



Utilisation des images satellites à haute résolution pour la surveillance d'une zone côtière

Valério Baiocchi¹, Donatella Dominici², Filippo del Guzzo²

Titre original : *Utilizzo delle immagini satellitari ad alta risoluzione come supporto al monitoraggio di una zona costiera*

L'observation de la zone littorale est indispensable dans le cadre d'une gestion optimale de l'environnement. Les techniques classiques de relevés et de photogrammétrie peuvent s'y révéler très coûteuses, même si elles demeurent essentielles. Les images haute résolution des satellites de type *Ikonos* ou *Quickbird*, en raison de leur forte précision spatiale (métrique ou sub-métrique) et de leur faible intervalle de revisite (3 jours environ), peuvent cependant constituer des auxiliaires utiles et efficaces. Cet article présente les premiers résultats d'une étude effectuée sur les côtes des Abruzzes à l'aide des images panchromatiques haute résolution *Quickbird*. Nous chercherons à mettre l'accent sur la génération d'orthophotographies et sur la définition d'une procédure correcte.

Introduction

Cette étude se place dans le cadre du projet *Sicora* (Support informatique pour la gestion côtière de la région Abruzzes) dont le but est double : premièrement, soutenir les communes dans leurs actions de sauvegarde

du littoral ; deuxièmement, aider la région à planifier ses initiatives en termes de préservation et de développement durable de la zone côtière. Ce projet implique tant la région Abruzzes que l'université de l'Aquila.

L'activité de supervision du littoral est une pratique essentielle

au développement rationnel des ressources environnementales dans une région comme les Abruzzes. Les techniques de contrôle employées jusqu'ici, levés classiques ou GPS et analyses photogrammétriques, se sont révélées certes valable, mais toutefois ni très commodes ni particulièrement économiques dans le

¹ DITS, université *La sapienza* - Via Eudossiana 8, Rome - Tél : +39 06 44 50 50 96 - Fax : +39 06 44 58 55 15 -
Mél : valerio.baiocchi@uniroma1.it

² Département architecture et urbanisme - Université de l'Aquila - Piazzale Ernesto Pontieri, 2 - I-67040 Monteluco di Roio (AQ) - Tél : + 39 086 243 41 18 - Fax : +39 086 243 41 43 - Mél : dominici@dau.ing.univaq.it, delguzzo@dau.ing.univaq.it

cadre d'une surveillance continue. On a alors opté pour un procédé expérimental s'appuyant sur le potentiel des images satellites à haute résolution.

Les lancements des satellites commerciaux équipés de capteurs haute résolution ont offert une source inépuisable d'images panchromatiques et multispectrales : les résolutions spatiales obtenues par *Eros A* (2 m/pixel), *Ikonos* (métrique) ou encore *Quickbird* (60 cm/pixel) ouvrent des perspectives intéressantes soit dans le domaine de la description métrique des territoires (cartographie à grande et/ou moyenne échelle) soit sans celui de l'analyse multispectrale des données et donc de leur utilisation pour des tâches de surveillance.

L'acquisition d'images satellite présente, par rapport à la photogrammétrie traditionnelle, de nombreux avantages principalement dus à la fréquence relativement élevée de reviste (passage du satellite au même endroit), à la fauchée accrue et à la possibilité de réaliser des images quel que soit le terrain. En outre, un aspect fondamental à ne pas perdre de vue est celui de la reconnaissance des objets pertinents par rapport à l'analyse envisagée.

Les images haute résolution, au moment de leur prise, contiennent des distorsions géométriques et radiométriques qui empêcheraient toute exploitation dans une application cartographique si elles n'étaient pas corrigées. Une fois l'ajustement radiométrique effectué, les produits sont commercialisés sous trois formes différentes, suivant le type de correction géométrique appliqué (et le prix !). Afin d'éviter toute équivoque il faut préciser que, même dans le cas d'images dites géoréférencées, c'est-à-dire avec un cercle d'erreur associé, un calage ultérieur à l'aide de points d'appui au sol (GCP, *Ground Control Point*) est indispensable. Ces derniers, lorsqu'ils sont déterminés par GPS permettent

d'obtenir des précisions extrêmes tout en exigeant des campagnes de mesures extrêmement brèves en comparaison des techniques de naguère.

L'usage de l'orthophotographie rectifiée ainsi que l'éventuelle reconstruction de clichés stéréoscopiques nécessitent la connaissance de modèles physico-géométriques qui relient l'espace image à l'espace réel (par exemple l'équation de colinéarité) grâce à la connaissance des paramètres de prise de vue. Malheureusement, ces variables de positionnement, ainsi que les caractéristiques optiques du dispositif de prise de vue, ne sont pas systématiquement communiquées par les distributeurs : il faut donc envisager des approches différentes. La correspondance entre les deux espaces (image et terrain) s'effectue généralement à l'aide de points homologues et de modèles d'anamorphose purement analytiques (ex : polynômes, fonctions rationnelles, splines, etc.) : ces modèles n'étant pas liés à un type particulier de capteur, ils peuvent être utilisés en toute généralité. Les coûts sont fonction de la politique du distributeur ainsi que du niveau de concurrence ; ils représentent un facteur limitant important de diffusion des images. Ces dernières, outre leur usage purement géométrique, peuvent être utilisées surtout dans le cadre de missions d'urgence en cas de catastrophe naturelle ou moins dramatiquement dans le cadre d'une surveillance régulière d'une zone précise où la cartographie à très grande échelle n'est peut-être pas disponible.

Pour réaliser les orthophotographies adéquates, les seules qui puissent servir à l'ajournement des documents cartographiques, il faut en outre disposer d'une information d'élévation (le MNT) ; celui-ci devra idéalement présenter une précision et une taille de grille adaptée à l'échelle du cliché à orthorectifier. Il faut se souvenir que la superposition entre l'image et le modèle numérique de terrain doit être effectuée dans un même

système géodésique : des erreurs même minimes dans le calage des deux couches peuvent produire des incohérences flagrantes. Un autre facteur important est l'identification et la précision des points d'appui.

Dans cet article nous présentons une expérience de surveillance de la côte abruzzaise à l'aide d'images panchromatiques *Quickbird*. Pour les besoins des différents tests, l'étude s'est restreinte sur le port de Pescara ; ces tests ont porté sur le potentiel de cette méthode, sur la répartition des points d'appui et enfin sur les différents algorithmes de calcul. Le but de cette phase préliminaire est de déterminer la procédure la plus efficace en termes de coût et de temps sur la base de données disponibles, afin de la proposer par la suite à la région Abruzzes qui l'exploitera dans le cadre d'une surveillance côtière régulière.

Analyse des images

Les images utilisées sont donc issues du satellite *Quickbird* et sont disponibles au format standard. Le choix du satellite a été guidé par le fait que *Quickbird* est, à l'heure actuelle, le seul à proposer des images panchromatiques de résolution sub-métrique (60 à 70 cm). Les clichés sont proposés dans différents formats qui correspondent aux degrés de corrections géométriques et radiométriques pré-appliqués. Les formats les plus utilisés sont le *standard* (ce qui est le cas ici), le *standard orthoready* et le *basic*. Les images *basic* ne sont ni plus ni moins que des images brutes, identiques à celles qui sont issues du capteur, c'est-à-dire sans aucun prétraitement. Comme on peut le devenir, elles sont généralement appréciées des utilisateurs experts qui veulent maîtriser tout le processus d'orthorectification depuis A jusqu'à Z. Les formats *standard* et *standard orthoready* ont déjà subi

une orthorectification basique à l'aide d'un MNT gratuit à grande échelle (le *Gtopo 30*) appuyé sur l'ellipsoïde de référence pour la mesure des altitudes. On voit que ces deux formats rendent une

nous avons décidé de choisir le format *standard* pour des raisons d'optimum économique. De cette façon, il a été possible d'obtenir une image réduite à la seule zone d'étude (figure 1).

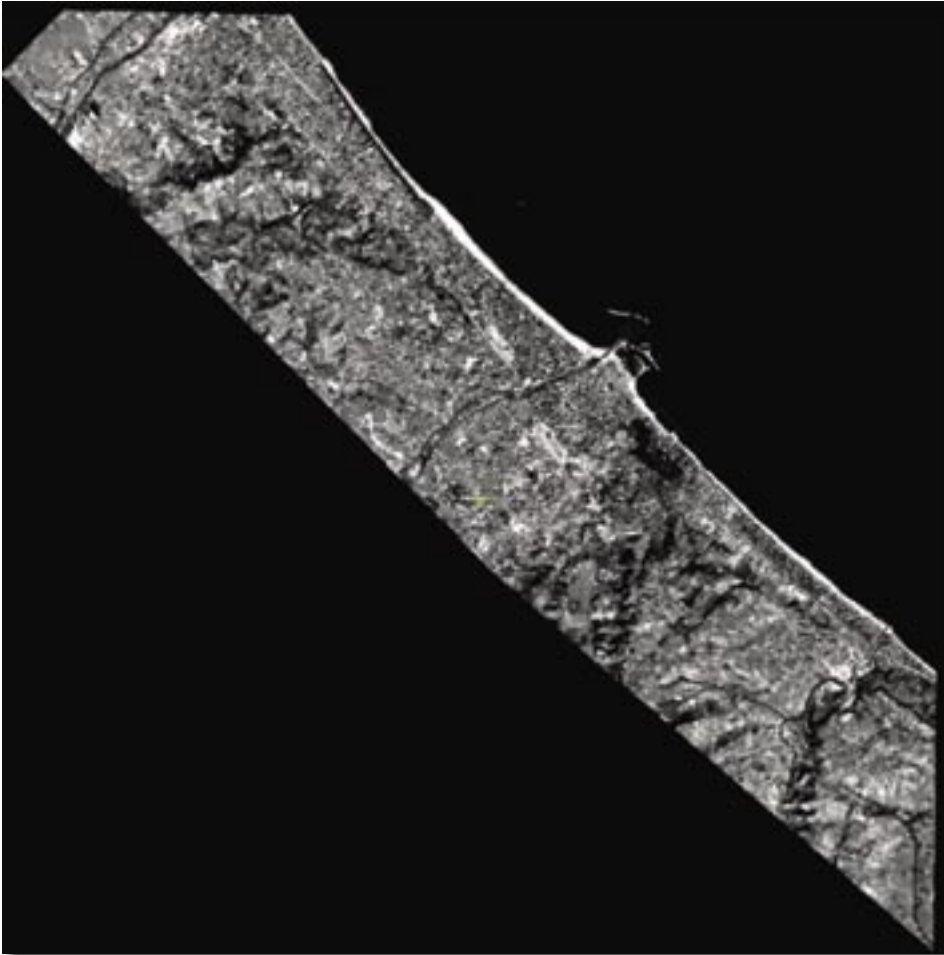


Figure 1 – Emprise de la zone d'étude.

orthorectification de précision difficile, dans la mesure où le traitement géométrique de médiocre qualité subi oblige à effectuer un retour du cliché dans la projection originale.

La littérature [Toutin 2004] ne recommande pas l'utilisation systématique du format *Basic*, les autres formats pouvant également faire l'objet d'un traitement géométrique adéquat. Toutes les images commerciales peuvent effectivement être utilisées dans le cadre d'orthorectifications rigoureuses, ou plus rapides, avec ou sans points d'appui. Notre projet étant destiné *in fine* à être mis entre les mains de la région Abruzzes,

Algorithmes d'orthorectification

Il n'est pas question ici de faire une revue détaillée des avantages et des défauts liés à chaque algorithme ; nous nous contenterons dans la suite d'évoquer brièvement ces points, en renvoyant le lecteur intéressé à la littérature idoine, en particulier [Toutin 2004] pour les modèles rigoureux, et [AA.VV 2003] pour les modèles RPF.

À l'heure actuelle l'orthorectification d'un cliché satellite peut être effectué à l'aide de multiples

méthodes parmi lesquelles les méthodes rigoureuses et les fonctions rationnelles (*rational polynomial functions, RPF*). Ces dernières à leur tour se divisent en méthodes faisant appel exclusivement aux points d'appuis sol (*RPF without RPC*) et à celles qui utilisent en sus des facteurs de correction embarqués dans les métadonnées des images (*RPF with RPC*). On rappelle que les points d'appui servent pour certains (ceux parmi les plus facilement identifiables) à calculer les paramètres du modèle, et pour les autres uniquement à valider *a posteriori* la précision obtenue. Les deux dernières méthodes sont essentiellement identiques, selon que l'on dispose ou non du fameux fichier *RPC* au format *TXT*.

L'interpolation à l'aide de fonctions rationnelles reste une méthode purement mathématique (boîte noire non rattachée aux paramètres physiques) et, en tant que telle, demeure applicable en toute généralité quel que soit le capteur et/ou la plate-forme aéroportée. En revanche, l'approche rigoureuse fait quant à elle appel aux équations de colinéarité ; elle se range donc parmi les approches photogrammétriques, vu qu'elle tient compte de la position et de l'assiette du satellite, ainsi que des caractéristiques du capteur et de la réfraction atmosphérique. L'utilisation des méthodes mixtes *RPF with RPC* représente une sorte de compromis entre ces deux extrêmes, en ce sens qu'il s'agit d'une méthode purement mathématique mais que les coefficients qu'elle utilise proviennent de données physiques.

Les modèles utilisant les fonctions rationnelles peuvent également être classés en deux sortes : les modèles montants permettent de retrouver les coordonnées images en fonction des coordonnées terrestres, et les modèles descendants font l'inverse ; ces derniers ne sont cependant pas très utilisés, car ils nécessitent une connaissance préliminaire du MNT.

Toutes ces méthodes sont disponibles dans le logiciel canadien *OrthoEngine* édité par *PCI Geomatics*. Le modèle rigoureux est implémenté à l'aide de l'algorithme de Toutin (disponible sur le site *Internet* du centre canadien de télédétection), développé initialement pour tous les satellites à acquisition synchrone (*Ikonos II*, *Quickbird*, *Spot 5*) et, depuis la version 9.0 du logiciel, pour les images asynchrones (*Eros A*).

Des comparaisons entre les modèles rigoureux et *RPF without RPC* ont déjà été publiés [Baocchi et al. 2004] [Toutin 2004] ; dans le cadre de cette étude, il semblait plus pertinent de comparer les modèles rigoureux d'avec les modèles *RPF with RPC*, ces derniers étant fournis dans les fichiers de métadonnées déjà cités. Les modèles rigoureux demeurent les plus corrects au plan photogrammétrique et, généralement, les plus robustes ; en contrepartie ils exigent des logiciels spécialisés et adaptés aux optiques de chaque plate-forme satellite. Inversement, la méthode *RPF with RPC* est de plus en plus utilisée dans les divers applicatifs en raison de sa bonne robustesse et de sa moindre complexité (par rapport aux méthodes rigoureuses). Les modèles *RPF* consistent en des rapports de polynômes homogènes de trois variables dont on limite le degré à un entier positif quelconque (par exemple ici 3) :

$$i(x, y, z) = \frac{h_i(x, y, z)}{f_i(x, y, z)} \quad ; \quad j(x, y, z) = \frac{h_j(x, y, z)}{f_j(x, y, z)}$$

$$P_{ijk}(x, y, z) = \sum_{i,j,k} a_{ijk} x^i y^j z^k$$

où les coefficients a_{ijk} sont, dans le cas de la méthode *RPF with RPC*, fournis dans les métadonnées, contrairement à la méthode *RPF without RPC* où ceux-ci sont estimés à partir des points d'appui ; les fonctions $i(x, y, z)$ et $j(x, y, z)$ correspondent aux coordonnées images, alors que le triplet (x, y, z) représente les coordonnées terrain. Dans les faits, le fichier de métadonnées contient les *RPC*

des images exploitées jusqu'au troisième ordre.

Il est facile d'imaginer la façon dont cette méthode se trouve codée à l'intérieur des logiciels et la manière de l'adapter immédiatement à toute nouvelle plate-forme de prise de vue. En outre, il faut bien voir que les distributeurs, en communiquant la valeur de ces coefficients, ne donnent en réalité aucune information concrète sur le système optique (ou d'autres paramètres du satellite), information qu'ils souhaitent souvent garder secrète autant que faire se peut.

La méthode *RPF with RPC*, disposant d'une valeur, certes approximative, des coefficients de correction géométrique nécessite moins de points d'appui. Le premier de ceux-ci suffit généralement à obtenir une valeur satisfaisante de tous les coefficients, les autres n'ayant plus qu'une faible influence sur la précision globale. Ceci pourrait s'avérer particulièrement avantageux pour caler des images dans des zones où le relevé précis au sol serait onéreux (pays en voie de développement), en réduisant significativement le temps de mission.

Levés GPS des points d'appui

Le relevé des points d'appui par GPS s'est déroulé sur une zone représentant une bande d'environ 4 km de large représentant environ 80 km² ; elle s'étend en oblique sud-est/nord-est depuis le village de *FrancaVilla al mare* jusqu'à celui de *Città San Angelo*. La position générale des points a été fixée aux intersections d'une grille dont un des axes est parallèle à la ligne de côte et l'autre lui est perpendiculaire. La distance des mailles est d'environ 1,5 km, ce qui donne 57 points en tout.

Aux environs immédiats de chaque point de la grille, l'équipe a cherché

des points idéaux clairement identifiables comme des artefacts ou des clôtures (le terminateur, c'est-à-dire la ligne de séparation lumière/ombre doit être nette) éloignés de tout obstacle pouvant nuire à la réception des signaux GPS.



Figure 2 - Extrait de l'image.

La campagne de levés s'est conclue par une rédaction de monographies concernant chaque point d'appui utilisé, sur lesquelles l'on a reporté d'une part l'extrait d'image satellite correspondante, ses coordonnées dans le système géodésique WGS 84, quelques notes marginales indispensables ainsi qu'une esquisse planimétrique des environs immédiats. Ceci permet d'utiliser d'éventuels logiciels de navigation pour arriver plus vite au point d'appui, en cas de nécessité.

La campagne en elle-même s'est déroulée en quatre phases d'une dizaine d'heures chacune, un temps rendu nécessaire par la superficie importante de la zone, ainsi que son relief caractéristique alternant plats et collines. Les deux équipes étaient munies du matériel suivant :

- Base : récepteur *Trimble 5 700* ;
- Rover 1 : récepteur *Trimble 5 700* ;
- Rover 2 : récepteur *Trimble 4 700*.

Le levé s'est effectué en mode *Rapide-Statique* à l'aide de deux points origine, de sorte que chaque vecteur différentiel ne pût excéder les 15 km. La localisation finale des points est décrite sur la figure 3.

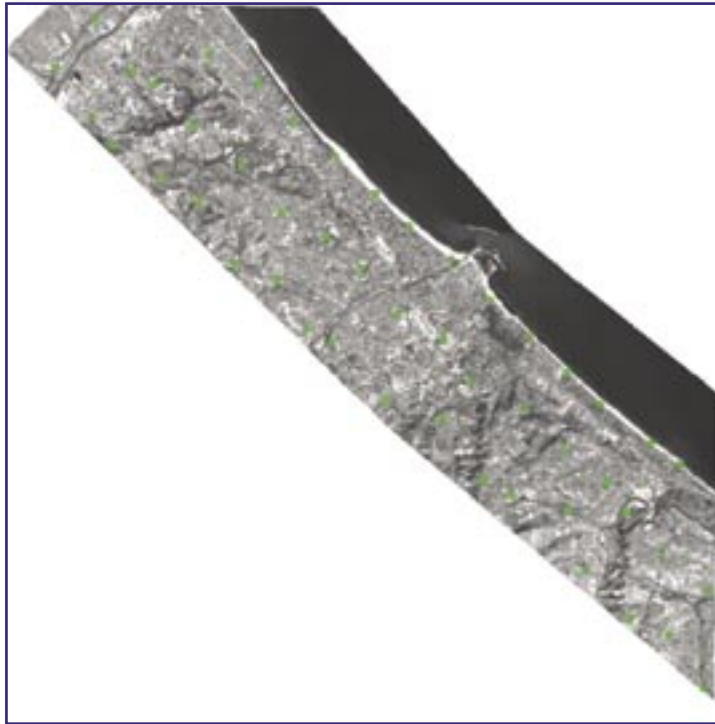


Figure 3 – Localisation des points d'appui.

Le choix des points origines, *Madonninà* et *Francavilla* a été dicté par l'impossibilité d'exploiter les intersections de la grille IGM 95 du voisinage. L'intégralité de ce relevé a nonobstant été intégré au maillage national IGM 95. Pour ce faire, deux récepteurs fixes ont été positionnés aux points 141705 et 141701 de la grille, un troisième récepteur en mode statique a été placé aux points origines de l'étude pendant environ une heure et demie (figure 4). Le post-traitement a été confié aux bons soins du logiciel *Trimble geomatics office v 1.50* à l'aide des éphémérides transmis. La précision finale de tous les points est centimétrique, à part le levé *Ouest 09* dont l'erreur atteint 3 cm en planimétrie et 4,5 en altitude.

Expérimentation

L'étude effectuée, comme nous l'avons déjà dit, n'a pas pour but de déterminer jusqu'où l'on peut aller en terme de précision extractible des images satellites, mais plutôt de déterminer ce qu'il est possible de faire dans des cas typiques, à l'aide d'images, d'outils logiciels et de « ressources » courants. Les

facteurs péjoratifs sont ici le fait que les points d'appuis sont tous groupés sur une petite zone et l'utilisation d'images *standard* déjà orthorectifiées à l'aide d'un MNT de basse précision. Le premier facteur est à modérer, en considérant que la zone maillée est précisément celle sur laquelle se déroule l'étude – qui peut donc, *a contrario*, être considérée comme plutôt bien couverte. En ce qui concerne l'effet du MNT de faible qualité, dont l'utilisation dans les régions à forte déclivité peut se révéler désastreuse (en particulier si l'angle de prise de vue s'écarte significativement du nadir), son

influence ne devrait pas être trop gênante si l'on considère qu'on a ici affaire à un relief côtier assez bas, morphologie où un MNT grossier peut se révéler malgré tout suffisant. Le problème peut devenir plus critique dans la zone centrale à partir des contreforts des collines avoisinantes.

En gardant présent à l'esprit le but de l'étude, nous avons comparé les résultats obtenus soit par la méthode rigoureuse soit par la méthode *RPF with RCP* en faisant usage d'un nombre variable de points de contrôle.

Parmi le semis levé, certains points se sont révélés immédiatement comme entachés d'un résidu élevé, ce qui les a classés parmi les points marginaux. L'analyse de l'erreur n'a pas permis de trancher entre une erreur de mesure ou un mauvais placement dû au MNT grossier. Quoiqu'il en soit, ces points n'ont jamais été utilisés par la suite. Le semis s'est donc trouvé réduit à 48 points, parmi lesquels il n'était pas exclu qu'il se trouvât d'autres points marginaux (toujours pour les mêmes raisons) ; ceux-ci ont été gardés dans l'optique de se rapprocher autant que possible des conditions réelles d'exploitation, ainsi que de tester la robustesse des différents algorithmes.

On a donc décidé de partir d'un ensemble minimal de dix points, puis d'augmenter de quatre en quatre jusqu'à atteindre l'ensemble

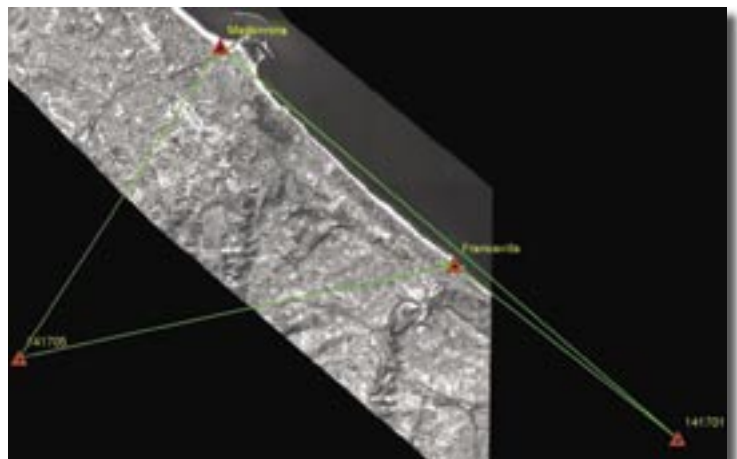


Figure 4 – Schéma de l'insertion des points de base dans le réseau national IGM 95.

du semis, en utilisant strictement les mêmes points dans les deux algorithmes. Le choix s'est opéré de façon à conserver une répartition homogène sur le territoire, malgré une densité différente.

Les résultats portent à la fois sur les écarts constatés vis-à-vis des points d'appuis eux-mêmes que vis-à-vis des points de contrôle : les premiers dépendent de la précision du modèle alors que les seconds reflètent la précision extractible de l'image.

Un survol rapide des premiers résultats montre que les deux méthodes diffèrent dans leur évolution en fonction du nombre de points d'appui utilisés (figure 5). Comme on pouvait le penser, les résidus calculés du modèle *RPF with RPC* ne diminuent pas lorsqu'on augmente le nombre de points d'appui, alors que ceux du modèle rigoureux atteignent un plancher à partir d'une vingtaine de points environ.

Qui pis est, la précision maximale n'est pas facilement déductible des résultats, on note en effet que les résidus ont de nouveau tendance à augmenter lorsque le nombre de points de contrôle augmente, une contre-performance probablement due à l'effet de points marginaux inaperçus, dont la présence, encore une fois, ne peut s'expliquer facilement.

Dans les deux cas nous nous trouvons dans une situation analogue à celle de la production, ce qui nous permet d'estimer la robustesse des algorithmes. On s'aperçoit que le modèle rigoureux produit des résultats améliorés d'une trentaine de pour-cent, aussi en termes de précision du modèle que de l'image (les échelles des graphiques sont différentes).

En ce qui concerne la problématique de l'observation détaillée de l'évolution côtière, la précision obtenue est largement suffisante, même lorsqu'il s'agit de suivre le mouvement du littoral lui-même.

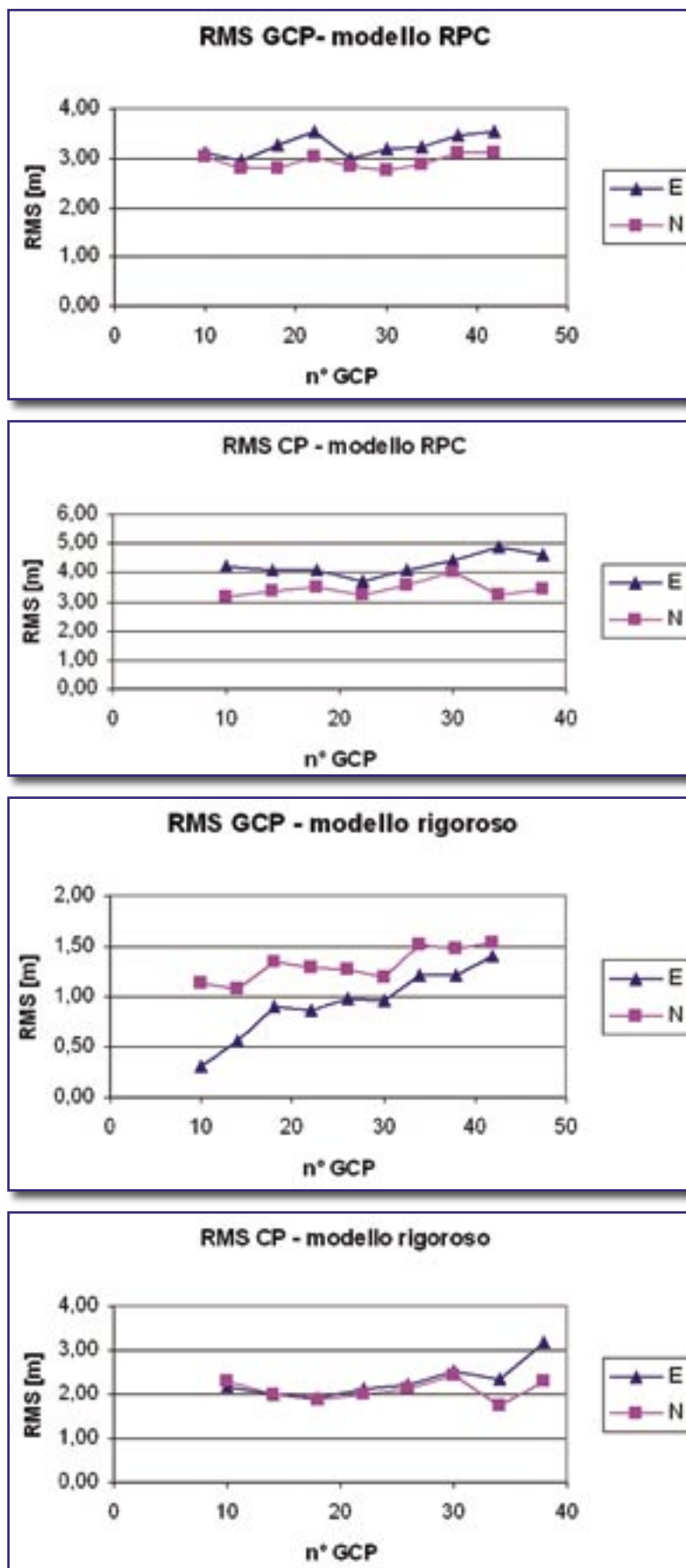


Figure 5 – Valeurs des résidus en fonction de l'échantillon.



Figure 6 – Détail du port de tourisme de Pescara.

Conclusion et perspectives

S'il faut se rapporter à l'application envisagée, la précision des deux modèles testés est très satisfaisante et chacun possède un avantage : le modèle rigoureux celui de la précision, le modèle RPF celui de la concision.

En première analyse, les deux méthodes apparaissent peu sensibles aux points entachés d'erreur. Les résultats obtenus concordent avec ceux menés dans le cadre d'expériences similaires [Grassi, Radicioni 2003] – voire sont très légèrement supérieurs, un effet probablement dû à la configuration favorable du relief (côte basse).

Il reste à voir si la présence de points marginaux est effectivement causée par l'utilisation d'un MNT à basse résolution ; le cas échéant, il serait possible de s'en affranchir en utilisant l'altitude des points d'appui eux-mêmes. Cette question sera l'objet d'une étude et d'un article ultérieur.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ingénieur Silvia Grassi de l'université de Pérouse pour ses conseils précieux, ainsi que la docteure Francesca Giannone de l'université La Sapienza de Rome pour sa patience tout au long des expérimentations. Nous remercions également Digitalglobe pour sa diligence et sa précision. Cette étude fait partie d'un projet de recherche cofinancé par le Miur 2002.

Bibliographie

[AA. VV 2003] *PE&RS Volume 69, number 1 – Focus issue : rational function for Ikonos imagery*

[Baiocchi, Crespi, De Vendictis, Giannone 2004] *Ortorettificazione di immagini satellitari ad alta risoluzione per scopi cartografici : metodologie ed implementazione di un nuovo software. Bollettino Sifet n° 1/2004*

[DiK., MaR. Li R. 2001] *Derivino 3D shorelines from high resolution Ikonos satellite images with rational functions. ASPRS annual conference, St. Louis, April 25-27 2001*

[Fiani, Pistillo 2004] *Test di georeferenziazione di immagini satellitari ad alta risoluzione – relazione finale Cofin 2001 – l'uso delle immagini satellitari ad alta risoluzione per le analisi territoriali.*

[Grassi, Radicioni, Stoppini 2003] *Immagini Quickbird II ad alta risoluzione : paragone qualitativo e metrico tra diversi formati commerciali. Atti della VII conferenza nazionale Asita 2002, Perugia.*

[Toutin 2004] *Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods (review paper) International journal of remote sensing, May 2004, 25 n° 10, p. 1893-1924*

Quickbird imagery products, product guide 2004.
http://www.digitalglobe.com/product/product_docs.html

Sites Web

www.asprs.org	ASPRS	www.ccrs.nrcan.gc.ca	Centre canadien de télédétection
www.digitalglobe.com	Digitalglobe	www.isprs.org	ISPRS
www.oeepe.org	OEEPE	www.pcigeomatics.com	PCI
www.spaceimaging.com	Space Imaging	www.sysdeco.it	Sysdeco