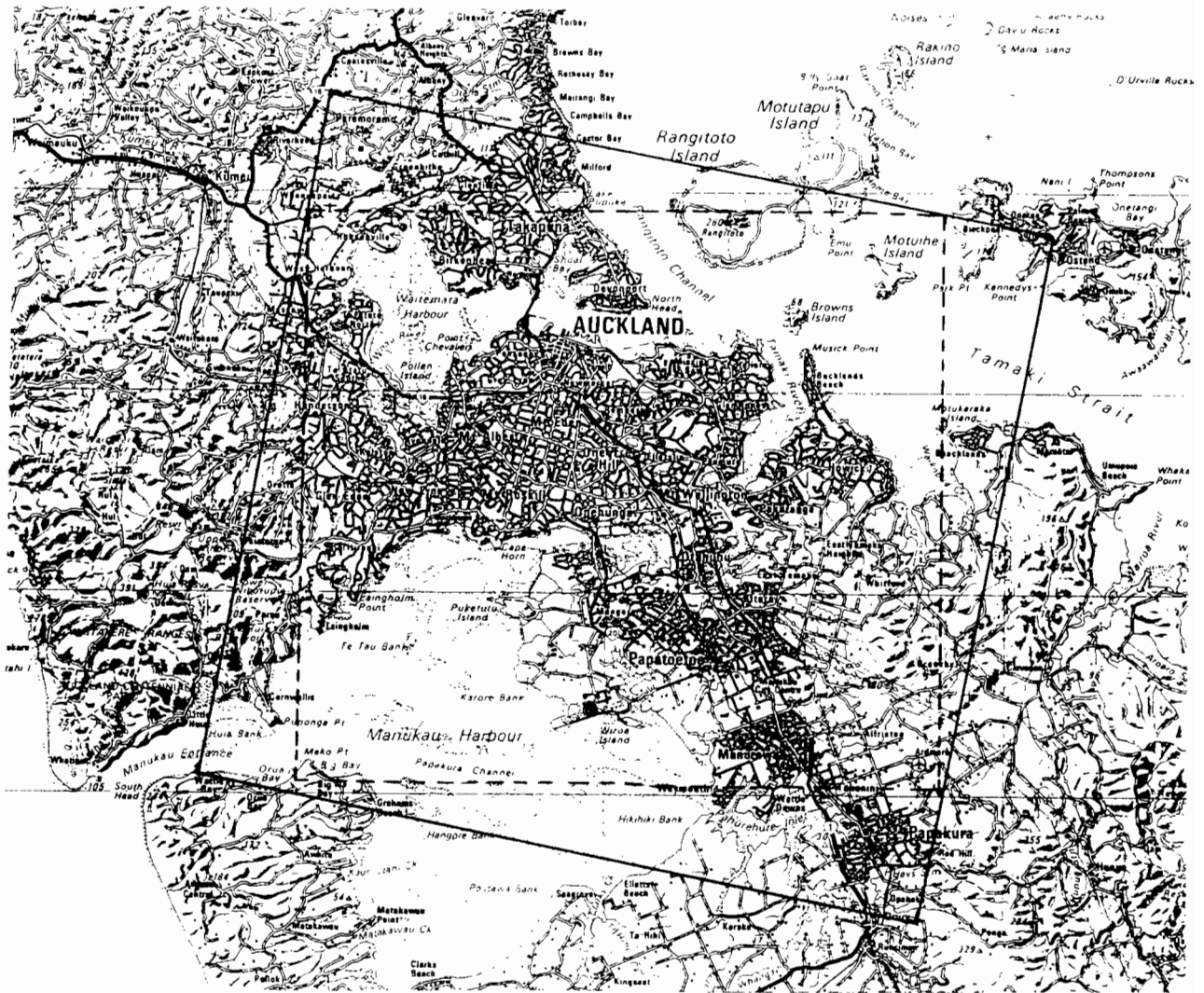


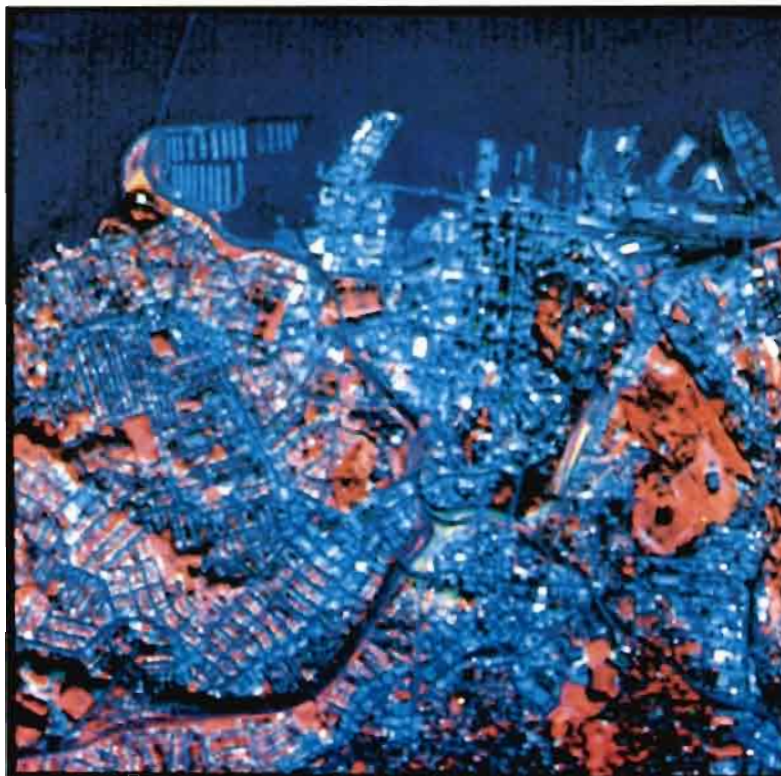
Figure 1 : Localisation de la zone d'étude sur la carte topographique au 1:25 000 (NZMS 262 sheet 3, Auckland, Edition 1, 1983).

- trait plein : limite de l'extraction sur l'image Panchro
- trait pointillé : limite du document final superposable à la carte topographique.

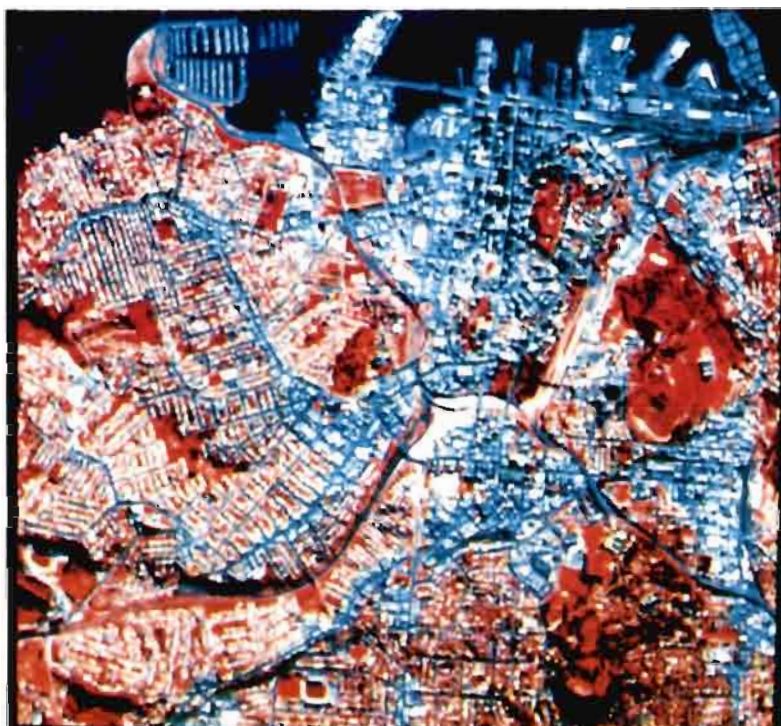


Figure 2 : Plan de la ville d'Auckland :
 ■ Carte topographique au 1:20 000 (NZMS 271, street map of Auckland, scale 1:20000, Edition 3, 1984).

P12



P12A : Composition colorée fausses couleurs au 1:50 000. XS3 en Rouge, Panchro en Vert et XS1 en Bleu.
Images SPOT 440/424, Panchromatique du 14-08-87 et XS du 31-05-88. Résolution 10m. 1987, 1988 CNES. Dist. SPOT IMAGE.



P12B : Composition colorée fausses couleurs au 1:50000. XS1+P en rouge, XS2+P en vert, XS1+P en bleu.
Images SPOT 440/424, Panchromatique du 14-08-87 et XS du 31-05-88. Résolution 10m. 1987, 1988 CNES. Dist. SPOT IMAGE

P12



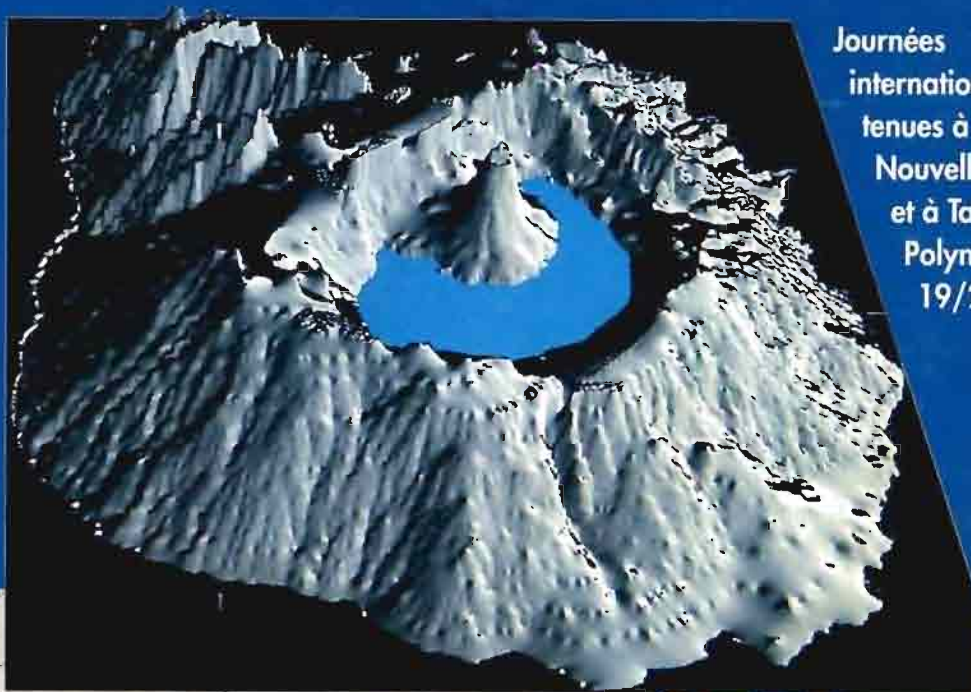
P12C : Image finale restituée en couleurs naturelles.
Résolution 7,5m C CNES 87,88/dist SPOT IMAGE.

"PIX'ILES 90"

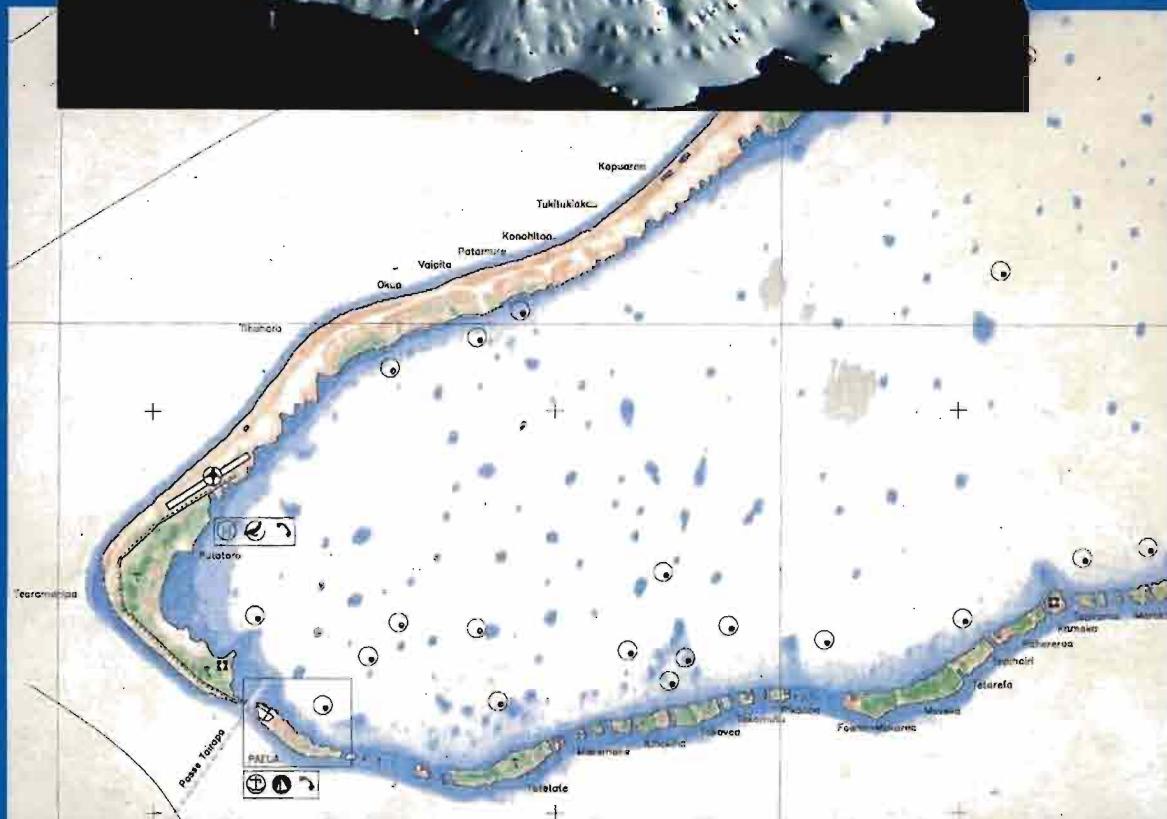
TELEDETECTION ET MILIEUX INSULAIRES DU PACIFIQUE : APPROCHES INTEGRES

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
POLYNESIE 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

