

LA MULTI-STÉRÉOSCOPIE POUR LES CORRECTIONS D'IMAGES SPOT-HRV

par

Thierry Toutin

Centre canadien de télédétection, Ottawa, Ontario

et

Yves Carbonneau

Prologic Systems Ltd., Ottawa, Ontario

SUMMARY

As in photogrammetry, the SPOT stereoscopic capabilities enable models in three dimensions to be created. But since the data and the processing systems are digital, more than two images can be processed together, that is the multi-stereoscopy.

The objective of this study is to quantify the limits of the planimetric and altimetric accuracies of the geometric reconstruction of the tridimensional model, using several images and comparing different testing configurations with the data (images, GCPs, accuracy...).

By using an additional image, the planimetric and altimetric accuracy increases by 10 to 20 per cent. Although three GCPs are enough for the modelization, the accuracy with six GCPs and three images is one-third of a pixel, i.e., three metres in X, Y and Z, if the GCPs are of good quality (definition and plotting).

RÉSUMÉ

Les possibilités stéréoscopiques de SPOT permettent, comme en photogrammétrie, de reconstituer des modèles en trois dimensions. Mais les données et les systèmes de traitement étant numériques, rien n'empêche d'utiliser plus que deux images; c'est la notion de multi-stéréoscopie.

Cette étude a pour but de quantifier les limites au niveau des précisions planimétrique et altimétrique dans la reconstruction géométrique du modèle tridimensionnel en utilisant plusieurs images, et de comparer différentes configurations en fonction des données (images, points terrain, précision, ...).

Utiliser une image supplémentaire améliore la précision planimétrique et altimétrique de l'ordre de 10 à 20 pour cent. Bien que trois points soient suffisants pour la modélisation de trois images, à partir de six points, la précision est d'un tiers (1/3) de pixel, à savoir trois mètres en X, Y et Z, si les points d'appui sont de bonnes qualités (définition et pointé).

INTRODUCTION

L'arrivée du satellite SPOT a permis de révolutionner le processus de cartographie topographique. Grâce à ces capacités stéréoscopiques, il est possible comme en photogrammétrie, de reconstituer des modèles tridimensionnels à partir de deux images. Les systèmes généralement utilisés sont des stéréorestituteurs pour les méthodes analytiques, ou des systèmes de traitements d'images pour les méthodes numériques.

Or dans le cas des méthodes numériques, comme il n'y a pas de contraintes physiques relatives aux données, à leurs visionnements et à leurs traitements, une dimension supplémentaire peut être ajoutée à la stéréoscopie: la multi-stéréoscopie. Ainsi, au lieu de reconstituer un modèle stéréoscopique à partir d'un couple d'images numériques, la tridimensionnalité du terrain est obtenue à l'aide de trois images numériques, ou plus. L'utilisation d'un système numérique de traitement d'images et d'une méthodologie

entièrement numérique ne restreignent donc pas le nombre de données et leurs traitements dans une compensation simultanée.

Le but de cette étude est de voir dans quelle mesure cette notion de multi-stéréoscopie apporte des améliorations significatives au niveau des précisions planimétrique et altimétrique dans les corrections géométriques d'images SPOT-HRV.

Utilisant un modèle mathématique rigoureux de corrections géométriques (Toutin, 1986; Guichard, 1983), différents tests sont effectués en vue d'une qualification des capacités stéréoscopiques du système SPOT et de ses limites. Pour cela, on variera le nombre et les arrangements d'images, le nombre et la répartition des points d'appui, ainsi que leur précision.

MÉTHODOLOGIE

La méthodologie pour la modélisation des corrections géométriques est relativement simple; elle est résumée dans la Figure 1. Cette méthodologie fait partie du système CARTOSPOT, développé par la société DIGIM sous contrat du ministère d'Énergie, Mines et Ressources Canada avec le Centre canadien de télédétection.

Note: This article is also available in English from the Canada Centre for Remote Sensing.

Note: Cet article est également disponible en anglais auprès du Centre canadien de télédétection.

tion (Rochon et al., 1986; Leclerc, 1988); elle est largement documentée dans ces références. Rappelons les principales étapes:

1) l'acquisition des données SPOT, en plus des images, consiste en la lecture et les prétraitements:

- des informations générales relatives à l'image et à son centre (longitude, latitude, temps, angle de prise de vue);
- des éphémérides avec la position et la vitesse du satellite dans un système géocentrique; et
- des données d'attitude avec les variations des vitesses angulaires suivant les trois axes.

2) Le prétraitement des images consiste en un étirement de l'échelle des niveaux de gris et si nécessaire en l'utilisation de filtres pour faire « ressortir » les détails linéaires qui servent de points d'appui.

3) Le prétraitement des données d'orbite consiste en le calcul des paramètres orbitaux osculateurs au centre de scène. Ces paramètres ont été choisis en fonction des caractéristiques orbitales du satellite et de leurs exploitations dans un but cartographique (quelques secondes d'orbite) (Toutin, 1985). Ces paramètres sont:

- distance centre de terre-satellite;
- vitesse radiale du satellite;
- longitude du nœud ascendant;
- inclinaison du plan de l'orbite;
- argument du satellite dans son plan orbital; et
- deux composantes de l'excentricité de l'orbite.

L'avantage de ces paramètres (surtout le premier) est qu'ils ont des variations linéaires très faibles (excepté le 5^{ème}) dans la dimension d'une scène, alors que ceux utilisés traditionnellement — surtout le demi grand axe et l'excentricité de l'orbite — ont des variations beaucoup plus importantes.

4) Le calcul d'un modèle approché de corrections géométriques: à l'aide des données auxiliaires (principalement les éphémérides), on calcule les inconnues de ce modèle analytique, permettant de localiser les points à une centaine de mètres près.

5) L'acquisition des coordonnées images des points d'appui et homologues. Celle-ci se fait en deux étapes: grâce au modèle approché, des sous-images (52 x 52 pixels) sont créés autour de chaque point considéré (appui ou homologue) pour chaque image; les sous-images sont rééchantillonnées en augmentant l'échelle cinq fois, pour effectuer un second pointage avec une précision de l'ordre de deux à trois mètres. Cette dernière étape est effectuée simultanément sur au moins deux images.

6) Les corrections géométriques: comme ce modèle a déjà été décrit en détail (Guichard, 1983; Toutin, 1985, 1986), nous ne donnerons ici que ses principales caractéristiques :

- il est le développement analytique des équations de colinéarité pour les points d'appui, et des équations de coplanarité pour les points homologues;
- chaque paramètre du modèle est connu par une formule mathématique découlant des lois de la mécanique céleste (équations de Lagrange) et de celles de la prise de vue; ils reflètent donc précisément la réalité physique;
- les ordres de grandeur de chaque paramètre sont donc connus, minimisant ainsi le nombre d'inconnues (en particulier pour les termes de 2^{ème} ordre);
- les paramètres corrélés ont été regroupés aboutissant à un minimum de huit inconnues (décorrélées) par image;
- l'intégration des différents modèles (orbites, attitudes, images) et leur compensation simultanée permettent une meilleure déter-

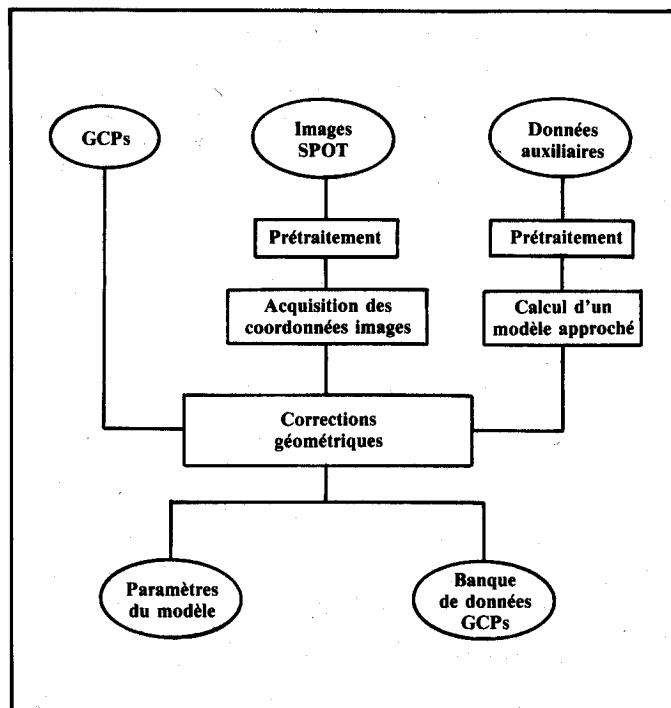


Figure 1
Méthodologie pour les corrections géométriques

mination et une plus grande rigidité que la modélisation par étape ou que les modélisations indépendantes,

- l'addition d'équations complémentaires, dont la contribution reflète la précision des paramètres orbitaux, augmente l'importance de l'orbite, d'autant plus que les points d'appui sont imprécis;
- la précision du modèle par lui-même est inférieure à un mètre;
- les corrections géométriques et ensuite la rectification, avec ou sans modèle numérique d'élevation (MNE), peuvent s'effectuer dans n'importe quelle projection conforme (UTM, Lambert, ...); et
- il a été adapté pour pouvoir traiter d'une à quatre images simultanément, en tenant compte des angles d'incidence donc des rapports base sur hauteur (B/H) différents.

La formulation mathématique, qui représente les équations de colinéarité, est simple et directe; elle ne demande aucune itération pour passer des coordonnées image aux coordonnées terrain, et réciproquement :

$$\begin{aligned}
 Pp + y(1 + \delta_\gamma X) - \tau H - H_0 \Delta T^* &= 0 \\
 X + \theta \frac{H}{\cos_x} + \alpha q(Q + \theta X - \frac{H}{\cos_x}) - Q \Delta R &= 0 \\
 \text{avec : } X &= (x - ay) \left(1 + \frac{h}{N_0}\right) + by^2 + cxy \\
 H &= h - \frac{x^2}{2N_0}
 \end{aligned} \quad (1)$$

Chaque paramètre est donné par une formule mathématique (Toutin, 1985), qui traduisent des réalités physiques de la géométrie de prise de vue (satellite, Terre, position géographique de la scène).

P et Q	sont des facteurs échelle en Y et X, respectivement,
τ et θ	sont fonction des angles de basculement en Y et X, respectivement,
a	est fonction de la rotation de la Terre,
H_0	est la hauteur du satellite à la visée centrale,
N_0	est la normale à l'ellipsoïde,
χ, σ_y, b et c	sont des paramètres connus de 2 ^{ème} ordre fonction de la géométrie satellite-centre de scene-centre de Terre,
ΔT^* et ΔR	sont les variations non-linéaires de l'attitude,
p et q	sont les coordonnées image,
x, y et h	sont les coordonnées terrain dans un repère intermédiaire

En fonction de la précision de détermination de chaque paramètre, on détermine les inconnues qu'il doit être calculées par compensation, pour une rectification de précision. Elles sont au nombre de cinq P, Q, τ , θ et a, auxquels il faut ajouter trois inconnues de translation-rotation pour passer aux coordonnées cartographiques dans lequel les points d'appui sont donnés.

- 7) La base de données de points de rectification: ce procédé permet la densification de points d'appui: intersection de routes, de chemins de fer, ponts. Ces points peuvent former une base de données sur un territoire municipal, provincial ou fédéral pour la rectification d'images spatiales provenant de différents satellites (SPOT, Landsat, MOS, Radarsat, ...) ou aéroportées (capteur MEIS, radar à ouverture synthétique).

Au niveau de l'acquisition des coordonnées image, comme tous les points terrain ont été choisis sans connaissance des images, ils ne sont donc pas a priori les mieux « adaptés » au système SPOT. Deux approches peuvent être envisagées:

- après une analyse visuelle des points et de l'image, on peut extraire une partie (30-40 pour cent) qui correspond aux meilleurs points; et
- tous les points visibles sont a priori pointés quelque soit la qualité, et le « tri » se fera statistiquement au niveau des résidus en tenant compte d'une cote de qualité pour chaque point.

Cette dernière approche sera utilisée, dans son ensemble, mais un test sera aussi effectué en tenant compte de la première

Tableau 1
Caractéristiques des images SPOT-HRV sur Ottawa-Hull

DATE ACQUISITION	ANGLE PRISE VUE	RADIOMETRIE niveau de gris	BRUIT	NEIGE %	NUAGE %
86-11-19	2,30°	10-52	4	50	0
88-11-15	28,59°	13-41	4	0	10
88-11-22	-19,96°	15-70	4	60	10

Tableau 2
Caractéristiques du site et des données

RÉGION	DÉNIVELLES (M)	FEUILLET TOPOGRAPHIQUE	MISE À JOUR	PHOTOS AÉRIENNES	NOMBRE DE POINTS TERRAIN
Ottawa	100	31G5	1984-85	1984	120
Gatineau	300	31G12	1975-76	1980	105

EXPÉRIMENTATION

Le site d'expérimentation est celui d'Ottawa-Hull, Canada, recouvrant deux feuillets topographiques au 1:50 000 (31G5 et 31G12). Au centre, la région est assez urbanisée avec les différentes agglomérations (Ottawa, Hull, ...); au sud, on retrouve beaucoup de champs, quadrillés par un important réseau routier. Le nord du site est par contre occupé par la forêt de Gatineau et de nombreux lacs. Le relief est modéré au sud, mais beaucoup plus accidenté sur le bouclier canadien au nord avec des variations de dénivelées de l'ordre de 350 mètres.

Les trois images panchromatiques SPOT-HRV, utilisées pour l'expérimentation sont décrites dans le Tableau 1. Ces images ne sont pas de bonnes qualités radiométriques, avec du bruit, des nuages et aussi de la neige. En outre, en fonction des dates d'acquisition, l'élévation solaire (26°) est faible, ce qui réduit encore les contrastes. Mais ces images ont été choisies pour leurs géométries de prise de vue (rapport B/H de 0,4, 0,6 et 1,1).

Ainsi, toutes ces caractéristiques ramènent cette expérimentation à un cas plus réaliste et plus proche des conditions normales, où tout n'est jamais parfait, plutôt qu'à un cas de « laboratoire ».

Les 235 points terrain sont répartis sur les deux feuillets topographiques (cf. Tableau 2). Ils ont été choisis sans aucune référence aux images SPOT-HRV. Les coordonnées UTM ont été calculées par acrotriangulation par le Centre canadien de cartographie (10 lignes de vol, 130 photos au 1:40 000) avec une précision d'un à deux mètres. Les points sont des intersections d'autoroutes, de chemins, de rues, dans les villes, les lotissements, les forêts ou les champs. Certains points sont des ponts. Sur les 235 points, 170 points seulement étaient visibles sur les images ou conformes à la réalité, car les photos, les cartes et les images étaient à trois dates différentes. Sur ces 170 points, 23 appartenaient à seulement une image, 55 à deux quelconques et 92 aux trois images, ce qui correspond à 409 pointés.

Utilisant les photographies aériennes pour l'identification, 45 points sur ces 170 points n'ont pas été acceptés dans une des deux étapes du processus d'acquisition, parce que le détail était trop petit, mal identifiable ou presque invisible à cause des nuages, de la neige, du bruit, de l'ombre des arbres, ou du manque de contraste. Il ne reste donc que 125 points utilisables pour le calcul des corrections géométriques des trois images. Comme les points ont été définis a priori, sans connaître les images et que les conditions de prise de vue ne sont pas parfaites, cela explique le 47 pour cent de rejet dans l'acquisition des points.

RÉSULTATS

Comme dans toute analyse de résultat pour des corrections géométriques d'images, on procède en trois étapes qui sont relatives au processus: les pointés, la modélisation, la restitution.

La qualité des pointés amène à considérer trois classes (Institut Géographique National, 1986):

- la classe 1 contient les points bien définis sur le terrain et clairement identifiables sur l'image; l'erreur moyenne de détermination est comprise entre 1 m et 5 m;
- la classe 2 contient soit des points bien définis sur terrain pas clairement identifiables sur l'image (mauvais contraste, voile atmosphérique, ...), soit des points insuffisamment définis sur le terrain; l'erreur moyenne de détermination est comprise entre 5 m et 10 m; et
- la classe 3 contient les points mal définis ou quasi invisibles; l'erreur moyenne de détermination est supérieure à 10 m.

La qualité de modélisation est fonction de la formulation mathématique de la géométrie de prise de vue, des erreurs sur les coordonnées images des points d'appui et des points homologues et des erreurs sur les coordonnées terrain. Comme le modèle mathématique est précis à un mètre (Toutin, 1985) et que les pointés ont déjà été classés, nous pouvons caractériser les points en trois catégories (Institut Géographique National, 1986):

- la catégorie 1 contient les points dont les coordonnées terrain sont exactes à un à deux mètres et qui sont bien identifiables;
- la catégorie 2 contient les points dont les coordonnées sont sans doute exactes mais dont l'identification est approximative; et
- la catégorie 3 contient les points dont les coordonnées terrain sont erronées ou que le détail pointé n'est pas conforme à la réalité terrain.

La qualité de restitution est dépendante de la qualité de modélisation et des coordonnées des points de vérification. Comme ces points font partie des 125 points, ils ont déjà été caractérisés au paragraphe précédent.

D'après ces définitions de classes et catégories, on voit que:

- a) parmi les 65 points retirés au début par comparaison des données, quelques-uns appartenaient à la catégorie 3, mais la majeure partie appartenaient à la classe 3 des pointés; et
- b) parmi les 45 points retirés pendant l'acquisition sur le système, tous appartenaient à la classe 3 des pointés.

Seuls les pointés de classe 1 et 2 pour les points de catégorie 1 et 2 ont été conservés. En utilisant les 125 points comme points d'appui et 6 points homologues pour le calcul de la modélisation, on obtient les erreurs moyennes quadratiques (EMQ) sur les points d'appui (en mètres) résumées dans le Tableau 3; celles-ci reflètent la précision de modélisation des images SPOT-HRV.

Px et Py représentent l'erreur moyenne quadratique sur les parallaxes résiduelles en X et en Y pour chaque point. Celles-ci reflètent la qualité de la détermination de l'altitude et de celle de l'orientation relative des images entre elles.

Ces valeurs de parallaxes ne sont pas excellentes, surtout Py, en comparaison des erreurs moyennes quadratiques sur les coordonnées; cela provient principalement du fait que les pointés ont été effectués en double monoscopie, car les systèmes actuels de traitement d'images ne permettent pas les pointés stéréoscopiques, d'où ces valeurs de parallaxes résiduelles. En outre, l'orientation relative entre trois images est un peu moins bonne qu'avec deux; ce qui semble normal car il est plus « difficile » de minimiser la distance entre trois directions qu'entre deux. Mais la position moyenne avec trois images est meilleure qu'avec deux images.

Tableau 3
Résultats de modélisation sur les 125 points d'appui Px et Py :
parallaxes résiduelles en X et Y (en m)

NOMBRE D'IMAGES	EMQ-X	EMQ-Y	EMQ-Z	Px	Py
3	3,35	3,75	4,67	2,0	2,9
2 (B/H = 1,1)	3,66	3,88	4,90	1,8	2,3
1 (+ 28,6°)	4,35	4,38			

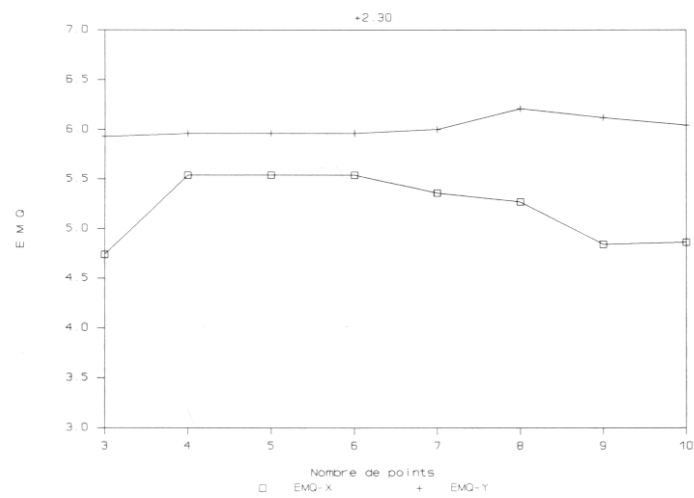
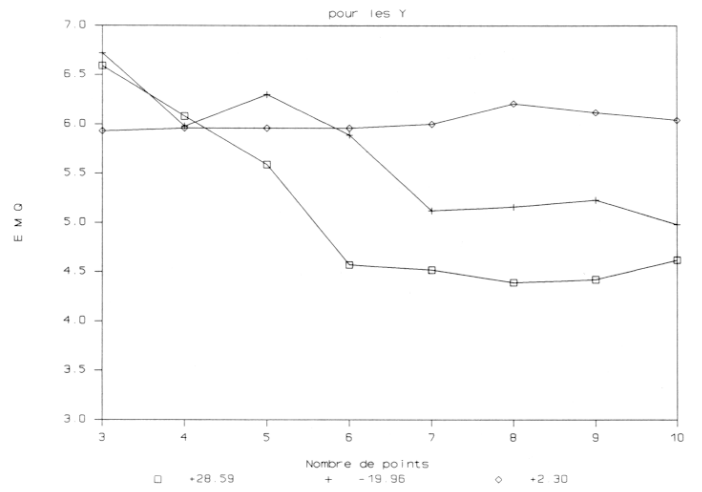
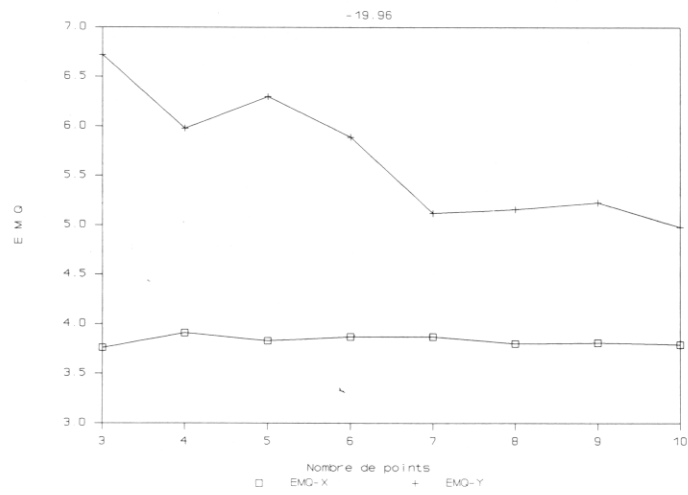
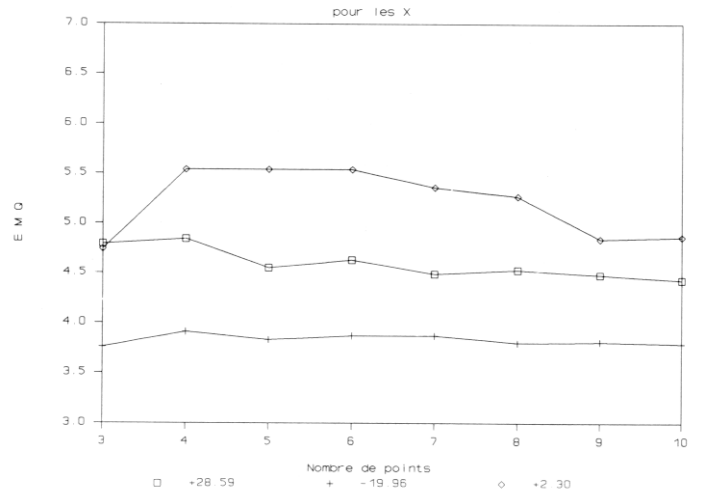
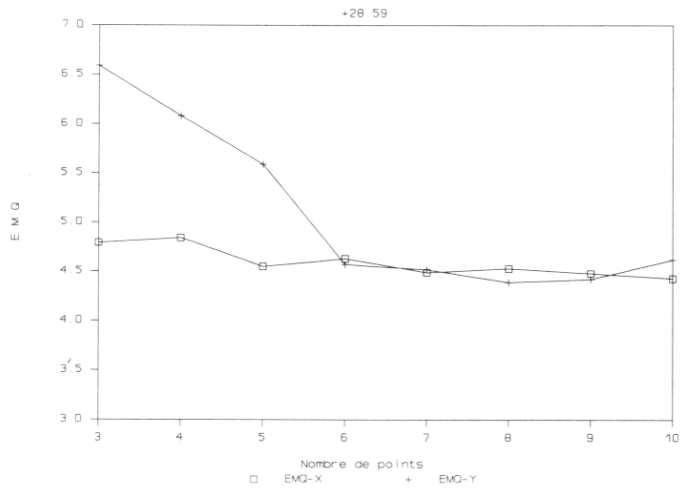
À partir de différents résultats obtenus avec ces 125 points (en tant que points d'appui ou points de vérification), on a constaté qu'un certain nombre de points perturbaient les modélisations, même s'ils restaient dans les spécifications. Ces points, de la classe 2 et de la catégorie 2, apparaissent aux extrémités des histogrammes des résidus. En outre, ce modèle mathématique, assez rigide, a déjà montré (Toutin, 1985) que les points faux ressortent nettement avec leurs erreurs au niveau des résidus.

Donc afin de ne pas affecter les qualités stéréoscopiques du système SPOT par la prise en compte de points et de pointés de qualités médiocres (environ 10 pour cent), car il est difficile, sinon presque impossible, de trouver sur un recouvrement de trois images plus de cent points de bonne qualité (erreur de pointé d'un à cinq mètres), une certaine « épuration » s'avère nécessaire. Cette épuration est itérative et utilise des critères statistiques: on ne garde que les points qui sont inférieurs à 2,7 l'erreur moyenne quadratique (cette erreur étant calculé à partir d'un groupe de points considérés de bonne qualité). Et on recommence jusqu'à ce que l'ensemble des points reste stable.

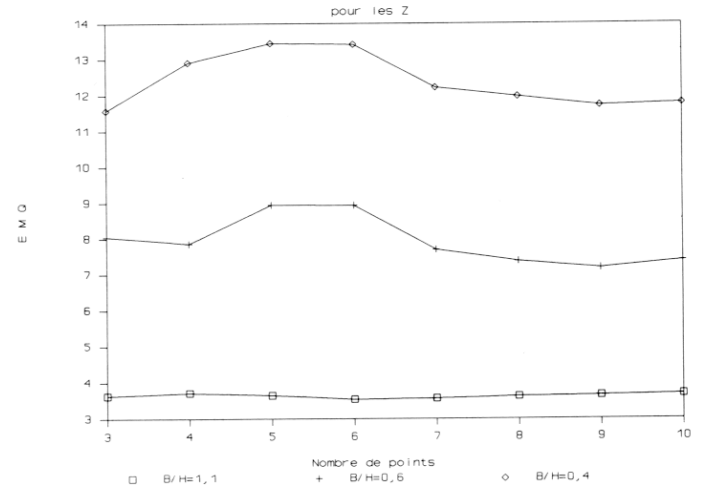
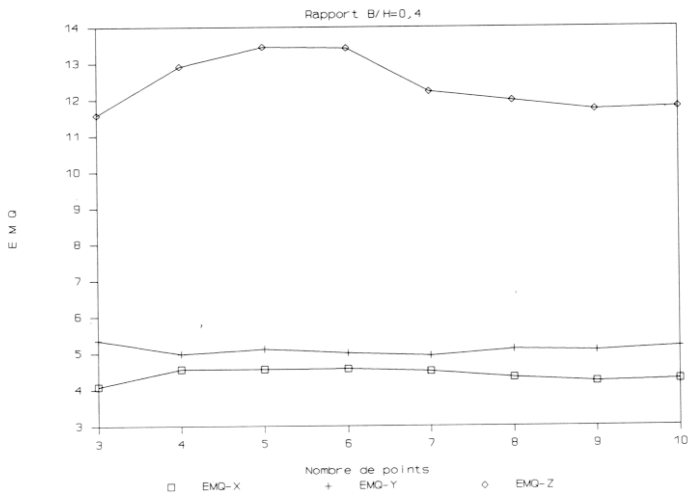
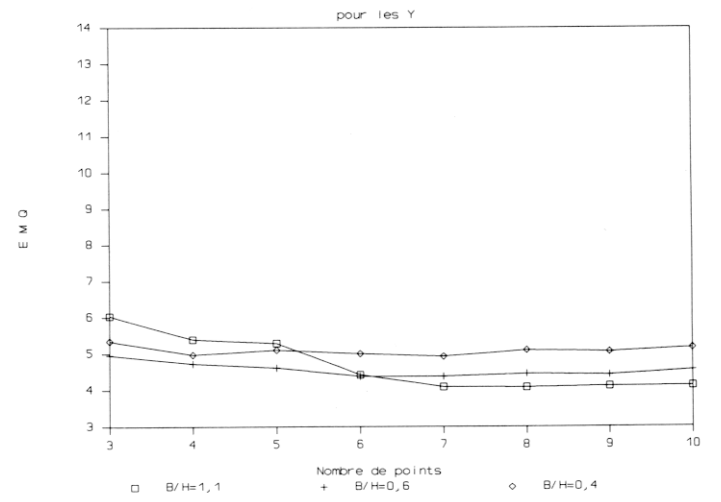
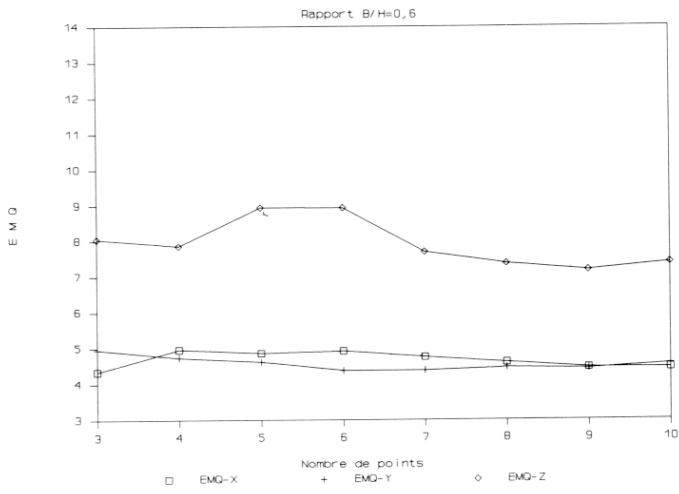
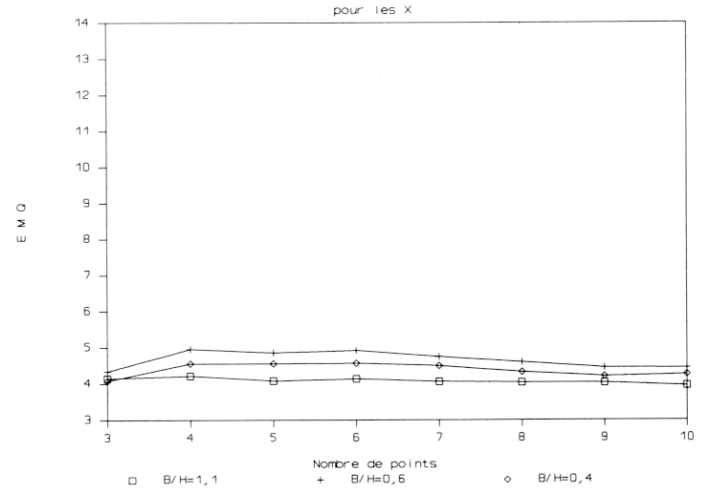
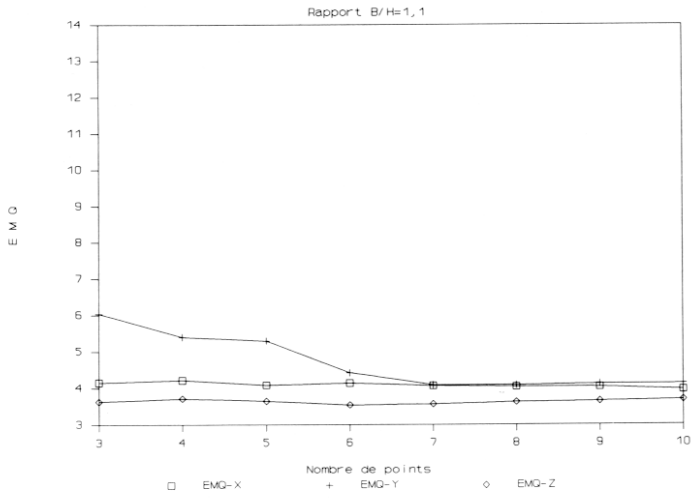
Les résultats, qui vont être présentés sous forme de tableaux et surtout de graphiques, reposent donc sur cet ensemble de points « épurés »: 98 points d'appui ou de vérification et 6 points homologues. Les différents tests, qui vont donc donner des résultats sur la précision de restitution des images SPOT-HRV, ont porté sur:

- le nombre de points d'appui: de 3 à 10;
- l'angle de prise de vue de l'image dans le cas d'une
- le rapport B/H dans le cas de deux images;
- le nombre d'images 1, 2 ou 3;
- la répartition des points d'appui; et
- la qualité du réseau géodésique.

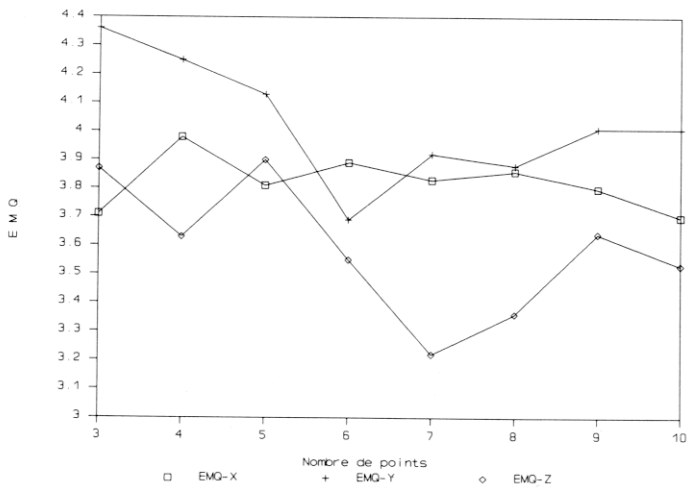
Le Graphique 1 donne les résultats de la modélisation pour une image, avec 3 à 10 points d'appui; les erreurs moyennes quadratiques (EMQ) en X et en Y sur les points de vérification sont données en mètres. Chaque graphe de la partie gauche correspond à une image (angles +28,59°, -19,96°, +2,30°); ceux de la partie droite comparent les EMQ-X et - Y de chaque image. Il est surprenant de voir que l'image nadir (+ 2,30°) donne de moins bons résultats, alors que les images ont à peu près les mêmes qualités radiométriques, et que les points choisis ont des côtes de pointés similaires. D'autres tests confirmeront cette constatation, mais avec des différences moins significatives. On peut donc considérer que l'angle de prise de vue influe un peu sur la modélisation d'une image; cela peut s'expliquer par le fait que s'il y a plus de distorsions dans une image « off-nadir » que dans une image nadir, il y a aussi plus de détails et d'informations grâce à la « vision inclinée ». Finalement, bien que trois points d'appui donnent des résultats de l'ordre de ou inférieurs à 6 mètres, les résultats à partir de 6 points d'appui s'améliorent légèrement avec 4,7 m en X et 4,8 m en Y.



Graphique 1
Résultats de restitution avec une image



Graphique 2
Résultats de restitution avec deux images

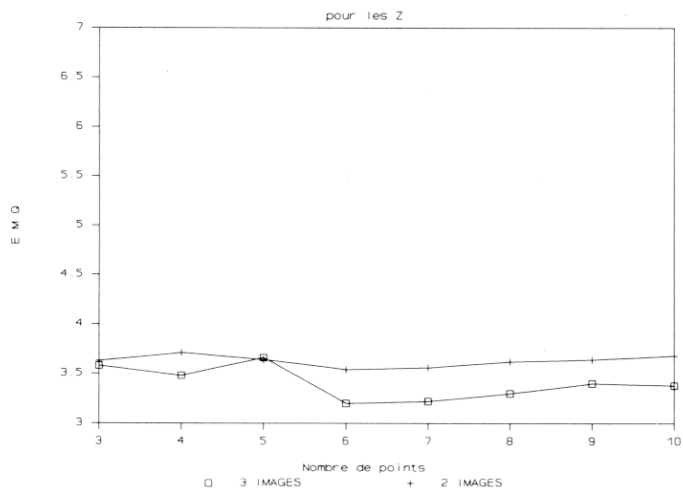
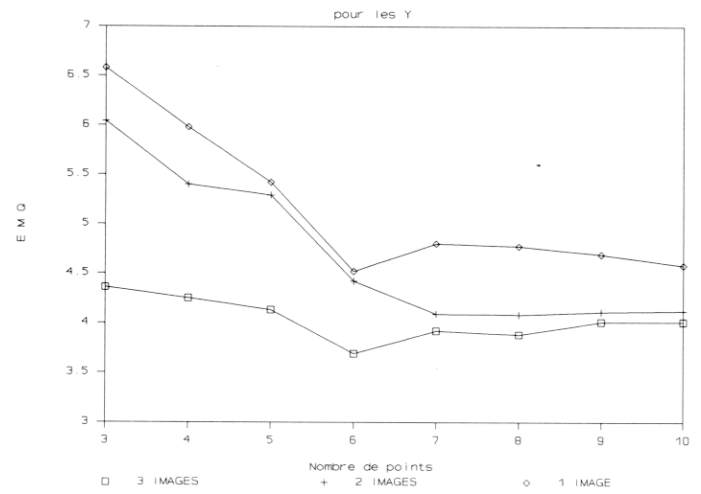
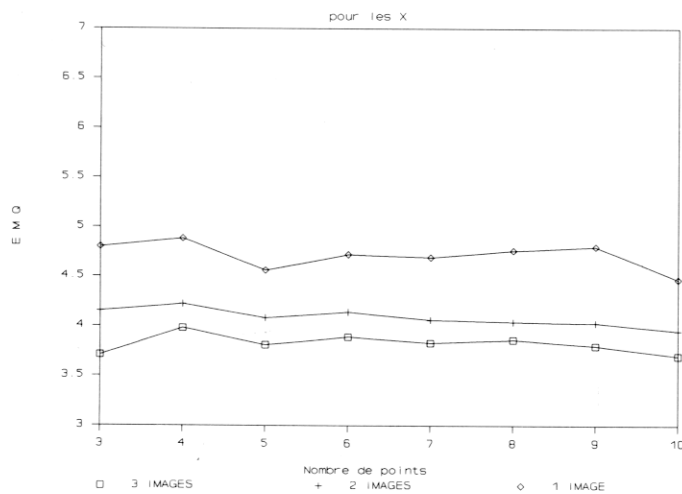


Graphique 3
Résultats de restitution avec trois images

Le Graphique 2 donne les résultats de la modélisation pour deux images avec 3 à 10 points d'appui, présenté de la même façon que le Graphique 1. Sur le graphe pour un rapport B/H = 1,1, on voit que l'EMQ en Y, pour 3 à 5 points d'appui, est 30 pour cent plus élevé par rapport à l'EMQ en X que dans les autres cas de points d'appui. A cause de la double monoscopie, ces points, intersections en forme de T ou de Y, ont été moins bien pointés entre les deux images (+ 28,59 et -19,96) occasionnant une erreur suivant l'axe des Y; ceci est confirmé par les EMQ en Y pour les modélisations d'une image (Graphique 1). Par contre ces erreurs de pointé ont eu des effets moins importants, mais quand même significatifs, pour les autres couples B/H (cf. graphe des Y pour deux images).

La comparaison des EMQ pour chaque couple montre que l'augmentation du rapport B/H améliore sensiblement (5-10 pour cent) la précision planimétrique mais très fortement, comme on s'y attendait, la précision altimétrique. Par contre cette amélioration n'est pas linéaire, puisque l'on passe pour des rapports B/H 0,4, 0,6, 1,1 à des EMQ en Z de 12 m, 8 m, 4 m, respectivement.

Finalement, à partir de 6 points d'appui la précision de restitution pour un couple d'images avec un rapport B/H del,1 est de 4,1 m, 4,2 m et 3,6 m pour X, Y et Z, respectivement.



Graphique 4
Comparaison des résultats de restitution entre une, deux et trois images

Le Graphique 3 donne les résultats de la modélisation pour trois images avec 3 à 10 points d'appui. Ici encore la courbe en Y se stabilise après 6 points pour les mêmes raisons que précédemment. Le courbe en Z a un minimum marqué de 3,2 m à 7 points (car ce point est meilleur que les autres), alors qu'elle est relativement stable dans les autres cas. Bien que les courbes paraissent relativement homogènes pour 3 à 10 points, la précision de restitution pour trois images, avec 6 points ou plus est 3,8 m, 3,9 m et 3,6 m en X, Y et Z, respectivement.

Le Graphique 4 donne des résultats comparatifs avec 1,2 et 3 images pour chaque coordonnée. Le cas « 1 image » est celui de l'image +23,6°; et le cas « 2 images » est celui du couple B/H = 1,1. Il est très clair que la précision planimétrique (en X et Y) s'améliore à chaque fois qu'une image est ajoutée dans le traitement; cette amélioration est de l'ordre de 10 pour cent.

Au niveau de la précision altimétrique, on a d'abord constaté qu'elle ne s'améliorait guère avec une troisième image et quelquefois qu'elle se dégradait. Cela s'explique par les deux faits suivants:

- 1) en reprenant les cas « 2 images » avec un rapport B/H de 1,1 et de 0,6, on constate que le premier est deux fois plus précis (4 m) que le second (8 m). Or, comme le calcul de l'altimétrie dans le modèle est pondéré en fonction de ce rapport B/H, la majeure partie de l'information altimétrique est donc extraite du couple qui a le plus grand rapport B/H; et
- 2) tous les points de vérification n'appartiennent pas toujours aux trois images; ainsi certains points appartenant au couple [-19,96, +2,30] (B/H = 0,4) sont pris en considération dans le calcul de modélisation « 3 images », mais pas dans celui « 2 images ». Ces points, comme ce couple donne les moins bons résultats, biaisent la comparaison. Un autre calcul pour les EMQ a donc été effectué sans tenir compte de ces points afin d'avoir le même jeu de points de vérification. Les résultats, montrant une amélioration de 0,1 à 0,3 mètres, correspondent à la courbe « 3 IMAGES » dans le graphe pour les Z, avec une EMQ moyenne de 3,4 mètres.

Nous pouvons conclure cette partie des résultats avec le Tableau 4, en donnant les EMQ sur 92 points de vérification pour la modélisation avec six points d'appui.

Comme nous l'avons expliqué dans la méthodologie, il y avait une deuxième approche au niveau du choix des points: après une analyse visuelle des points et de l'image, on n'a gardé qu'une partie (33 pour cent) du jeu initial de 235 points, soit 78 points. Certes, cet ensemble de données est « biaisé » par rapport à celui de 125 points, car après traitement les points de cet ensemble sont situés à moins de deux fois l'erreur moyenne quadratique du jeu initial et non pas à 2,7. Mais il s'agit d'avoir, ici, la meilleure précision en ne conservant visuellement que les points de catégorie 1 et les pointés de classe 1 (précision inférieure à 5 m) du jeu initial de points qui ont été déterminés, a priori, sans connaissance des images à traiter. Ceci permettra donc de connaître la limite inférieure de la précision pour les corrections géométriques d'images SPOT-HRV, avec six excellents points dans les cas pratiques. Car si on est capable de trouver a priori 78 excellents points avant l'acquisition des images, on pourra en trouver a posteriori au moins six en visualisant les images.

À partir de ces 78 points, six sont utilisés comme points d'appui et 72 comme vérification; la précision de restitution optimale, que l'on peut obtenir pour cette expérimentation, est donnée dans le Tableau 5.

Tableau 4
Résultats de restitution sur les 92 points de vérification (en mètres) choisis « a priori » et épurés

NOMBRE D'IMAGES	EMQ-X	EMQ-Y	EMQ-Z
3	3,9	3,7	3,2
2 (B/H = 1,1)	4,1	4,4	3,5
1 (+28,6°)	4,7	4,6	

Tableau 5
Résultats de restitution sur les 72 meilleurs points de vérification (en mètres) choisis « a posteriori »

NOMBRE D'IMAGES	EMQ-X	EMQ-Y	EMQ-Z
3	3,16	2,80	2,92
2 (B/H = 1,1)	3,50	3,05	2,77
1 (+28,6°)	4,01	3,81	

À partir de ce jeu de 78 points, on a testé la rigidité de la modélisation en fonction de la répartition géographique des points d'appui. Une dizaine de groupes de six points d'appui a été déterminée parmi ces 78 points: certaines répartitions étaient bonnes, de telle façon que le terrain était inscrit dans le volume créé par les six points d'appui, au niveau planimétrique et altimétrique; d'autres laissaient place à l'extrapolation. Dans ces derniers cas, il y a une perte de précision de 10 à 30 pour cent sur la précision des coordonnées planimétriques, mais aussi altimétrique. Il faut donc éviter ces cas; et une bordure de cinq kilomètres semble être un compromis qui permet de conserver les précisions de trois mètres précédemment mentionnées. Grâce à la formulation mathématique du modèle, ces erreurs d'extrapolation peuvent aisément se calculer en ne conservant que la partie principale de chaque équation et en appliquant un calcul d'erreur sur les paramètres du premier ordre :

$$\begin{aligned} y &\approx P_p & \text{d'où } \Delta y &\approx p \Delta p \\ x &\approx \frac{\alpha q Q}{1 + \theta \alpha q} & \text{d'où } \Delta x &\approx \frac{\alpha q \Delta Q}{1 + \theta \alpha q} \end{aligned} \quad (2)$$

Dans certaines situations particulières, les points d'appui n'ont pas de coordonnées cartographiques précises. Ceux-ci peuvent

- de la numérisation sur une carte topographique au 1:50 000 ou au 1:250 000; et
- d'un réseau géodésique de mauvaise qualité.

Il faut donc à l'intérieur des différents groupes d'équations (point d'appui planimétrique, altimétrique, homologue, paramètres orbitaux) tenir compte de la précision de chaque groupe. Les équations relatives au point sont pondérées en fonction de la précision planimétrique et altimétrique ainsi que de la précision de pointé mono- et stéréoscopique (colinéarité vs coplanarité). Les équations relatives aux paramètres d'orbite (et aux inconnues en découlant) sont pondérées en fonction de la connaissance de l'orbite, de l'attitude et de leurs limites (Serreault, 1980). Un premier calcul analytique a été effectué pour connaître les ordres de grandeur de ces pondérations. Puis des tests empiriques ont permis de mieux les déterminer.

Ceci est un des gros avantages de ce modèle et de son intégration des différents paramètres qui sont régis par des règles physiques et traduits par des relations mathématiques entre eux. La rigidité d'orbite est un facteur supplémentaire très important qui n'existe pas dans le domaine de la photogrammétrie conventionnelle, et qui doit être introduit dans le calcul de la modélisation

en utilisant les variations des éléments osculateurs obéissant rigoureusement aux équations de Lagrange. Bloquant ainsi certains paramètres dans des intervalles déterminés, on empêche les équations d'observation de diverger. Dans les situations citées précédemment, la rigidité de l'orbite a un rôle prépondérant dans le calcul des inconnues par rapport aux observations terrestres, évitant ainsi de tordre l'orbite pour la « faire coller » aux points d'appui.

Le Tableau 6 donne les conditions d'expérimentation et les résultats d'une modélisation de deux images avec 50 points d'appui bruités relatifs aux deux situations envisagées plus haut. Les coordonnées cartographiques des 75 points de vérification ont gardé la même précision, à savoir un à deux mètres.

Ces résultats montrent qu'il est possible d'assurer une précision inférieure à dix mètres pour la planimétrie avec une géodésie de pauvre qualité. Ces résultats ont besoin d'être confirmés sur d'autres images et configurations. Mais d'un point de vue pratique et économique, il est souvent plus valable de numériser une cinquantaine de points sur une carte, que de faire des travaux géodésiques ou topographiques, si une précision relative de dix mètres est suffisante.

CONCLUSIONS

Les modèles mathématiques utilisés (liés à la mécanique céleste) étant très stables et gardant la rigidité de l'orbite dans un intervalle déterminé, l'utilisation de filtres ou de systèmes de détection d'erreurs devient inutile. L'intégration des paramètres des différents modèles (orbite, attitude, capteur, Terre), aboutissant à des équations simples et directes, permet de s'adapter à de nombreux cas, qu'il est en outre possible de pondérer en fonction de la précision initiale de la donnée.

La précision des points déterminés sur les images SPOT-HRV est dépendante de la qualité de ces points qui, elle-même, détermine la précision de la modélisation et de la restitution.

Avec:

- une bonne répartition géographique (en planimétrie et altimétrie) d'au moins six points d'appui pour plus de sécurité;
- une bonne méthode pour l'acquisition des coordonnées images des points avec une précision de pointé de l'ordre de trois mètres; et
- une précision planimétrique et altimétrique de l'ordre d'un à deux mètres;

la modélisation de trois images SPOT donne alors une précision de 3,2 m en X, 2,8 m en Y et 2,9 m en Z.

Utiliser une image supplémentaire a permis d'améliorer les précisions planimétrique et altimétrique de 10 à 15 pour cent. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par la Société DIGIM (3 m, 2 m et 3 m en X, Y et Z, respectivement) avec le même modèle mathématique; en utilisant six points d'appui et onze points de vérification qui ont été choisis comme les meilleurs dans l'image, les

coordonnées cartographiques ont été ensuite mesurées avec le Global Positioning System (précision relative inférieure à un mètre) (Leclerc, 1989).

Si la répartition est moins bonne, laissant place à des extrapolations dans l'image, ou si la qualité des points (définition et pointé) est inférieure, il y a une perte de précision de 10 à 20 pour cent.

En général, la précision des résultats est à peu près égale à la précision de pointés sur les images. Bien que trois points soient suffisants pour le calcul de la modélisation, il est plus sage d'utiliser six points d'appui pour assurer les précisions mentionnées. Si les coordonnées géographiques sont mauvaises (50 à 100 m d'erreur), la connaissance de l'orbite joue un rôle dominant dans le calcul de la modélisation, et permet d'assurer une précision meilleure que dix mètres en planimétrie.

L'intérêt économique et pratique d'utiliser une, deux ou trois images, et de bons ou moins bons points d'appui, dépendra principalement de l'application envisagée et de la précision requise: pour une cartographie au 1:50 000, une précision planimétrique inférieure à dix mètres est suffisante pour rencontrer les normes pour les cartes de classe A. Mais pour la base nationale de données topographiques, dans laquelle les données de positionnement doivent avoir une précision inférieure à 10 mètres pour 90 pour cent des points, la restitution des images SPOT-HRV et la création d'ortho-images nécessitent alors une précision de 3 à 3,5 mètres.

L'autre application qui nécessite cette précision est pour la création d'une base de données de points de rectification. Ceux-ci peuvent être utilisés comme points d'appui pour corriger des images de télédétection de différents vecteurs (satellite, avion) et de différents capteurs (visible, micro-onde) Cette base peut être créée au fur et à mesure sur des territoires provinciaux ou fédéral.

Quant aux améliorations possibles de la méthodologie, deux points peuvent être mentionnés:

- au lieu de pointer en double monoscopie, il faudrait pouvoir utiliser un système qui permette le pointé stéréoscopique, ce qui aurait pour effet de diminuer les parallaxes en X et en Y, améliorant respectivement la détermination de l'altitude et l'orientation relative des images; et
- utiliser trois images SPOT-HRV « off-nadir » qui fourniraient deux couples stéréoscopiques avec un rapport B/H = 1 permettrait d'améliorer encore la précision altimétrique.

En conclusion, l'utilisation de ce modèle de corrections géométriques et d'une méthode « à postériori » d'acquisition des points, à savoir choisir les points d'appui par visualisation des images SPOT-HRV, sur un système de traitement numérique d'images, et ensuite obtenir leurs coordonnées cartographiques, permet alors de remplir ces normes cartographiques, avec une précision de trois mètres pour chacune des coordonnées.

Tableau 6
Résultats de restitution sur 75 points de vérification (en mètres)

NOMBRE DE POINTS D'APPUI	PRÉCISION DES POINTS D'APPUI	ERREUR MAXIMUM PLANIMÉTRIQUE	EMQ-X	EMQ-Y	EMQ-Z
50	50 plani 5 alti	100	7,6	5,6	5,4

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Centre canadien de cartographie pour avoir fourni les données terrain. Ils remercient aussi Doug O'Brien du Centre canadien de télédétection pour ses critiques constructives, et sa revue finale de cet article, ainsi que les étudiants en géographie de l'Université de Sherbrooke, Jean-Claude Michaud et Mario Beauchesne, pour leur participation à ce projet.

RÉFÉRENCES

Centre National d'Études Spaciales (1980) -Le mouvement du véhicule spatial en orbite, Cours de Technologie Spatiale, Toulouse, France, pp. 1-1030.

Guichard, H. (1983) - Étude théorique de la précision dans l'exploitation cartographique d'un satellite à défilement : application à SPOT, **Bulletin no. 90 de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection**, France, pp. 15-26.

Institut Geographique National (1986) - Évaluation des performances de restitution planimétrique et altimétrique de SPOT-1, **Compte-rendus sur la recette en vol du satellite SPOT**, France, pp. 1-48.

Leclere, A. (1988) - Le système Carto-SPOT, **Compte-rendus du Symposium international sur les applications topographiques des données SPOT**, Sherbrooke, Québec, Canada, pp. 86-100.

Leclere, A. (1998) - **Communications personnelles**

Rochon, G., Leclerc, A., Haja, S.R. et Toutin, Th. (1996) - Une révolution dans la production cartographique de base à petite et moyenne échelle, **Compte-rendus du X^{ième} Symposium canadien sur la télédétection**, Edmonton, Alberta, Canada, pp. 1029-1037.

Serreault, B. (1980) - Satellite à défilement; maintien de l'orbite SPOT, **Cours de Technologie spatiale**, CNES, France, pp. 627-658.

Toutin, Th. (1986) - Étude mathématique pour la rectification d'images SPOT, **Compte-rendus du XVIII^e Congrès international des géomètres**, Toronto, Ontario, Canada, pp. 379-395.

Toutin, Th. (1985) - Analyse mathématique des possibilités cartographiques du système SPOT, **Thèse de Docteur-Ingénieur en Sciences Géodésiques**, ENSG, Paris, France, pp. 1-163.