

Photogrammétrie Satellitaire pour les Capteurs de Haute Résolution : État de l'Art *

Th. Toutin

Centre Canadien de Télédétection
588 rue Booth, Ottawa, Ontario, Canada K1A 0Y7
Tél : +1 613 9471293 - Fax: +1 613 947 1385
E-mail: thierry.toutin@cctmcan.gc.ca

Résumé : Depuis l'arrivée dans le domaine civil en 1999 des capteurs satellitaires de haute résolution (HR) dans les ondes visibles et infra-rouges (VIR), l'utilisation de ces données a posé de nombreux défis aux communautés scientifiques, et encore plus aux utilisateurs, dans les différentes applications de la géomatique, et principalement les traitements photogrammétriques 3D. Après un aperçu sur les nouveaux capteurs civils HR-VIR, les distorsions de prise de vue et les prétraitements des images disponibles aux utilisateurs, cet article présente différentes modélisations mathématiques et méthodes de photogrammétrie satellitaire pour corriger ces distorsions géométriques dans le but de créer des produits cartographiques 3D de précision. L'application de ces modélisations aux différents prétraitements est aussi discutée.

Mots clés : Haute résolution, photogrammétrie satellitaire 3D, modélisations physique et empirique.

Abstract : Satellite photogrammetry for high-resolution sensors: state of the art.

Since the launch of civilian high-resolution (HR) satellite sensors in the visible-and-infrared spectrum (VIR) in 1999, the use of HR data has challenged the scientific communities and the users for the different geomatic applications, mainly in 3D photogrammetric processing. After reviewing the new civilian HR-VIR sensors, the imaging distortions and the preprocessing of images available to users, this paper show different mathematical modellings and methods of satellite photogrammetry to model geometric distortions in order to generate precise 3D cartographic products. The potentiel of these modellings is also addressed as a function of different pre-processing.

Keywords: high resolution, 3D satellite photogrammetry, physical and empirical modelling.

1. Introduction

L'intégration de données multisources (matricielles et vectorielles) dans les applications de la géomatique nécessite des traitements géométriques et radiométriques adaptés à la nature et aux caractéristiques de la donnée afin de conserver l'information de chaque image dans le produit final cartographique. Depuis l'apparition en 1999 des capteurs satellitaires de haute résolution (HR) (métrique et sub-métrique) dans les ondes visibles et infrarouges (VIR), de nouveaux défis se sont présentés dans ce domaine d'intégration de données, et principalement pour les applications cartographiques et topographiques de grande précision (Fritz, 1996; Kaufmann & Sulzer, 1997; Konecny, 2000; Dupéret *et al.*, 2004).

L'objectif de cet article est de faire le point sur les avancées et les limites de la photogrammétrie satellitaire 3D (Light *et al.*, 1980) avec les nouveaux capteurs HRVIR. Nous aborderons en premier lieu les capteurs de SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II, OrbView et QuickBird, puis les sources de distorsions géométriques de la prise de vue, et enfin les pré-traitements des images qui sont disponibles aux utilisateurs. Nous discuterons aussi des outils mathématiques et des méthodes de photogrammétrie satellitaire pour la modélisation géométrique 3D de ces systèmes d'acquisition.

2. Capteurs de haute résolution

Il n'est pas question ici de rappeler le fonctionnement et les caractéristiques de tous les systèmes HR-VIR (Dupéret *et al.*, 2004), mais de regarder les spécificités des différents capteurs, qui conditionnent les possibilités et les limites de leurs applications cartographiques et topographiques. Comme les différents types d'images sont relativement similaires pour les différents capteurs, ces aspects de prétraitement et de calibration seront traités au § 2.7, après avoir décrit les sources de distorsions géométriques.

* Article publié dans la Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, N° 175 (2004-3), Pages 57-68 et repris dans le Bulletin des Sciences Géographiques avec l'aimable autorisation de l'Auteur.

2.1 SPOT-5

SPOT-5 a été mis sur une orbite hélio-synchrone quasi-polaire à 822 km dans la nuit du 3 au 4 mai 2002 par une fusée Ariane 4, avec à son bord, entre autres, des capteurs HR « en peigne », qui peuvent travailler de manière indépendante ou couplée (Baudoïn et Fratter, 1996, Bouillon *et al.*, 2002;

<http://spot5.cnes.fr/satellite/instruments.htm>) :

- le capteur HR géométrique (HRG) avec visée latérale ($\pm 27^\circ$), un champ de vue de 4° pour une fauchée au sol de 60 km ; et
- le capteur HR stéréoscopique (HRS) avec visée avant-arrière ($\pm 20^\circ$), un champ de vue de 8° pour une fauchée au sol de 120 km.

HRG fournit des images multibandes avec un échantillonnage au sol de 10x10 m, ou des images panchromatiques avec un échantillonnage au sol de 5x5 m ou de 2,5x2,5 m (super mode) réalisées à partir de deux images à 5 m décalées de 0,5 pixel (Latry & Rougé, 1998, <http://spot5.cnes.fr/satellite/instruments.htm>). Deux capteurs HRS fournissent, à 90 s d'intervalle, un couple panchromatique d'images stéréoscopiques avec un échantillonnage au sol de 10x5 m (<http://spot5.cnes.fr/satellite/instruments.htm>). Le but principal de ces capteurs est de créer, après traitement au sol, des modèles numériques de terrain (Bernard, 2001, Cantou, 2004).

Les scènes SPOT-HRG (60 x 60 km) sont des produits de base, qui font l'objet de prétraitement géométrique en fonction de la précision de localisation attendue: niveau 1A, 1B et 2A (http://www.spotimage.fr/html/54_93_94.php). Des couples stéréo peuvent être obtenus en produit 1A.

2.2 EROS-A1

EROS-A1 a été mis sur une orbite héliosynchrone à 480 km le 5 décembre 2000 par un lanceur russe Start-1, avec à son bord un capteur HR agile « en peigne » (<http://www.imagesatintl.com/aboutus/satellites/satellites.shtml#>). Ce capteur a un angle de visée tout azimut jusqu'à 45° , un champ de vue de $1,6^\circ$ pour une fauchée au sol de 13,5 km et fournit des images panchromatiques, élargies dans l'infrarouge, avec un échantillonnage au sol de 1,8 m au nadir (Chen & Teo, 2002, Westin *et al.*, 2002). De plus, un mode d'acquisition avec un sur- ou un hyper-échantillonnage dans un axe permet d'obtenir une résolution métrique ou sous-métrique (0,50-0,85 m), respectivement (ImageSat Intl., 2004) avec une fauchée de 9,5 km.

Par contre, comme le capteur est asynchrone avec une vitesse de déplacement au sol plus grande que la vitesse d'acquisition du capteur, le satellite doit continuellement compenser avec des variations d'attitude (principalement tangage vers l'arrière et un peu de lacet) (Figure 1). La variation de tangage pour l'acquisition d'une image de 13,5 km est de l'ordre de 30° ; ce qui crée des variations géométriques dans l'échantillonnage au sol en colonne et en ligne de l'ordre de 20% et 15%, respectivement mais aussi radiométriques (Figure 2) (Toutin *et al.*, 2002, http://www.imagesatintl.com/customersupport/techarticles/TutorialSatelliteImaging_Non-synchronousMode.pdf).

Les scènes EROS, Basic Scene (13,5 x 13,5 km), Vector Scene (13,5 x 40 km) ou Hypersampled Scene (9,5 x 9,5 km) sont des produits de base, qui font l'objet de prétraitements radiométrique et géométrique: *Raw Imagery, Radiometric System Correction, Geometric System Correction et Precision Correction (map projected)* (<http://www.imagesatintl.com/productservices/proddetail/products.shtml>). Des couples stéréo peuvent être obtenus dans le produit Radiometric System Correction.

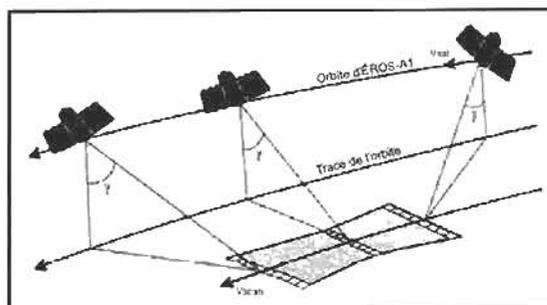


Fig. 1 Variation de l'attitude (tangage et lacet) pendant l'acquisition d'une image d'EROS-A1.

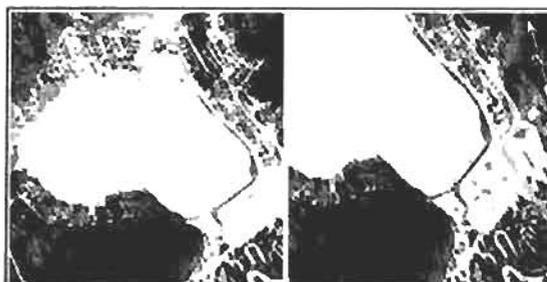


Fig. 2 Effet des variations de l'attitude (tangage et lacet) sur la géométrie et la radiométrie pendant l'acquisition d'un couple stéréo d'EROS-A1. EROS © ImageSat Intl., 2002.

2.3 OrbView-3

OrbView-3 a été mis sur une orbite hélio-synchrone quasi-polaire à 470 km le 26 juin 2003 par une fusée Pegasus[®], avec à son bord un capteur HR agile « en peigne ». Ce capteur a un angle de visée tout azimut jusqu'à 45°, un champ de vue de 1° pour une fauchée au sol de 8 km et fournit des images panchromatiques élargies dans l'infrarouge et multibandes avec un échantillonnage au sol de 1 m et 4 m au nadir, respectivement.

Les scènes OrbView (8 x 8 km) sont vendues comme produits *OrbViewBASIC*[™] et *OrbViewORTHO*[™] (avec PAs et MNT) (Hargreaves & Robertson, 2001, http://www.orbimage.com/prods/orbview_3.html). Des couples stéréo peuvent être obtenus en produit *OrbViewBASIC*[™].

2.4 IKONOS-II

IKONOS-II a été mis sur une orbite hélio-synchrone quasi-polaire à 680 km le 24 septembre 1999 par une fusée Athena-6, avec à son bord un capteur HR agile « en peigne ». Ce capteur a un angle de visée tout azimut jusqu'à 60°, un champ de vue de 1,8° pour une fauchée au sol de 10 km et fournit des images panchromatiques et multibandes avec un échantillonnage au sol de 0,82 m et 3,26 m au nadir, respectivement. Quand l'angle de visée est de 45-60°, l'échantillonnage au sol est de 1-2 m.

Les scènes IKONOS (généralement 10 x 10 km) sont vendues comme différents produits avec des précisions variables de localisation. Elles font l'objet de prétraitements radiométrique mais surtout géométrique avec ou sans contrôle terrain (points d'appui (PA), MNT) : Geo ou Geo Ortho Kit, Reference, Pro, Precision, PrecisionPlus (<http://www.spaceimaging.com/products/ikonos/index.htm>). Le produit Geo Ortho Kit est comme le produit Geo mais avec les coefficients de fonctions rationnelles, qui ont été calculés à partir de la géométrie de prise de vue (Dial & Grodecki, 2002). Des couples stéréo peuvent être obtenus en produit équivalent à Geo, mais dans une géométrie quasi-épolaire.

2.5 QuickBird

QuickBird-3 a été mis sur une orbite héliosynchrone quasi-polaire à 450 km le 18 octobre 2001 par une fusée Delta II, avec à son bord un capteur HR agile « en peigne ». Ce capteur a un angle de visée tout azimut jusqu'à 30°, un champ de vue de 1,3° pour une fauchée au sol de 16,5 km et fournit des images

panchromatiques et multibandes avec un échantillonnage au sol de 0,61 m et 2,44 m au nadir, respectivement (<http://www.digitalglobe.com/about/quickbird.html>). Les scènes QuickBird, Single Area (16,5 x 16,5 km) et *Strip* (16,5 x 165 km) sont vendues comme produits avec des précisions de localisation en fonction des prétraitements géométriques avec ou sans contrôle terrain (PA, MNT) : *Basic Imagery*, *Standard Imagery*, *Ortho Imagery*, et *DG DOQQ* (<http://www.digitalglobe.com/product/index.shtml>). Des couples stéréo peuvent être obtenus en produit *Basic Imagery*. Comme chaque bande spectrale est en fait formée à partir de trois barrettes non-alignées dans le plan focal, des corrections pour la géométrie interne des barrettes (discontinuité et décalage), pour l'optique du capteur et pour le satellite (principalement les hautes fréquences de l'attitude) sont appliquées afin d'annuler ces discontinuités de chaque bande et ce décalage entre bandes. Cela permet de créer pour le produit *Basic Imagery* une sorte de « barrette unique » dans un « plan focal idéal » (Figure 3).

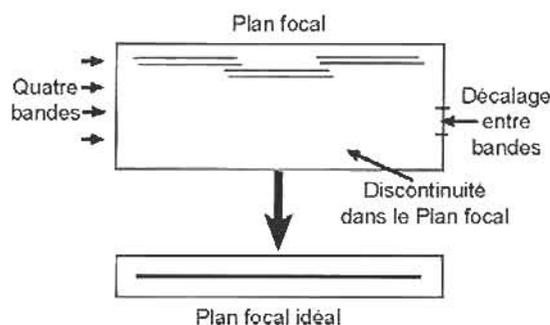


Fig. 3 Description du "plan focal idéal" pour le produit *Basic Imagery* de QuickBird.

2.6 Distorsions géométriques

Chaque système d'acquisition produit des distorsions géométriques particulières au(x) capteur(s) et à sa configuration dans le plan focal, ainsi qu'à la géométrie globale de prise de vue (capteur + plateforme + Terre). Il est quand même possible de généraliser les sources de ces distorsions, surtout quand les capteurs se ressemblent plus ou moins, comme les capteurs HR « en peigne ». Le Tableau 1 résume les deux grandes catégories (*l'Observateur* et *l'Observé*) et les sous-catégories avec les sources de distorsions (Toutin, 2004a). En plus des distorsions, on a ajouté les déformations liées à la projection cartographique, incluses logiquement dans la catégorie *l'Observé* car, les applications sont

réalisées dans une référence cartographique plane et non pas dans le géoïde.

L'ensemble de ces distorsions sont prévisibles ou systématiques et généralement bien connues et documentées (Bonneval, 1972, Billingsley, 1983, Caloz & Collet, 2001). Les distorsions reliées au satellite sont aussi bien documentées (Escobal, 1965, Centre National d'Etudes Spatiales, 1980, Light *et al.*, 1980). Les aspects d'étalonnage géométrique (orientation interne avec plan focal et externe avec précisions relative et absolue de localisation, etc.) sont généralement évalués par le propriétaire du système d'acquisition (Bonillon *et al.*, 2002, 2003, Mulava, 2004) ou par les vendeurs d'images (Hargreaves & Robertson, 2001). Cet étalonnage géométrique permet de vérifier la qualité des images pendant la durée de vie du satellite.

Tableau 1. Catégorisation des sources d'erreurs

| Catégorie | Sous-Catégorie | Sources des distorsions |
|---|---------------------------------|--|
| Observateur Ou Système D'acquisition | Satellite | Ellipse Osculatrice Attitude |
| | Capteur haute- résolution | Plan focal Angle de visée Effet panoramique |
| | Instruments de Mesure | Dérive du temps Synchronisme |
| Observé | Atmosphère | Réfraction Turbulence |
| | Terre | Courbure Rotation Topographie |
| | Carte | Géoïde Ellipsoïde |

Certaines de ces distorsions géométriques sont corrigées aux stations de réception ou par les vendeurs d'images suivant le produit-image. D'autres, celles reliées à l'atmosphère, ne sont généralement pas corrigées car, elles sont spécifiques à chaque image et aussi par manque de données sur l'atmosphère au moment de l'acquisition de l'image. En plus des ouvrages généraux précédents, la description de chaque distorsion, ainsi que leur caractérisation basse, moyenne et haute fréquences, peut être obtenue dans Bannari *et al.* (1988) et Toutin (2004a).

2.7 Prétraitements

Comme les scènes des capteurs HR sont vendues avec différents prétraitements radiométriques et géométriques avec des terminologies variables, il est utile, pour les utilisateurs, de comparer et normaliser ces différents produits en prenant comme base la terminologie adoptée pour les scènes SPOT (Tableau 2) :

- 0A: images directes du satellite sans aucune transformation radiométrique et géométrique. Toutes les méta-données (satellite, capteur et image) sont fournies. Ces données sont rarement disponibles ou que sur demande spéciale.
- 1A: images « brutes » avec normalisation et étalonnage radiométrique des détecteurs. Toutes les méta-données (satellite, capteur et image) sont fournies ;
- 1B: images « géoréférencées » suivant la trace de l'orbite et corrigées pour les distorsions systématiques de l'Observateur et de la rotation et courbure de la Terre. Quelques méta-données (satellite, capteur et image) sont fournies ainsi que sur les prétraitements ;
- 2A: images « géocodées » suivant un nord cartographique, avec les mêmes corrections que 1B plus celles reliées à la projection cartographique mais sans contrôle-terrain. Très peu de méta-données (satellite, capteur et image) sont fournies mais des données sur les prétraitements ;
- 2B: images « géocodées » suivant un nord cartographique, avec les mêmes corrections que 2A mais avec des PA. Aucune méta-donnée (satellite, capteur et image) n'est fournie mais des données sur les prétraitements et les PA ;
- 3 : images « ortho-rectifiées » suivant un nord cartographique, avec les mêmes corrections que 2B mais avec un MNT). Aucune méta-donnée (satellite, capteur et image) n'est fournie, mais des données sur les prétraitements et le contrôle terrain.

Tableau 2. Normalisation des terminologie des images de haute résolution avec leurs prétraitement

| SPOT | EROS | OrbView | IKONOS | QuickBird |
|------|-------------------------------------|---------|----------------------------|---------------------|
| 0A | Raw | | | |
| 1A | Radiometric System Correction | Basic | | Basic |
| 1B | Geometric System Correction | | | Standard |
| 2A | Precision Correction | | Geo Standard | |
| 2B | Precision Correction (map) | | Reference Pro | |
| 3 | Precision Correction (ortho) | Ortho | Precision PrecisionPlus | Ortho DG DOQQ |

Les photogrammètres préfèrent et utilisent en général les images de niveau 1A pour des traitements 3D rigoureux avec des modèles physiques basés sur les équations de colinéarité bien connues. De plus, les lois de mécanique céleste, telles les équations de Lagrange (Escobal, 1965, Centre National d'Études Spatiales, 1980, Light *et al.*, 1980), qui régissent le mouvement du satellite peuvent être intégrées dans les équations des modèles physiques. Par contre, les méthodes et les logiciels doivent être un peu adaptés pour chaque satellite et capteur et pour la transformation des méta-données. Pour ces raisons, les télédéTECTEURS préfèrent souvent les niveaux 1B et 2A, alors que les utilisateurs finaux préfèrent le niveau 3. La qualité géométrique des images de niveau 3 dépend bien évidemment des données externes utilisées: les PAs et les MNTs. Ces MNTs externes (tels ceux utilisés pour les produits *PrecisionCorrection* d'EROS, *Ortho* d'OrbView, *PrecisionPlus* d'IKONOS ou les meilleurs produits *Ortho* de QuickBird) peuvent être générés à partir d'un couple stéréoscopique. Ces MNTs externes (tels ceux utilisés pour les produits *Precision* d'IKONOS ou pour les moins bons produits *Ortho* de QuickBird) peuvent aussi être des MNTs dits mondiaux, mais insuffisamment précis pour obtenir des précisions métriques.

3. Modèles mathématiques

Des modèles et des fonctions mathématiques doivent être développés pour corriger les distorsions géométriques, qui restent dans les images: soit avec des modèles empiriques 2D/3D (polynomiales ou rationnelles), soit avec des modèles physiques et déterministes 3D rigoureux.

3.1 Modèles empiriques

Les modèles empiriques ne demandent aucune connaissance et information *a priori* de la géométrie de prise de vue : satellite, capteur, Terre et projection cartographique. Ils peuvent être donc utilisés quand aucun modèle physique n'est disponible, ou quand les paramètres du système d'acquisition ne sont pas connus ou donnés. La contre partie de ce manque de réalité physique est que ces modèles sont moins robustes et stables sur l'image entière car ils corrigent localement et ils sont sensibles aux erreurs des données. Comme les erreurs sont minimisées aux points d'appui (PA) dans le calcul des termes inconnus, ils requièrent plus de PAs que le minimum théorique et doivent être régulièrement distribués dans l'image.

Ces modèles sont basés sur différentes fonctions mathématiques, créées à partir de polynômes d'ordres variables :

- Des fonctions polynomiales 2D (P_{2D}) ;

$$P_{2D}(XY) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} X^i Y^j \quad (1)$$

- Des fonctions polynomiales 3D (P_{3D}) ;

$$P_{3D}(XYZ) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} X^i Y^j Z^k \quad (2)$$

- Des fonctions rationnelles 2D (R_{2D}) ;

$$R_{2D}(XY) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ijk} X^i Y^j}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{ijk} X^i Y^j} \quad (3)$$

- Des fonctions rationnelles 3D (R_{3D}) ;

$$R_{3D}(XYZ) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p b_{ijk} X^i Y^j Z^k} \quad (4)$$

Dans lesquelles X, Y, Z sont les coordonnées-terrain; i, j, k sont les indices incrémentaux ; m, n, p sont les ordres, avec $m+n(+p)$ étant l'ordre du polynôme, généralement trois ; $a_{ij}, a_{ijk}, b_{ij}, b_{ijk}$ sont les paramètres inconnus.

Comme le déplacement du satellite est une perspective cylindrique alors que l'acquisition d'une ligne « en peigne » est une perspective conique, l'ordre et les termes du polynôme pourraient être différents suivant chaque axe, et même au numérateur et dénominateur pour R_{3D} . Par exemple, des termes, tels que XZ, YZ pour P_{2D} ou R_{2D} , XY^2, YZ^2, Z^3 , etc. pour P_{3D} ou R_{3D} pourraient être annulés car, ces termes ne sont pas représentatifs d'un élément physique de la géométrie de prise de vue. Ces polynômes « intelligents » permettraient aux modèles empiriques de mieux refléter la géométrie de prise de vue dans les deux axes et d'éviter une sur-paramétrisation et des corrélations entre termes des polynômes. Okamoto (1981) avait déjà appliqué cette réduction de termes sur des R_{3D} pour des photographies à perspective centrale.

3.1.1 Fonctions polynomiales 2D

Les fonctions polynomiales 2D, P_{2D} avec leur formulation, sont bien connues et documentées depuis 1970, ainsi que leurs applications aux images de télédétection (Wong, 1980, Billingsley, 1983,

Caloz & Collet, 2001). Les P_{2D} du 1^{er} ordre (6 termes a_{ij}) permettent de corriger pour une rotation, une translation et une mise à l'échelle dans les deux axes ainsi qu'une obliquité. Les P_{2D} du 2^{ième} ordre (12 termes a_{ij}) permettent de corriger, en plus des distorsions précédentes, une torsion et une convexité dans les deux axes. Les fonctions du 3^{ième} ordre (20 termes a_{ij}) permettent de corriger, en plus des précédentes, d'autres distorsions, qui ne correspondent pas toujours à la réalité physique. En fait, des études ont démontré que ces P_{2D} du 3^{ième} ordre créent des erreurs dans le positionnement des ortho-images, tels SPOT-HRV (Caloz & Collet, 2001), et dans l'intégration d'images multisources HR, telles SPOT-HRV et radar aéroportés (Toutin, 1995). Ces P_{2D} sont théoriquement désuètes, même si elles sont de temps à autre utilisées.

Comme ce modèle empirique ne reflète pas la géométrie de prise de vue, et ne corrige pas les effets du relief, leur application est limitée aux images qui ont très peu, pas ou plus de distorsions, telles les images nadir et/ou des petites images acquises sur terrain plat et/ou dont les distorsions systématiques ont déjà été corrigées (1B, 2A et 2B). Telles ont été les premières applications pour les images nadir de basse-résolution d'ERTS-1 : des P_{2D} du 4^{ième} ordre étaient alors suffisants pour approximer un modèle physique 2D (Kratky, 1971, Wong, 1975) car, les précisions recherchées n'étaient que de plusieurs pixels.

Par contre, des P_{2D} du 1^{er} ordre appliquées à des images IKONOS Geo (2A) (Hanley & Fraser 2001) ont quand même donné de bons résultats parce que les images de niveau 2A avaient été acquises sur un terrain plat avec un faible angle de prise de vue. Par conséquent, toutes les distorsions géométriques étaient plus ou moins corrigées, justifiant ainsi l'utilisation et l'applicabilité des P_{2D} du 1^{er} ordre. Dans une autre expérience, une image IKONOS Geo (2A) acquise avec un angle de 15° sur une dénivelé plus importante de 450 m, a été testée avec des P_{2D} du 1^{er} au 4^{ième} ordre et en faisant une correction d'altitude par rapport à un plan moyen (Shi & Shaker, 2003). La précision calculée seulement sur 20-30 points de vérification était de l'ordre d'un pixel ou mieux. Mais comme les 20-30 points étaient distribués dans les altitudes basses du terrain (0-150 m), les résultats sont alors biaisés et non représentatifs du terrain en entier et particulièrement en montagne.

L'extrapolation à d'autres images et type de terrain (grandes images, produit-image 1A avec beaucoup de distorsions géométriques, grande visée latérale,

terrain montagneux) n'est donc pas recommandé, surtout en mode opérationnel : aucun résultat n'a, en fait, été publié avec de telles images 1A d'EROS, de SPOT5 ou de QuickBird.

3.1.2 Fonctions polynomiales 3D

Les fonctions polynomiales 3D, P_{3D} , sont en fait une extension des P_{2D} en ajoutant les termes reliés à la troisième dimension, l'altitude Z. Les P_{3D} , du 1^{er}, 2^{ième} et 3^{ième} ordre ont alors 8, 20 et 40 termes inconnus a_{ijk} respectivement. Par contre, les termes en Z des P_{3D} peuvent être réduits au seul terme a_z car, les autres (XZ, YZ, Z^2) n'ont pas de réalité physique. Les P_{3D} sont aussi sujettes aux mêmes problèmes et difficultés d'applications que les P_{2D} , excepté pour le relief du terrain : taille limitée des images, prétraitement niveau 1B ou 2, beaucoup de PAs (au moins 20 pour le 3^{ième} ordre), correction locale aux PAs, manque de cohérence et de robustesse en mode opérationnel.

Dans les années 1960, des P_{3D} conformes du 2^{ième} ordre ont été utilisées avec des photos aériennes avec une réduction de termes (Baestlé, 1966, Schut, 1966). Vingt ans plus tard, Kratky (1989) a développé des P_{3D} avec une réduction de termes pour approximer son modèle physique 3D de SPOT. La raison principale était que, comme son modèle physique 3D n'était pas inversible, l'implémentation en temps réel sur ordinateur était impossible. Il n'aurait certainement pas eu besoin de cette approximation polynomiale de nos jours. Des P_{3D} du 2^{ième} ordre ont aussi été testées sur des images SPOT-HRV 1B (Palà & Pons, 1995). L'évaluation de la méthode (de l'ordre du sous-pixel) est biaisée car, elle n'a été effectuée que sur les PAs. Plus récemment, les P_{3D} de Kratky ont été testés sur des images d'IKONOS Geo (2A) acquises avec des angles faibles de prises de vue sur des terrains montagneux (Kersten et al., 2000, Vassilopoulou et al., 2002). La deuxième étude a évalué les ortho-images par rapport aux PAs, suivant leur nombre, leur définition et leur précision de pointé sur l'image. Mais l'évaluation des erreurs (de l'ordre de 1-2 m) est biaisée car, les PAs ont servi à calculer les termes inconnus des P_{3D} . De plus, cette étude a montré qu'un P_{3D} affine du 1^{er} ordre donnait les mêmes résultats que le P_{3D} de Kratky du 4^{ième} ordre mais avec beaucoup moins de PAs, car en fait, les images IKONOS Geo n'ont plus que les distorsions d'altitude, en plus d'une rotation-translation.

Comme, mis à part une rotation-translation-mise à l'échelle, il ne reste que les distorsions d'altitude dans

les images de niveau 1B et 2, des P_{3D} du 1^{er} ordre seraient théoriquement suffisants, en fonction des conditions d'expérience, de la précision et de la robustesse recherchées. Des P_{3D} du 2^{ième} ordre pourraient être aussi utilisées pour corriger des erreurs résiduelles des prétraitements. Des tests ont alors confirmé que des précisions métriques et plus pouvaient être obtenues avec des images IKONOS *Geo* et des P_{3D} du 1^{er} ordre (Ahn *et al.*, 2001, Fraser *et al.*, 2002, Jacobsen, 2002, Vassilopoulou *et al.*, 2002) ou du 4^{ième} ordre (Kersten *et al.*, 2000, Vassilopoulou *et al.*, 2002). La plupart des tests, hormis les deux derniers, étaient sur des reliefs plats à modérés : aucune raison géométrique ne justifie alors l'utilisation du 4^{ième} ordre avec des termes du style XYZ^2 , Z^4 , etc. sur des terrains montagneux. Par contre comme on pouvait théoriquement s'y attendre avec des images de niveau 1A sans prétraitement des distorsions systématiques, de mauvais résultats ont été obtenus avec des images de QuickBird *Basic Imagery* (Noguchi *et al.* 2004). Bien qu'aucun test avec des P_{3D} n'ait été effectué avec des images de SPOT5 1A (trop grande) ou d'EROS (trop de variations d'attitude), qui ont encore plus de distorsions géométriques, on peut s'attendre à des résultats semblables ou pires qu'avec Quick-Bird *Basic Imagery*.

3.1.3 Fonctions rationnelles 2D

Les fonctions rationnelles 2D sont en fait des extensions des fonctions projectives (R_{2D} du 1^{er} ordre) bien connues en photogrammétrie. Ces fonctions ont à peu près les mêmes limites d'applicabilité et d'opération que les P_{2D} , et ne devraient donc être utilisées qu'avec des images de niveau 1B et 2 acquises sur des terrains plats. Ces limites font que ces R_{2D} sont théoriquement, mais aussi pratiquement, dépassées de nos jours, et principalement si on recherche une grande précision et en mode opérationnel. Mais, des fonctions projectives ont été quand même testées sur des images IKONOS *Geo* (Hanley & Fraser 2001, Fraser *et al.*, 2002, Shi & Shaker, 2003), ainsi que des fonctions projectives hybrides sur des images IKONOS *Geo* et IRS-1C (Valadan Zoej *et al.* 2002). Des résultats acceptables (de l'ordre du pixel) ont été obtenus, parce que les images prétraitées 2A avaient aussi été acquises avec un angle de prise de vue quasi-vertical et sur des terrains plats, limitant ainsi l'extrapolation de ces fonctions R_{2D} à d'autres données HR et d'autres types de terrain et de relief. Aucun test n'a été effectué sur d'autres images de HR de niveau 1A.

3.1.4 Fonctions rationnelles 3D

Les fonctions rationnelles 3D, R_{3D} , ont été utilisées sporadiquement dans les années 1980 pour les photographies à perspective centrale à une dimension (Okamoto, 1981), puis pour les capteurs « en peigne » (Okamoto, 1988). La réduction de termes avait été appliquée pour tenir compte des géométries. Vingt ans plus tard comme alternative au modèle physique, ces R_{3D} reviennent à la mode pour les images IKONOS car, ses paramètres de prise de vue ne sont pas inclus dans les méta-données. Comme il y a deux polynômes par équation, les R_{3D} (a_{ijk} et b_{ijk}), du 1^{er}, 2^{ième} et 3^{ième} ordre ont alors 16, 40 et 80 termes inconnus, respectivement; le double des P_{3D} . Il y a des désavantages à ces R_{3D} (Madani, 1999) :

- Les distorsions locales, comme par exemple les variations d'attitude de haute fréquence, ne sont pas modélisées ;
- Les paramètres n'ont pas de sens physique et sont durs à interpréter ;
- Une sur-paramétrisation et une corrélation entre termes ;
- Une instabilité ou une division par zéro quand le polynôme du dénominateur tend vers zéro ("zero crossing") ; et
- Des limites d'application aux grandes images.

Différentes stratégies permettent de réduire l'impact de ces désavantages. Les R_{3D} peuvent être appliquées aux images avec très peu de distorsions géométriques, telles les images de niveau 1B et 2, plutôt qu'aux images de niveau 1A avec toutes les distorsions. Les grandes images, comme celles de SPOT5, peuvent être découpées en sous-images avec des R_{3D} pour chaque sous-image (Yang, 2001). Ce qui crée un autre désavantage: plus de traitements géométriques et radiométriques et de contrôle-terrain si nécessaire. Pour éviter la sur-paramétrisation et l'instabilité du "zero-crossing", les termes corrélés et non significatifs peuvent être retirés des R_{3D} suivant la géométrie du capteur (Downman & Dolloff, 2000), une méthode identique à la réduction de termes en fonction de la géométrie du capteur, utilisée dans les années 1980. Pour résoudre une partie de ces problèmes, un modèle de géométrie d'images, dit « universel » en temps réel, basé sur des R_{3D} d'ordre variable, a été développé (OGC, 1999). Ce modèle dynamique, dont les termes peuvent être choisis en fonction du capteur, est ensuite calculé de façon itérative en retirant les termes non significatifs. De plus, comme le polynôme du dénominateur peut être, sur des bases statistiques, très simplifié et même

entièrement retiré - et en général il l'est - ces R_{3D} deviennent alors des simples P_{3D} , comme celles utilisées dans les années 1960.

Downman & Dolloff (2000) ont évalué les caractéristiques positives de ce modèle universel, telles l'universalité, la confidentialité et l'efficacité pour le transfert d'information, tout autant que les négatives, telles la perte de précision (toute approximation entraîne des erreurs), l'instabilité numérique de la solution, le manque d'adaptation aux images avec beaucoup de distorsions (mode asynchrone), l'incertitude (pas de relation physique des paramètres), la complexité (définition de la grille pour les PAs) en plus de celles mentionnées pour les P_{2D} et P_{3D} . Alors que ce modèle dit «universel» devient de plus en plus populaire dans une petite partie de la communauté de photogrammétrie et de télédétection (distributeurs d'images, vendeurs de systèmes et universités anglosaxonnes), il est intéressant de remarquer que les caractéristiques positives sont d'ordre politique et commerciale alors que les négatives sont d'ordre scientifique...

Les R_{3D} peuvent être alors utilisées et calculées selon deux approches (Madani, 1999) :

- Par approximation d'un modèle physique 3D déjà résolu ; ou
- Par calcul des termes inconnus avec des PAs.

La première approche, qui ne dépend théoriquement d'aucune donnée-terrain, est appelée «terrain-indépendante», à tort (voir plus bas), et se résout en deux étapes. En premier, une grille 3D régulière du terrain est définie et leurs coordonnées image 2D sont calculés avec le modèle physique déjà calculé. Tous les points de cette grille sont ensuite utilisés comme PAs pour calculer par moindres carrés les termes des R_{3D} .

Cette approche est utilisée par les agences gouvernementales et certains vendeurs d'images HR, qui ne veulent pas divulguer d'information sur le satellite et le capteur. A partir de 2001, le produit IKONOS *Geo Ortho Kit* avec des R_{3D} du 3^{ième} ordre a été développé pour des raisons de commercialisation (Grodecki & Dial, 2003) et plus tard, deux des autres vendeurs d'images HR ont suivi avec les images *OrbViewBASIC™* et *QuickBird Basic Imagery* (Hargreaves & Robertson, 2001, Robertson, 2003). L'utilisateur peut alors traiter une image ou des blocs d'images pour créer des ortho-images avec MNT. Mais comme des biais et des erreurs, qui peuvent être corrélés avec l'altitude, existent encore après le traitement avec les R_{3D} , des post-traitements doivent être effectués pour retirer ces erreurs avec quelques PAs précis (au moins un) (Fraser *et al.*, 2002) ou les

termes des R_{3D} peuvent être améliorés avec des équations linéaires et quelques PAs précis (Lee *et al.*, 2002). Cette deuxième étape de traitement avec des PAs mais aussi l'utilisation d'un MNT ne justifient pas l'appellation de « terrain-indépendante » pour cette approche.

En plus des évaluations par les vendeurs d'IKONOS (Grodecki & Dial, 2003) et de QuickBird (Robertson, 2003), cette approche a été testée dans des conditions universitaires avec des images IKONOS *Geo Ortho Kit* (Fraser *et al.*, 2002, Tao & Hu, 2002) ou des images QuickBird *Basic* (Noguchi *et al.*, 2004) acquises sur terrain plat et en utilisant les R_{3D} fournies. Mais Tao & Hu (2002) n'ont obtenu que 2,2 m d'erreurs de positionnement horizontal avec un biais de 7 m en traitant des images stéréo IKONOS *Geo Ortho Kit*. Pareillement, Kim & Muller (2002) ont obtenu une erreur de 5 m calculées sur des PVs précis au mètre, même quand les termes des R_{3D} sont améliorés avec des PAs. Noguchi *et al.* (2004) n'ont obtenu des résultats encourageants sur terrain plat avec une dénivelé de 240 m qu'après avoir corrigés les R_{3D} avec six PAs mais, ils ont noté la présence d'erreurs systématiques non-expliquées. Ces résultats ne sont pas en accord et souvent moins bons que ceux (1m et moins) annoncés par Grodecki & Dial (2003) et Fraser *et al.* (2002) avec IKONOS ou Robertson (2003) avec QuickBird.

Finalement, Barbarella *et al.* (2003) ont constaté que le modèle physique 3D dans PCI Geomatica donnaient des ortho-images plus précises d'IKONOS (1,1 m \pm 0,6 m d'erreurs moyennes) et de QuickBird (1,4 m \pm 1,2 m d'erreurs moyennes) vérifiées sur 40-50 PAs, que celles créées avec les R_{3D} du 3^{ième} ordre fournies avec les images (4,2 m \pm 2,5 m d'erreurs moyennes).

Quand les R_{3D} ne sont pas fournies avec les images (photos, SPOT, EROS), l'utilisateur peut les calculer à partir de son modèle physique 3D déjà résolu avec des PAs. Même si c'est un cas peu utile en mode opérationnel car, l'utilisateur doit déjà avoir un modèle physique, cela a été testé dans un cadre universitaire avec des photographies aériennes et des images SPOT-HRV en calculant les termes inconnus des R_{3D} du 1er et 3^{ième} ordre respectivement, à partir d'un modèle physique 3D déjà résolu (équations de colinéarité) pour ces images (Tao & Hu, 2001). Aucun autre test n'a été effectué sur d'autres images HR de niveau 1A (EROS, SPOT5) à cause de l'incapacité des R_{3D} à modéliser les distorsions de haute fréquence des images de niveau 1A (Madani, 1999, Downman & Dolloff, 2000).

La deuxième approche, appelée « terrain-dépendante », peut être réalisée par l'utilisateur de la même façon qu'on calcule des modèles physiques ou polynomiaux. Comme il y a 40 et 80 termes inconnus pour le 2^{ième} et 3^{ième} ordre, on doit utiliser un minimum théorique de 20 et 40 PAs, respectivement. Mais à cause des désavantages inhérents aux modèles empiriques (ne reflète pas la géométrie, sensible au nombre, distribution et précision des PAs, corrige localement mais pas entre les PAs, etc.) (Petrie, 2002), un plus grand nombre de PAs que le minimum théorique est donc requis pour réduire la propagation des erreurs. La méthode de découpage en sous-images (Yang, 2001) devrait aussi être utilisée pour SPOT-5 et EROS : ce qui multiplie le nombre de PAs proportionnellement au nombre de sous-images. Ces deux aspects rendent cette deuxième approche des R_{3D} inadéquate en mode opérationnel.

Pourtant, certaines études académiques ont démontré la faisabilité de cette deuxième approche avec des images IKONOS *Geo* (Fraser *et al.*, 2002, Tao & Hu, 2002). Ces résultats sont, toutefois, obtenus avec des images, quelquefois proches du nadir, acquises sur des terrains plats. De plus, la solution et les résultats sont fonctions du relief, du nombre et de la distribution des PAs (Tao & Hu, 2002), tant pour SPOT que pour IKONOS. Pour IKONOS, les résultats R_{3D} des 3^{ième} ordre n'étaient pas meilleurs que ceux obtenus avec des fonctions affines P_{3D} du 1^{ière} ordre, comme prévu théoriquement. Mais comme beaucoup d'information sur les conditions d'expérimentation ne sont pas toujours explicitement données dans les articles (tels que les caractéristiques géométriques des images et leurs prétraitements, la source, la distribution et le nombre de PAs, la source, la distribution et le nombre de points de vérification (PV), la dimension et le relief du terrain, et quelquefois même l'ordre du polynôme, etc.), ces études n'apparaissent pas indiscutables et rendent très difficiles l'extrapolation et l'adaptation de cette deuxième approche à d'autres expériences. D'un autre côté, beaucoup d'études réalisées par des utilisateurs montrent des résultats avec différentes images HR moins cohérents et de moins bonne qualité (Kristóf *et al.*, 2002, Petrie, 2002, Toutin *et al.*, 2002, Davis & Wang, 2003, Wolniewicz, 2004 et d'autres non publiés). Kristóf *et al.* (2002) ont obtenu une erreur de 5 m calculées sur des PVs précis au mètre. Petrie (2002) reporte avec les R_{3D} de grandes erreurs entre les PAs pour différentes images HR. Toutin *et al.* (2002) ont toujours obtenu de meilleurs résultats de modélisation et plus cohérents avec un

modèle physique 3D (Toutin, 2003a) qu'avec des R_{3D} , que ce soit avec EROS, IKONOS ou QuickBird; de même pour Wolniewicz (2004) avec des images IKONOS et QuickBird. Davis & Wang (2003) a remarqué des incohérences et des erreurs non-expliquées dans les ortho-images IKONOS traitées avec des R_{3D} , alors qu'elles n'existaient pas quand les images étaient traitées avec un modèle physique 3D.

Comme les résultats académiques et des vendeurs pour les deux approches des R_{3D} ne sont pas toujours confirmés par les résultats des utilisateurs, l'extrapolation à toute condition de prise de vue (principalement les angles supérieurs à 10), de prétraitements d'images (principalement le niveau 1A), de terrain (principalement les montagneux), et de données cartographiques est pour le moment hasardeux en milieu opérationnel sans vérifications ultérieures par d'autres utilisateurs.

3.2 Modèles physiques 3D

Les modèles physiques 3D, qui sont utilisés pour les corrections géométriques, peuvent varier suivant le système d'acquisition et le type d'images. Des modèles différents peuvent être développés en fonction des caractéristiques de chacun : agile (OrbView, IKONOS et Quickbird), latéral (SPOT5-HRG), avant-arrière (SPOT5-HRS) ou asynchrone (EROS). Mais comme ce sont tous des capteurs « en peigne », un modèle général peut être développé en tenant en compte toutes les caractéristiques. Ces modèles physiques sont en général développés pour les images de niveau 1A mais, des adaptations peuvent être effectuées pour tenir compte des prétraitements des niveaux 1 B et 2. La solution généralisée permettra une adaptation plus facile aux nouveaux capteurs, comme Pléiades-HR, CartoSat, etc. et aux prétraitements.

Le modèle physique doit prendre en considération toutes les distorsions géométriques de la plate-forme (position, vitesse, attitude), du capteur (champ de vue instantané ou focale, champ de vue total, angles de prise de vue et effet panoramique), de la terre (courbure, rotation, relief). Les déformations de la projection cartographique peuvent être aussi considérées car, les images sont généralement utilisées dans des références cartographiques planes. La modélisation peut s'effectuer distorsion par distorsion et étape par étape, par groupe de distorsions en quatre étapes (satellite, capteur, Terre, projection) ou toutes les distorsions ensemble en une seule étape. Les premières solutions sont généralement préférées aux stations de réception ou par les

vendeurs, alors que la dernière est préférée par les utilisateurs. En fait, il est préférable de considérer la géométrie totale de prise de vue car certaines distorsions sont corrélées entre elles et ont le même effet au sol. Il est théoriquement plus précis de calculer un terme « combiné » plutôt que chaque composante de ce terme « combiné » séparément, évitant ainsi la surparamétrisation et la corrélation entre termes. Des exemples non-exhaustifs de corrélation entre termes sont :

- L'orientation de l'image par rapport au nord cartographique est une combinaison de l'inclinaison osculatrice orbitale, du lacet, de l'angle de visée et de la convergence des méridiens;
- Le facteur échelle dans la direction du satellite est une combinaison de la vitesse, l'altitude et le tangage du satellite, du temps d'intégration des détecteurs, de la composante de la rotation de la Terre ;
- L'angle de nivellement dans la direction du capteur est une combinaison du roulis, de la composante latérale de l'angle de visée, de la courbure de la Terre et de l'ellipsoïde: etc.

Depuis 2000, un certain nombre de recherches a été effectué pour modéliser les nouveaux capteurs HRVIR: SPOT5 (Bouillon *et al.*, 2002, Cantou, 2004, Nonin & Picard, 2003, Toutin, 2004b); EROS (Chen & Teo 2002, Westin & Forsgren, 2002, Toutin, 2004b); OrbView (Haergreaves & Robestso 2001, Mulava, 2004); IKONOS (Toutin & Cheng, 2000, Toutin, 2003a, b); QuickBird (Toutin & Cheng, 2002, Jacobsen, 2003, Robertson, 2003, Toutin, 2005).

Les précisions obtenues, vérifiées avec des données de validation diverses, pour ces différentes modélisations sont en général de l'ordre de la fraction de pixel. Comme les modèles physiques 3D représentent la réalité de prise de vue, ils sont robustes sur l'ensemble de l'image et ne créent pas d'erreurs locales. En général, ils ne requièrent que peu de PAs, qui doivent être collectés sur toute l'image pour éviter les extrapolations, mais pas obligatoirement avec une distribution régulière. Ils filtrent aussi les erreurs d'entrée et donnent des résultats plus cohérents dans des conditions opérationnelles.

Le point de départ de la modélisation mathématique est généralement les équations de colinéarité bien connues pour les images VIR (Bonneval, 1972, Wong, 1980) :

$$x = (-f) \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (5)$$

$$y = (-f) \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (6)$$

dans lesquelles : (x, y) sont les coordonnées image ; (X, Y, Z) sont les coordonnées-terrain ; (X_0, Y_0, Z_0) sont les coordonnées du centre perspectif ; $-f$ est la focale et $[m_{ij}]$ sont les neuf éléments de la matrice orthogonale de rotation.

Les équations de colinéarité sont valides pour les perspectives coniques comme une ligne d'image d'un capteur « en peigne ». Mais comme les lignes successives de l'image sont fortement corrélées, il est possible de relier les centres perspectifs et les angles de rotation des différentes lignes de l'image en intégrant les éphémérides et les données d'attitude du satellite. Cette intégration permet alors de décorrélérer et de réduire le nombre de termes inconnus et de finaliser avec un couple d'équations par image. L'intégration des différentes distorsions et le développement mathématique des équations finales peuvent être trouvés pour chaque capteur et chaque modèle dans les références données précédemment.

De plus, à partir des lois de mécanique céleste et des équations de Lagrange (Escobal, 1965, Centre National d'Études Spatiales, 1980, Light *et al.*, 1980) les éphémérides (position et vitesse) peuvent être transformées en paramètres orbitaux osculateurs (Guichard, 1983, Toutin, 1985), qui déterminent une ellipse osculatrice à l'orbite réelle à chaque instant. Puisque les équations de Lagrange tiennent compte des variations gravitationnelles du potentiel terrestre pour lier les différentes positions du satellite sur son orbite pendant la formation de l'image, cette solution avec une ellipse osculatrice est meilleure et plus robuste que d'utiliser une ellipse constante avec des polynômes du 2^{ième} ordre en fonction du temps. Ceci est encore plus vrai pour le traitement de longs segments d'images, comme ceux de QuickBird *Strip*, ou de bloc d'images (Toutin 2003b, Cheng *et al.*, 2003).

4. Conclusions

Depuis le lancement en 1999 du premier satellite civil avec un capteur HR-VIR, il y a eu un certain nombre de changements dans le traitement géométrique 3D des images de télédétection pour arriver à des précisions métriques et sous-métriques. Depuis plus de trente ans, deux types de modèles très différents sont utilisés pour modéliser la géométrie de prise de vue des images de télédétection : les modèles physiques et déterministes et les modèles empiriques et statistiques. Les premiers ont fait l'objet de nombreuses recherches pour toute sorte de capteurs et sont fréquemment utilisés. Les seconds l'ont été au début avec les images de moyenne résolution quand la précision recherchée n'était pas trop grande. De plus les modèles empiriques basés sur des fonctions rationnelles ont aussi été sporadiquement utilisés avec des images HR-VIR, mais avec un cycle d'utilisation de 20 ans : dans les années 1960 pour les photographies aériennes, dans les années 1980 pour SPOT-HRV et maintenant dans les années 2000 pour les capteurs HR. Les avantages principaux des modèles physiques proviennent du fait que les fonctions mathématiques sont développées en fonction de la réalité physique de la prise de vue. Comme les termes des modèles sont des fonctions des différentes distorsions géométriques, ils ont un sens physique, et peuvent être facilement interprétés pour la détection des erreurs. Dans le sens inverse, les paramètres des modèles empiriques, en particulier les fonctions rationnelles, ne correspondent à aucune réalité physique (Madani, 1999, Dowman & Dolloff, 2000). De nombreuses recherches avec des images de basse et moyenne résolution et maintenant de haute résolution (Chen & Teo, 2002, Petrie, 2002, Toutin *et al.*, 2002, Barbarella *et al.*, 2003, Davis & Wang, 2003, Jacobsen, 2003, Wolniewicz, 2004), des articles de synthèse (Bannari *et al.*, 1995, Toutin, 2004a), ainsi que des ouvrages généraux (Billingsley, 1983, Caloz & Collet, 2001) et d'autres vont tous dans ce sens et/ou ont démontré la supériorité des modèles physiques.

De plus Dowman & Dolloff (2000) mentionnent qu'il n'y a pas unanimité sur le rôle et l'utilisation des fonctions rationnelles comme standard universel, alors que le consensus semble être en faveur des modèles physiques et déterministes, mais que les fonctions rationnelles peuvent être incontournables pour certains capteurs. En d'autres mots, les modèles physiques, si disponibles, devraient être le premier choix. En fait, la paramétrisation mathématique de modèles physiques a toujours été un aspect important dans la recherche scientifique et ses accomplissements!

Références

- Ahn C.-H., Cho S.-I., & Jeon J. C. (2001) Orthorectification Software Applicable for IKONOS High-Resolution Images : GeoPixel-Ortho. *Proceedings of IGARSS'01, Sydney, Australia, 9-13 July* (Piscataway, NJ, USA: IEEE), pp.555-557
- Baetslé PL (1966) Conformal Transformations in Three Dimensions. *Photogrammetric Engineering*, vol. 32, pp. 816-824.
- Bannari A, Morin O., Béné G.B. & Bonn F.J. 1995, A Theoretical Review of Different Mathematical Models of Geometric Corrections Applied to Remote Sensing Images, *Remote Sensing Reviews*, vol. 13, pp. 27-47.
- Barbarella M., Mancini, F. & Zanni M. (2003) Processing of High Resolution Satellite Data for Map Updating, *Proc. of 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 10-14 November, Honolulu, Hawaii, CD-ROM, (Paper TS-4.3).
- Bernard M. (2001) Instruments HRS et MNT sur SPOT5. *Bull. SFPT*, N° 164-165, pp. 32-34.
- Billingsley F.C. (1983) Data Processing and Reprocessing, *Manual of Remote Sensing*, 2nd Edition, Vol. 1, Editor-in-chief RN. Colwell, (Falls Church, Virginia, USA : Sheridan Press), pp. 719-722.
- Bonneval H. (1972) Levés topographiques par photogrammétrie aérienne, *Photogrammétrie générale : Tome 3*, Collection scientifique de l'Institut Géographique National, (Paris, France: Eyrolles Editeur) 309 pages.
- Bouillon A, Breton E., Lussy F. de & Gachet R (2002) SPOT5 HRG and HRS first in-flight geometric quality results, *Proc. SPIE, Vol. 4881A Sensors, system, and Next Generation Satellites VII*, Agia Pelagia, Crete, Greece, September 22-27 (Bellingham, WA: SPIE), CD-ROM (Paper 4881A-31).
- Bouillon A, Breton E., Lussy F. de & Gachet R. (2003) SPOT5 geometric image quality, *Proc. of the IEEE-IGARSS 2003*, Toulouse, France, 3 pages, CD-ROM
- Caloz R. & Collet C. (2001) Transformations géométriques, *Précis de télédétection, Volume 3: Traitements numériques d'images de télédétection*, (Ste Foy, Québec, Canada: Presse de l'Université du Québec), pp. 77-105.
- Cantou J.P. (2004) Potentiel altimétrique des images Spot 5 et Pléiades-HR: Bilan des études techniques pilotées par le CNES. *Bull. SFPT*, N° 173-174, pp. 64-71.

- Centre National d'Études Spatiales (1980) Le mouvement du véhicule spatial en orbite. (Toulouse, France: CNES), 1031 pages.
- Chen L.-C. & Teo T.-A (2002) Rigorous Generation of Orthophotos from EROS-A High Resolution Satellite Images. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Ottawa, Canada, July 8-12 (Natural Resources Canada: Ottawa, Ontario) Vol. 34 (B4), pp. 620-625.
- Cheng P., Toutin T., Zhang Y. & Wood M. (2003) QuickBird...Geometric Correction, Path and Block Processing and Data Fusion, *Earth Observation Magazine*, vol. 12, N° 3, pp. 24-30.
- Davis C. H. & Wang X. (2003) Planimetric Accuracy of IKONOS 1 m panchromatic ortho-image products and their utility for local government GIS basemap applications, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, W 22, pp. 4267-4278.
- Dial G. & Grodecki J. (2002) Block adjustment with rational polynomial camera models, *Proceedings of the ACSM-ASPRS Annual Conference/XXII FIG International Congress*, Washington D.C., USA, April 19-26 (Bethesda, MD: ASPRS), CD-ROM.
- Dowmann I. & Dolloff J. (2000) An evaluation of rational function for photogrammetric restitution, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, The Netherlands, July 16-23 (Amsterdam, The Netherlands: GITC) vol. 33 (B3), pp. 254- 266.
- Escobal P.R. (1965) Methods of orbit determination. vol. (Malabar, USA: Krieger Publishing Company), 478 pages.
- Fraser C. S., Hanley H. B. & Yamakawa T. (2002) Threedimensional ge positioning accuracy of IKONOS imagery, *Photogrammetric Record*, vol. 17, pp. 465-479.
- Fritz L. W. (1996) The era of commercial earth observation satellites, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 62, N°1, pp. 39-45.
- Guichard H. (1983) Etude théorique de la précision dans l'exploitation cartographique d'un satellite à défilement: application à SPOT, *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol. 90, pp. 15-26.
- Grodecki J. & Dial G. (2003) Block adjustment of highresolution satellite images described by rational functions, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 69, W1, pp.59-68.
- Hanley H.B. & Fraser C.S. (2001) Geopositioning accuracy of IKONOS imagery: Indications from two dimensional transformations, *Photogrammetric Record*, vol. 17, pp. 317329.
- Hargreaves D. & Robertson B. (2001) Review of Quickbird-112 and Orbview-314 Products from MacDonald Dettwiler Processing Systems, *Proc. of the ASPRS Annual Conference*, St Louis, Missouri, USA, April 23-27 (Bethesda, MD: ASPRS), CD-ROM (unpaginated).
- Jacobsen K. (2002) Generation of Orthophotos with Carterra Geo Images Without Orientation Information, *Proceedings of the ACSM-ASPRS Annual Conference/XXII FIG International Congress*, Washington D.C., USA, April 19-26 (Bethesda, MD: ASPRS), CD-ROM (unpaginated).
- Jacobsen K. (2003) Orthoimages and DEM by QuickBird and IKONOS, *Proc. of the 23th EARSeL Symposium: Remote sensing in transition*, Millpress Ed., Ghent, Belgique, 2-7 June, pp. 513-525
- Kaufmann V. & Sulzer W. (1997) Über die Nutzungsmöglichkeit hochauflösender amerikanischer Spionage-Satellitenbilder (1960-1972), *Vermessung und Geoinformation*, vol. 3, pp.166-173.
- Kersten T., Baltsavias E., Schwarz M. & Leiss I. (2000) Ikonos-2 Cartera Geo - Erste geometrische Genauigkeitsuntersuchungen in der Schweiz mit hochaufgelösten Satellitendaten, *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, vol.8, pp. 490-497.
- Konecny G. (2000) Mapping from space, *Remote Sensing for Environmental Data in Albania: A Strategy for Integrated Management*, 06-10 October, Tirana, Albania, (NATO Science Series, Vol. 72, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands), pp. 41-58.
- Kratky W. (1971) Precision Processing of ERTS Imagery, *Proceedings of ASP-ACSM Fall Convention*, San Francisco, Ca, September 7-11 (Falls Church, Va: ASP) pp. 481-514.
- Kratky W. (1989) On-line aspects of stereophotogrammetric processing of SPOT images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, pp. 311-316.
- Latry C. & Rougé B. (1998) SPOT5 THR mode, *Proc. Of SPIE* 1998, vol. 3439, pp. 480-492.
- Lee J.-B., Huh Y., Seo B. & Kim Y. (2002) Improvement the Positional Accuracy of the 3D Terrain Data Extracted From IKONOS-2 Satellite Imagery, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Graz, Austria,

- Septembre 9-13 (Institute for Computer Graphics and Vision: Graz, Austria) vol. 34 (B3), pp. B142-B145.
- ImageSat International (2004) Hypersampled Imagery International Patent Application No. IL03/00354.
- Light D.L., Brown O., Colvocoresses A., Doyle F., Davies M., Ellasal A., Junkins J., Manent J., McKenney A., Undrejka R. & Wood G. (1980) Satellite Photogrammetry, in *Manual of Photogrammetry 4th Edition*, Chapitre XVII, Editor in chief: C.C. Slama, ASP Publishers, Falls Church, USA, pp. 883-977.
- Madani M. (1999) Real-Time Sensor-Independent Positioning by Rational Functions. *Proceedings of ISPRS Workshop on Direct Versus Indirect Methods of Sensor Orientation*, Barcelona, Spain, November 25-26 (Barcelona, Spain: ISPRS) pp. 64-75.
- Mulava D. (2004) On-orbit geometric calibration of the OrbView-3 high-resolution imaging satellite. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 35 (B1), CD-ROM, pp.1-6.
- Noguchi M., Fraser C.L., Nakamura T., Shimono T. & Oki S. (2004) Accuracy assessment of QuickBird stereo imagery. *Photogrammetric Record*, vol. 19, N° 106, pp. 128-138.
- Nonin Ph. & Piccard S. (2003) Performance analysis of DEM automatic extraction from SPOT5 sensors. *Proc. of the IEEEIGARSS 2003*, Toulouse, France, 3 pages, CD-ROM
- CGC (1999) The Open GISTM Abstract Specifications: The Earth Imagery Case, vol. 7, <http://www.openais.org/techno/specs/html/>
- Okamoto A. (1981) Orientation and Construction of Models. Part III: Mathematical Basis of the Orientation Problem of One Dimensional Central Perspective Photographs. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 47, pp. 1739-1752.
- Okamoto A. (1988) Orientation Theory of CCD Line-Scanner Images. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Kyoto, Japan, July 3-9 (Japan: ISPRS) vol. 27 (B3), pp. 609- 617.
- Palà V. & Pons X. (1995) Incorporation of Relief in PolynomialBased Geometric Corrections. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 61, pp. 935-944.
- Petrie G. (2002) The ACSM-ASPRS Conference: A Report on the Washington Meeting. *Geoinformatics*, vol. 5, N° 6, pp. 4243.
- Robertson B. (2003) Rigorous geometric modelling and correction of QuickBird imagery. *Proc. of the IEEE-IGARSS 2003*, Toulouse, France, 6 pages, CD-ROM.
- Shi W. & Shaker A. (2003) Analysis of terrain elevation effects on Ikonos imagery rectification accuracy by using non-rigorous models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 69, W 12, pp. 1359-1366.
- Schut G. H. (1966) Conformal Transformations and Polynomials. *Photogrammetric Engineering*, vol. 32, pp. 826829.
- Tao V. & Hu Y. (2001) A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 67, pp. 1347-1357.
- Tao V. & Hu Y. (2002) 3D Reconstruction Methods Based on the Rational Function Model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 68, pp. 705-714.
- Toutin Th. (1985) Analyse mathématique des possibilités cartographiques du système SPOT. *XYZ, Revue de l'Association Française de Topographie*, vol. 25, pp. 53-66.
- Toutin Th. (2003a) Error tracking in IKONOS geometric processing using a 3D parametric modelling. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 69, W 1, pp. 43-51. <http://www.ccrs.nrcan.ac.ca/ccrs/rd/sci/pub/bibpdf/13102.pdf>
- Toutin Th. (2003b) Block bundle adjustment of Ikonos in-track images. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, W 4, pp. 851-857. <http://www.ccrs.nrcan.ac.ca/ccrs/rd/sci/pub/bibpdf/13110.pdf>
- Toutin Th. (2004a) Review Article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, W 10, pp. 1893-1924, May. <http://www.ccrs.nrcan.ac.ca/ccrs/rd/sci/pub/bibpdf/13288.pdf>
- Toutin Th. (2004b) Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS, IKONOS and QuickBird. *IEEE-TGARS*, vol. 42, N° 10 (in press)
- Toutin Th. (2005) QuickBird stereo imagery for High resolution DSM. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26 (in press).
- Toutin Th. & Cheng P. (2000) Demystification of IKONOS. *Earth Observation Magazine*, July, vol. 9, W 7, pp. 17-21. <http://www.ccrs.nrcan.ac.ca/ccrs/rd/sci/pub/bibpdf/4807.pdf>

- Toutin Th., Chénier R. & Carbonneau Y. (2002) 3D Models for High Resolution Images: Examples with QuickBird, IKONOS and EROS, Proc. of Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications (ISPRS, IGU, C/G), Ottawa, Ontario, Canada, July 8-12, 2002, CD-ROM.
- Vassilopoulou S., Humi L., Dietrich V., Baltasvias E., Pateraki M., Lagios E. & Parcharidis I. (2002) Orthophoto generation using IKONOS imagery and high-resolution DEM: a case study on volcanic hazard monitoring of Nisyros Island (Greece), *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 57, pp. 24-38.
- Valadan Zoj M.J., Mansourian A., Mojaradi B. & Sadeghian S. (2002) 2D Geometric correction of IKONOS Imagery Using Genetic Algorithm, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34 (B4), CD-ROM (unpaginated).
- Westin T. & Forsgren J. (2002) Orthorectification of EROS-A1 Images, *ImageSat International Web site*, (at [http://www.imaesatintl.com/customer-support/technical/Orthorectification EROSA 1 Images.pdf](http://www.imaesatintl.com/customer-support/technical/Orthorectification%20EROSA%201%20Images.pdf)).
- Wong KW. (1975) Geometric and Cartographic Accuracy of ERTS-1 Imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 41, 621-635.
- Wong KW. (1980) Basic Mathematics of Photogrammetry, *Manual of Photogrammetry* 4th Edition, Chapter II, Editor in chief: C.C. Slama, ASP Publishers, Falls Church, USA, pp. 37-101.
- Yang X. (2001) Piece-wise Linear Rational Function Approximation in Digital Photogrammetry, *Proc. of the ASPRS Annual Conference*, St Louis, Missouri, USA, April 23-27 (ASPRS: Bethesda, USA), CD-ROM (unpaginated).
- Wolniewicz W. (2004) Assessment of geometric accuracy of VHR satellite images, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 35 (B1), CD-ROM, pp.19-23
-