

INTÉGRATION DE DONNÉES MULTISOURCES : COMPARAISON DE MÉTHODES GÉOMÉTRIQUES ET RADIOMÉTRIQUES[▼]

Thierry Toutin
Centre canadien de télédétection
588, rue Booth, 3e étage
Ottawa (Ontario) Canada K1A 0Y7

Résumé

L'intégration de données multisources exige des méthodes géométriques et radiométriques adaptées à la nature et aux caractéristiques des données pour conserver dans l'image composée le meilleur de l'information de chaque image. L'article compare différentes méthodes géométriques et radiométriques et évalue, de façon quantitative et qualitative, leur impact sur les images composées à partir d'images panchromatiques SPOT et radar aéroportées. Les méthodes qui respectent la nature des données donnent des résultats meilleurs et plus intègres : des précisions géométriques de l'ordre du pixel ou mieux et des images composées de haute qualité, nettes et précises avec des éléments et de l'information cartographiques bien délimités, faciles à interpréter et plus proches de la réalité physique.

Abstract

Multisource data integration requires geometric and radiometric processing adapted to the nature and the characteristics of the data in order to keep the best information available from each image in the composite image. This article compares different geometric and radiometric processing techniques and evaluates, quantitatively and qualitatively, their impact on the resulting composite images, using panchromatic SPOT and airborne SAR images. The techniques that take into account the nature of the data give better and more solid results: subpixel geometric accuracy, and high quality composite images, which are sharp and precise containing well-defined cartographic elements and information that are easy to interpret and closer to physical reality.

1. Introduction

Le traitement de données multisources peut être basé sur le concept d'images géocodées, un terme originalement créé au Canada dans la définition de produits à valeur ajoutée (Guertin et Shaw 1981). Mais les photogrammètres préfèrent utiliser le terme d'ortho-image pour nommer une donnée géocodée. Pour intégrer sous ce concept différentes données, chaque image brute doit être convertie séparément en une ortho-image pour que chaque ortho-image composante du jeu de données se superpose pixel par pixel afin de pouvoir ensuite combiner les différentes radiométries (Clark 1980).

[▼] Publié dans l'International Journal of Remote Sensing, 1995, Vol. 16, No. 15, pp. 2795-2811

Dans la littérature, beaucoup de références existent qui combinent et/ou comparent les données dans les ondes visibles et les micro-ondes. Les premiers travaux de Murphrey (1978), Anuta et al. (1978), Daily et al. (1979), Guindon et al. (1980) et beaucoup d'autres, ont principalement porté sur l'intégration de données Landsat et Seasat, mais ont aussi utilisé d'autres données géocodées (Zobrist et al. 1979).

La méthode principalement utilisée est la superposition d'image à image avec une image de référence qui a été préalablement géocodée. Cette superposition utilise des fonctions polynomiales ou splines avec beaucoup de points de liaison entre les images. Mais les auteurs rapportent généralement la difficulté de trouver ces points de liaison entre les images, car ils sont imagés de façon différente par des capteurs qui présentent des géométries et des réponses à l'illumination très variables. Les erreurs résultantes de cette méthode sont de quelques pixels, générant alors des erreurs dans le mixage radiométrique des différentes ortho-images. L'effet est encore plus notable en terrain montagneux.

Pour trouver des points de liaison entre une image radar aéroportée (pixel de 4 x 4,31 m) et une image Landsat-TM, Guindon (1985) utilise la corrélation automatique d'images. Les erreurs de correspondance de ± 20 m vont aussi générer un mauvais mixage de l'information radiométrique; de plus, sans connaissance du type d'image, des angles d'illumination et des autres conditions de prise de vue, il est difficile de généraliser ce résultat à d'autres types d'images, principalement depuis l'apparition des nouveaux capteurs tels que ceux de SPOT, d'ERS-1 et de JERS-1.

Afin de montrer l'intérêt de traitements géométriques et radiométriques adéquats à la nature et aux caractéristiques des différentes données et de mesurer l'impact des traitements sur l'intégration et sur la qualité de l'image résultante, le but de cet article est :

- de comparer différentes méthodes géométriques et radiométriques pour intégrer des données de sources multiples;
- d'évaluer, de façon quantitative et qualitative, l'impact de ces différentes méthodes sur l'image composée résultante.

Deux types d'images très différentes ont été choisies pour rendre l'expérience plus difficile et pour tenir compte des complémentarités visibles vs micro-ondes et avion vs satellite : une image SPOT panchromatique (SPOT-P), et des images radar à antenne synthétique (RAS) aéroportées.

Deux méthodes de corrections géométriques sont comparées : les fonctions polynomiales généralement utilisées et une méthode photogrammétrique rigoureuse développée au Centre canadien de télédétection (CCT) et testée sur différentes images. Pour cette dernière méthode, le même logiciel Système de Rectification des Images de Télédétection (SRIT) (Toutin et Carbonneau 1992) a été utilisé pour les deux types d'images. Cette méthode permet en plus d'intégrer un modèle numérique d'altitude (MNA) dans la correction.

Quatre méthodes pour mixer l'information spectrale à partir des ortho-images SPOT-P et RAS aéroportées ont été évaluées : rouge-vert-bleu, composantes principales, intensité-

teinte-saturation, filtre passe-haut.

2. Description des données

Les données cartographiques sont celles de la Zone d'essai de Sherbrooke (Québec, Canada) pour les applications topographiques de la télédétection (Lasserre et Lemieux 1990). La zone d'essai est constituée de deux feuillets au 1:50 000 : la moitié nord du feuillet 21E4 (Coaticook) et la moitié sud du feuillet 21E5 (Sherbrooke) (Figure 1); ce qui donne une couverture terrestre d'environ 26 km par 40 km. La dénivelée maximale dans cette zone est de 350 m avec des pentes allant jusqu'à trente degrés dans les stations de ski alpin. Les données utilisées dans cette recherche consistent en :

- des cartes-papier au 1:50 000 et 1:250 000;
- le fichier numérique des données de position des éléments cartographiques, tels qu'observés à la surface de la Terre en coordonnées X, Y et Z et sans déplacement des éléments dû à une généralisation cartographique. Ils ont été saisis par stéréo-numérisation (B8-S, 2e ordre) avec une précision moyenne quadratique de l'ordre de trois mètres. Ces données ne sont pas structurées (sans topologie) et pas nettoyées (erreur de fermeture aux polygones et de segmentation aux intersections);
- une centaine de points terrain dont les coordonnées cartographiques ont été saisies à l'aide d'un stéréo-comparateur modèle STK-1 avec une précision moyenne quadratique d'un à trois mètres. Ces points sont principalement des intersections d'autoroutes, de routes, de chemins ou de voies ferrées;
- un MNA avec un pas de 50 m, dérivé des courbes de niveau (équidistance de dix mètres) de la carte au 1:50 000. La précision moyenne quadratique est de l'ordre de cinq mètres.

Les données de télédétection consistent en :

- une image brute (niveau 1) SPOT-P acquise le 20 juin 1987 avec un angle de prise de vue très inclinée (+29,3°) et les données d'éphémérides et d'attitude relatives à cette image;
- quatre images RAS aéroportées (direction Nord-Sud) acquises le 11 septembre 1990 avec le capteur IRIS du CCT (C-HH, mode étroit, angle de 45° à 76°, distance au sol, 4096 pixels par 10 000 lignes, espacement du pixel 4,0 x 4,31 m) (Livingstone et al. 1987).

Comme la largeur du couloir d'une image RAS est approximativement de 16 km, deux images ont été prises avec une visée vers l'est et deux avec une visée vers l'ouest pour créer deux mosaïques RAS radiométriquement différentes sur la zone d'essai (26 x 40 km).

L'image SPOT-P a une latitude de mesure pour les niveaux de gris de 17 à 60. Aucun traitement radiométrique n'a été effectué, sauf un étirement linéaire sur 8 bits. Les images RAS ont été traitées en temps réel dans l'avion et ont été encodées sur 8 bits. Aucun traitement radiométrique n'a été effectué sur ces images.

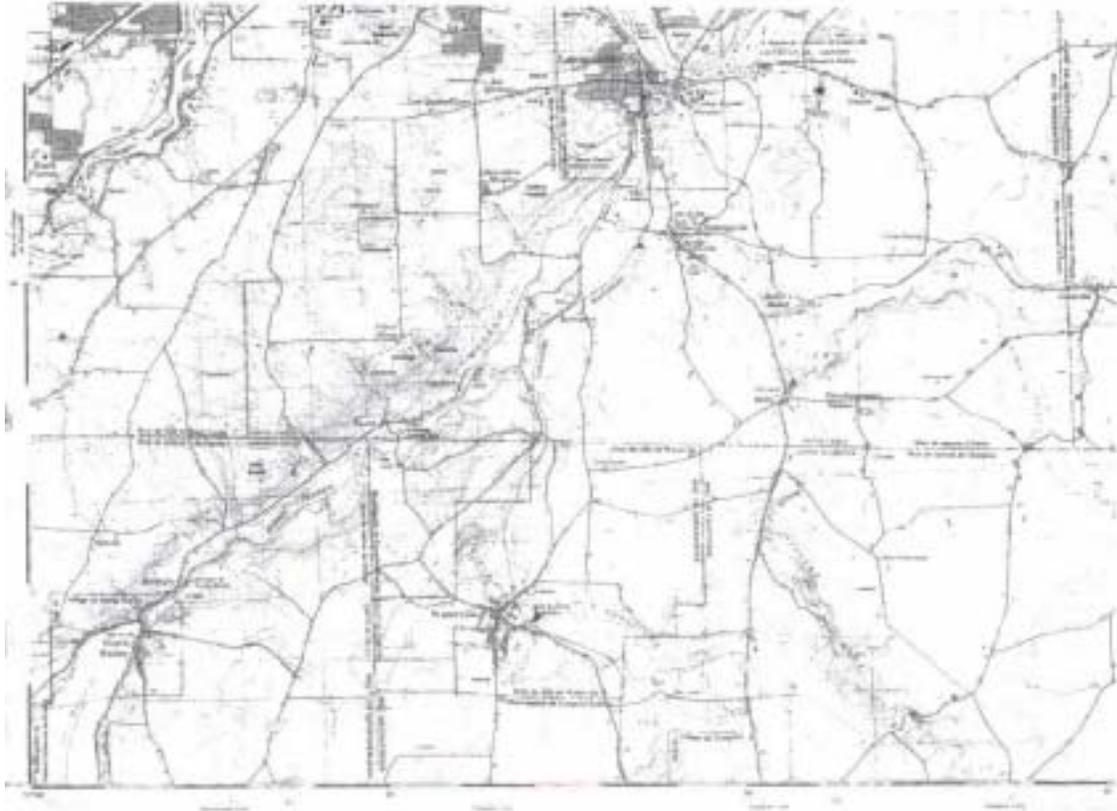


Figure 1. Moitié sud du feuillet topographique (Sherbrooke, Canada) au 1:50 000.

3. Description des traitements

Les images composées sont des produits résultant de l'intégration de données multisources. Leur création nécessite deux traitements distincts pour s'assurer que les éléments qui sont séparables spatialement et spectralement dans les images originales le soient aussi dans l'image composée :

- un traitement géométrique pour que chaque pixel des ortho-images corresponde au même élément terrain;
- un traitement radiométrique pour mixer l'information de chaque image en une image commune, afin de conserver dans celle-ci le meilleur de l'information spectrale de chaque image.

3.1 Traitement géométrique

Bien qu'il soit connu que les fonctions polynomiales ne soient pas adaptées pour corriger avec précision des images aéroportées ou spatiales, de nombreux utilisateurs s'en servent encore, sans connaître les implications sur les traitements ultérieurs et les produits résultants. Le but de cette comparaison est principalement d'évaluer et de montrer l'impact de ces différents traitements sur les résultats et l'image composée.

Pour les deux méthodes (polynomiale et photogrammétrique), les étapes du traitement sont à peu près similaires, excepté pour les paramètres de prise de vue et pour l'altimétrie (points d'appui et MNA) qui interviennent dans la méthode photogrammétrique :

- acquisition des paramètres de la géométrie de prise de vue (seulement pour la méthode photogrammétrique);
- acquisition des points d'appui : coordonnées-image et coordonnées-terrain X, Y, (Z);
- calcul des paramètres du modèle polynomial ou photogrammétrique;
- rééchantillonnage par convolution cubique (avec MNA) pour la création des ortho-images et des mosaïques, avec la même taille de pixel (5 m);
- superposition du fichier vectoriel pour vérification des résultats.

Comme les méthodes polynomiales avec leur formulation sont bien connues et documentées dans Colwell (1983), nous ne donnerons que quelques caractéristiques. La fonction polynomiale du 1er degré permet de corriger une translation, une rotation, une mise à l'échelle dans les deux axes et une obliquité. Les fonctions polynomiales de degré plus élevé (principalement 2e et 3e) permettent de corriger des distorsions plus importantes. Mais elles sont en général limitées (petite image, terrain plat), car elles ne reflètent pas les causes des distorsions lors de la formation de l'image. De plus, une des hypothèses de ces fonctions est que le terrain est plat (pas de courbure terrestre) et sans relief.

Le modèle photogrammétrique avec sa formulation a été décrit en détail pour les images SPOT-HRV (Toutin 1986) et pour d'autres types d'images (Toutin et al. 1992). Ce modèle représente la loi physique de transformation de l'espace terrain à l'espace image. Le développement des équations finales repose sur des principes liés à la photogrammétrie (condition de colinéarité), à l'orbitographie (trajectoire de vol représentée par une ellipse osculatrice), à la géodésie (utilisation d'une ellipsoïde de référence) et à la cartographie (conformité de la projection).

L'utilisation de ces principes dans le développement des équations finales a été détaillée dans Toutin, 1986; ils permettent d'intégrer et de combiner entre elles les différentes distorsions lors de la formation de l'image, à savoir :

- les distorsions relatives à la plate-forme (position, vitesse, orientation);
- les distorsions relatives au capteur (angles d'orientation, temps d'intégration d'une ligne, champ de vue instantané);
- les distorsions relatives à la Terre (géoïde-ellipsoïde), dont le relief; et
- les distorsions relatives à la projection cartographique (ellipsoïde-plan cartographique).

Les principales caractéristiques et la comparaison des deux méthodes (polynomiale vs photogrammétrique) sont résumées au tableau 1 (Colwell, 1983; Toutin et Carbonneau, 1989).

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques des deux méthodes

MÉTHODE POLYNOMIALE	MÉTHODE PHOTOGRAMMÉTRIQUE
Ne respecte pas la géométrie de prise de vue	Respecte la géométrie de prise de vue
N'est pas relié aux causes des distorsions	Reflète les différentes distorsions
Ne tient pas compte de l'attitude	Utilise les données d'éphémérides et d'attitude
Ne corrige pas pour l'altimétrie	Tient compte de l'altimétrie (MNA)
Corrige localement aux points d'appui	Corrige globalement l'image
Ne filtre pas les erreurs	Filtre les erreurs grâce à la connaissance de la géométrie
Pas de compensation simultanée d'images	Compensation simultanée de plusieurs images
Correction d'image à image pour l'intégration	Correction d'images à terrain
Nécessite beaucoup (20) de points d'appui par image	Utilise peu (3-8) de points d'appui par image
Sensible à la distribution des points d'appui	Peu influencé par la distribution des points d'appui (modèle global)
Problème de choix des points de liaison	Choix des points d'appui en fonction de chaque image

3.2 Traitement radiométrique

Il existe plusieurs méthodes pour mixer l'information spectrale à partir de différentes images (Chavez et al. 1991) :

- le codage rouge-vert-bleu (RVB);
- l'analyse des composantes principales (CP);
- le codage intensité-teinte-saturation (ITS); et
- le filtre passe-haut (FPH).

Le codage RVB est utilisé directement avec trois images en assignant chaque ortho-image à une couleur : SPOT-P en rouge, RAS-ouest en vert et RAS-est en bleu.

La méthode des CP est une méthode statistique qui transforme par combinaison linéaire un jeu de données de variables corrélées entre elles en de nouvelles variables décorréliées. Cette méthode génère des nouveaux axes orthogonaux dans l'espace radiométrique appelés composantes principales. La somme de la variance reste inchangée et chaque CP consécutive a un niveau de variance décroissant. En fonction des cas d'étude, les trois premières CP sont utilisées ou alors une des CP peut être remplacée par une autre image. Dans le cas de trois images, ce sont les trois CP qui sont utilisées.

Le codage ITS peut être employé de deux façons :

- 1) les images sont directement utilisées pour moduler l'affichage RVB du codage ITS. Certains auteurs utilisent l'image de plus haute résolution spatiale ou le RAS pour l'intensité (Jaskolla et al. 1988), d'autres conseillent de moduler la saturation plutôt que l'intensité (Welch and Ehlers 1988);
- 2) les paramètres ITS sont calculés à partir de trois images ou bandes spectrales, puis un des paramètres est substitué par une quatrième image (de plus grande résolution ou une RAS) et la transformation inverse de RVB est réalisée pour mixer les images.

Comme nous ne disposons que de trois ortho-images, seule la première façon du codage ITS a été retenue dans les comparaisons des différents mixages radiométriques.

Dans la méthode FPH, on traite avec un filtre passe-haut, l'image qui a la plus grande résolution spatiale pour ensuite la combiner, pixel par pixel, avec l'image qui a la plus petite résolution spatiale mais la plus grande résolution spectrale. Cette méthode combine donc l'information spatiale de l'image de plus grande résolution spatiale avec l'information spectrale de l'image de plus grande résolution spectrale. Elle s'applique principalement pour combiner une image SPOT-P ou RAS avec une image multibande Landsat-TM ou SPOT-XS; ce qui n'est pas notre cas avec une image SPOT-P et deux images RAS.

4. Analyse des résultats

4.1 Traitement géométrique

L'analyse des résultats de traitement géométrique se réalise en deux étapes :

- l'analyse quantitative avec les résiduelles sur les points d'appui (PA), les erreurs sur les points de vérification (PV) et la comparaison avec le fichier vectoriel;
- l'analyse qualitative avec une comparaison des éléments cartographiques (routes, rivières, forêt, coupe de forêt, etc.) sur les deux ortho-images.

Le tableau 2 donne, à partir de quinze (15) points d'appui (PA), les résiduelles moyennes quadratiques et maxima (en mètres) du calcul des modèles de correction géométrique pour les méthodes photogrammétrique et polynomiale (2ième et 3ième ordre). Bien que dans la méthode photogrammétrique, seulement quatre points d'appui pour SPOT-P et sept pour RAS soient nécessaires et que le modèle photogrammétrique n'est pas sensible au nombre

de PA (Toutin et Carbonneau 1989), quinze PA ont été utilisés pour garder une consistance dans la comparaison des résultats.

Tableau 2 : Résiduelles moyennes quadratiques et maxima (mètres) sur 15 points d'appui

IMAGE MÉTHODE	RÉS.	SPOT-P		RAS1- ouest		RAS2- ouest		RAS1- est		RAS2- est		TOUS	
		Rx	Ry	Rx	Ry	Rx	Ry	Rx	Ry	Rx	Ry	Rx	Ry
Résiduelles													
Photogram- métrique	RMQ Rmax	2,7 -5,0	3,1 7,6	1,0 -1,7	2,5 4,4	6,3 -10,2	4,9 -9,9	6,1 10,0	6,1 10,6	2,9 6,4	4,3 10,6	3,5 3,6 7,8 7,3	-
Polynomiale 2ième ordre	RMQ Rmax	23,1 -50,3	3,4 6,0	4,9 -10,8	3,7 7,4	13,8 -20,8	4,4 11,6	14,0 -29,6	6,3 -9,3	13,2 -26,3	5,1 -9,7	-	-
Polynomiale 3ième ordre	RMQ Rmax	18,7 -40,6 2,4	1,3 -	4,6 -9,4	2,6 6,2	9,5 -20,2	3,6 7,4	10,1 -27,3	6,1 -7,8	9,9 -23,1	4,5 -8,5	-	-

Les résiduelles sont meilleures pour la méthode photogrammétrique que pour les méthodes polynomiales. Dans la direction X, l'écart est plus visible à cause des distorsions altimétriques qui sont modélisées dans la méthode photogrammétrique.

De plus, cette méthode permet une compensation simultanée de toutes les images en utilisant les points communs à deux ou plusieurs images comme point de liaison (condition de coplanarité). Cette compensation simultanée permet d'obtenir une meilleure précision relative des images entre elles.

Dans la méthode photogrammétrique, les résiduelles sont un bon indicateur de la précision finale (Toutin et Carbonneau 1989) car le modèle de correction est un modèle qui corrige globalement l'image. Il n'en est pas de même pour les méthodes polynomiales qui corrigent localement aux points d'appui, mais entre les PA les distorsions ne sont pas entièrement éliminées car elles ne sont pas modélisées rigoureusement.

Le fait que les résiduelles de la méthode polynomiale du 3e ordre soient meilleures que celles du 2e ordre n'implique pas une meilleure précision. En effet, dans le 3e ordre, comme il y a huit inconnues supplémentaires et le même nombre de PA, le degré de liberté dans la compensation par moindres carrés est plus petit, diminuant ainsi les résiduelles de la compensation.

Connaissant la valeur des inconnues du 3e ordre calculée pour chaque image, on peut déterminer leur effet au sol ou leur contribution dans la correction :

- pour SPOT-P, on a : $3,7 \cdot 10^{-13} \times 6\,000^3 < 0,1 \text{ m}$;
- pour RAS, on a : $2,5 \cdot 10^{-12} \times 4\,096^2 \times 10\,000 < 0,5 \text{ m}$;
 $4,5 \cdot 10^{-15} \times 10\,000^3 < 0,01 \text{ m}$.

Ces paramètres de 3e ordre sont négligeables et n'ont aucun effet dans la correction. Malgré les résultats des résiduelles, le polynôme de 3e ordre ne permet pas de mieux corriger les images.

De plus, calculées sur une vingtaine de points de vérification (PV) pointés sur les ortho-images, les erreurs sont plus grandes (10-20 m) avec la méthode polynomiale du 3e ordre qu'avec celle du 2e ordre. Pour ces raisons, l'analyse des résultats et la comparaison des ortho-images et de leur mixage ne tiendra plus compte du 3e ordre.

Le tableau 3 donne les erreurs moyennes quadratiques, maxima et le biais calculées sur une cinquantaine de PV pour les méthodes photogrammétrique et polynomiale (2e ordre). Ces PV, pointés sur les ortho-images, sont différents des 15 PA qui ont été utilisés pour le calcul des modèles de correction géométrique. Les erreurs sont donc le reflet de la précision finale des produits.

Tableau 3 : Erreurs moyennes quadratiques, maxima et biais (mètres) sur 50 points de vérification

IMAGE MÉTHODE		SPOT-P		RAS1- ouest		RAS2- ouest		RAS1- est		RAS2- est	
		Ex	Ey	Ex	Ey	Ex	Ey	Ex	Ey	Ex	Ey
Erreurs											
Photogram- métrique	EMQ	3,8	3,4	5,0	4,3	10,9	6,6	9,1	9,0	7,5	7,6
	E _{max}	-8,7	-9,9	-11,7	8,5	-24,4	-20,2	23,7	-22,8	-17,6	15,1
	Biais	1,4	-0,1	0,2	0,0	0,3	0,3	4,1	-1,8	0,3	-1,2
Polynomiale 2e ordre	EMQ	30,0	16,3	13,3	10,3	21,8	14,6	15,7	10,0	21,4	9,1
	E _{max}	-68,1	31,8	-35,7	-25,2	-46,0	35,1	46,9	27,5	-61,8	-17,5
	Biais	-11,8	11,5	-1,8	-1,4	3,8	-2,9	3,9	-0,2	3,4	-3,3

Dans tous les cas, la méthode photogrammétrique donne de meilleurs résultats que la méthode polynomiale. On remarque que, pour SPOT-P, les écarts entre les deux méthodes sont significativement plus importants, car la modélisation de l'orbite du satellite avec les éphémérides est beaucoup plus précise que celle du vol d'avion avec seulement des valeurs approchées d'hauteur, de direction, de vitesse.

Comme dans le tableau 2, les différences sont encore plus grandes dans la direction X à cause principalement des effets de l'altimétrie qui ne sont pas corrigés dans la méthode

polynomiale.

Les mosaïques RAS-ouest et RAS-est, ainsi que l'intégration des trois ortho-images va donc être réalisées avec une erreur absolue :

- de 10-15 m en X et en Y pour la méthode photogrammétrique; et
- de 30-40 m en X et en Y pour la méthode polynomiale.

L'évaluation qualitative de ces traitements géométriques se réalise sur les ortho-images et la composée couleur qui a été générée avec le codage ITS. Comme l'ortho-image totale est de 30 x 30 km avec un pixel de cinq mètres, des sous-images, représentatives de l'ensemble, sont utilisées pour cette évaluation qualitative afin de mieux voir les détails et les différences.

La Figure 2 est une comparaison de deux sous-ortho-images composées (4 km x 3 km; pixel de 5 m) par la méthode photogrammétrique (en haut) et par la méthode polynomiale (en bas) sur lesquelles le fichier vectoriel des routes (précision 3-5 m) a été superposée. Les traitements radiométriques effectuées sont les mêmes pour les deux images.

L'image du haut est beaucoup plus homogène dans les couleurs, les surfaces, les variations. Comme il y a plus de contrastes entre les éléments, leurs limites sont nettes et bien définies.

Dans l'image du bas, les variations de couleurs sont plus grandes donnant une impression de texture et l'image semble plus floue. Comme il y a moins de contraste entre les éléments, ils apparaissent moins bien définis.

Utilisant le fichier vectoriel de la carte topographique, l'analyse de certains éléments cartographiques a montré que dans l'image du bas, (les lettres a, b, ... se rapportent à des parties d'image identifiées sur la Figure 2) :

- a : les éléments linéaires (routes, rivières) sont dédoublés ou même disparus (pont, routes); ce qui correspond à une erreur relative de superposition;
- b : le manque de netteté dans cette partie ne permet de discerner la route de la forêt et des sols nus;
- c : sur des éléments surfaciques, des artefacts sont créés; il y a une inversion entre forêt (couleur verte) et coupe de forêt (couleur bourgogne);
- d : la texture et les variations de couleur ne correspondent pas à de l'information réelle.

Ces exemples, avec d'autres similaires qui peuvent être dénombrés sur ces sous-images, montrent bien que les erreurs de superposition géométrique ont générées dans l'image composée des erreurs de mixage radiométrique, des artefacts et de l'information erronée qui n'ont pas de réalité physique.

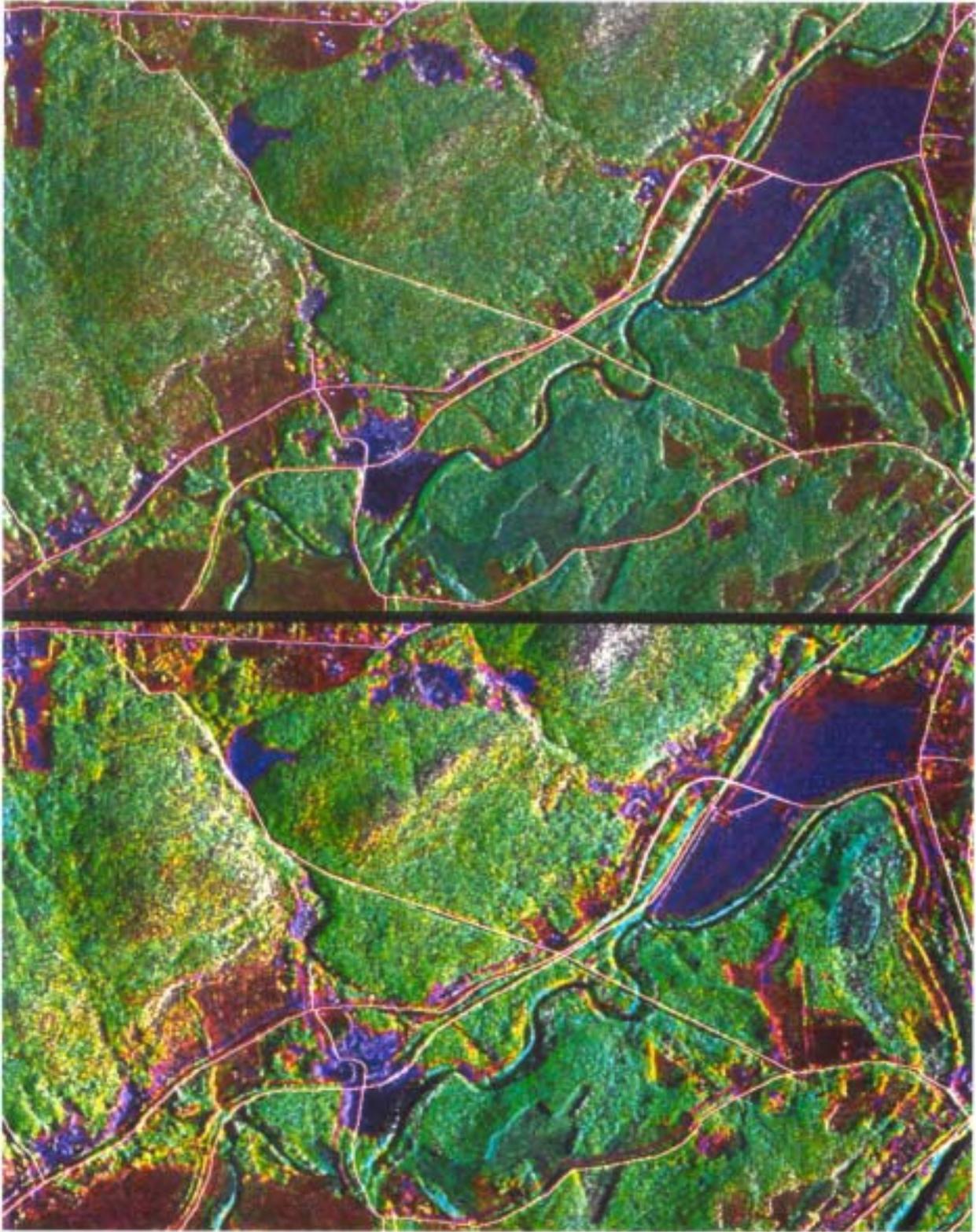


Figure 2 : Sous-ortho-images composées (4 km par 3 km ; pixel de 5 m) avec superposition du fichier vectoriel des routes : méthode polynomiale (en bas), et méthode photogrammétrique (en haut)

Le fichier vectoriel des routes, superposé à ces sous images, permet de vérifier la précision géométrique : l'analyse visuelle confirme les résultats statistiques précédents pour la méthode polynomiale (30-50 m), mais montre une amélioration pour la méthode photogrammétrique (10 m) avec des erreurs maxima de vingt mètres. Des vérifications sur d'autres parties d'images montrent la consistance des résultats. Ces valeurs correspondent à l'erreur absolue de superposition.

4.2 Traitement radiométrique

L'analyse des traitements géométriques ayant montré que les méthodes polynomiales affectent la géométrie et la radiométrie de l'image composée, les traitements radiométriques décrits en 3.2 ne sont réalisés que sur les ortho-images géocodées par la méthode photogrammétrique. Afin de mieux voir les détails, seulement des sous-images (10 x 10 km; pixel de 5 m) sont présentées.

Le codage RVB est utilisé directement en assignant SPOT-P en rouge, RAS-ouest en vert et RAS-est en bleu (Figure 3). Dans cette combinaison, les caractéristiques de chaque image (SPOT-P, RAS) sont bien conservées. Les éléments très visibles sur SPOT-P ressortent en rouge, et les éléments orientés ouest ou est ressortent en vert ou en bleu, respectivement. Ceci est particulièrement visible sur les berges.

L'analyse des CP a montré que les trois ortho-images étaient pratiquement décorréelées et que :

- la 1ère CP est composée à 99% de SPOT-P;
- la 2e CP est composée à 97% de RAS-ouest; et
- le 3e CP est composée à 97% de RAS-est.

Donc l'utilisation des trois CP n'apporte rien de plus que l'utilisation des trois ortho-images originales. De plus, les résultats sont souvent plus difficiles à interpréter, quantitativement et qualitativement, car, comme les propriétés statistiques ont été manipulées, l'intégrité originale des données n'est pas conservée (Harris et al. 1990).

Pour le codage ITS, après avoir testé différentes combinaisons, deux, qui étaient différentes entre elles, ont été retenues :

- 1) la Figure 4 est la combinaison SPOT-P en I, RAS-ouest en T et RAS-est en S;
- 2) la Figure 5 est la combinaison RAS-ouest en I, SPOT-P en T et RAS-est en S.

L'image de la Figure 4 ressemble un peu à une photographie aérienne en couleur, dans laquelle beaucoup de caractéristiques des RAS ne sont pas visibles (texture, relief, ...). Comme SPOT-P a été assignée à l'intensité qui représente la brillance de la couleur, les éléments très visibles sur SPOT-P ressortent très clairs. RAS-ouest assignée à la teinte, qui représente la couleur dominante, ne contribue pas à donner beaucoup de variation de couleur.

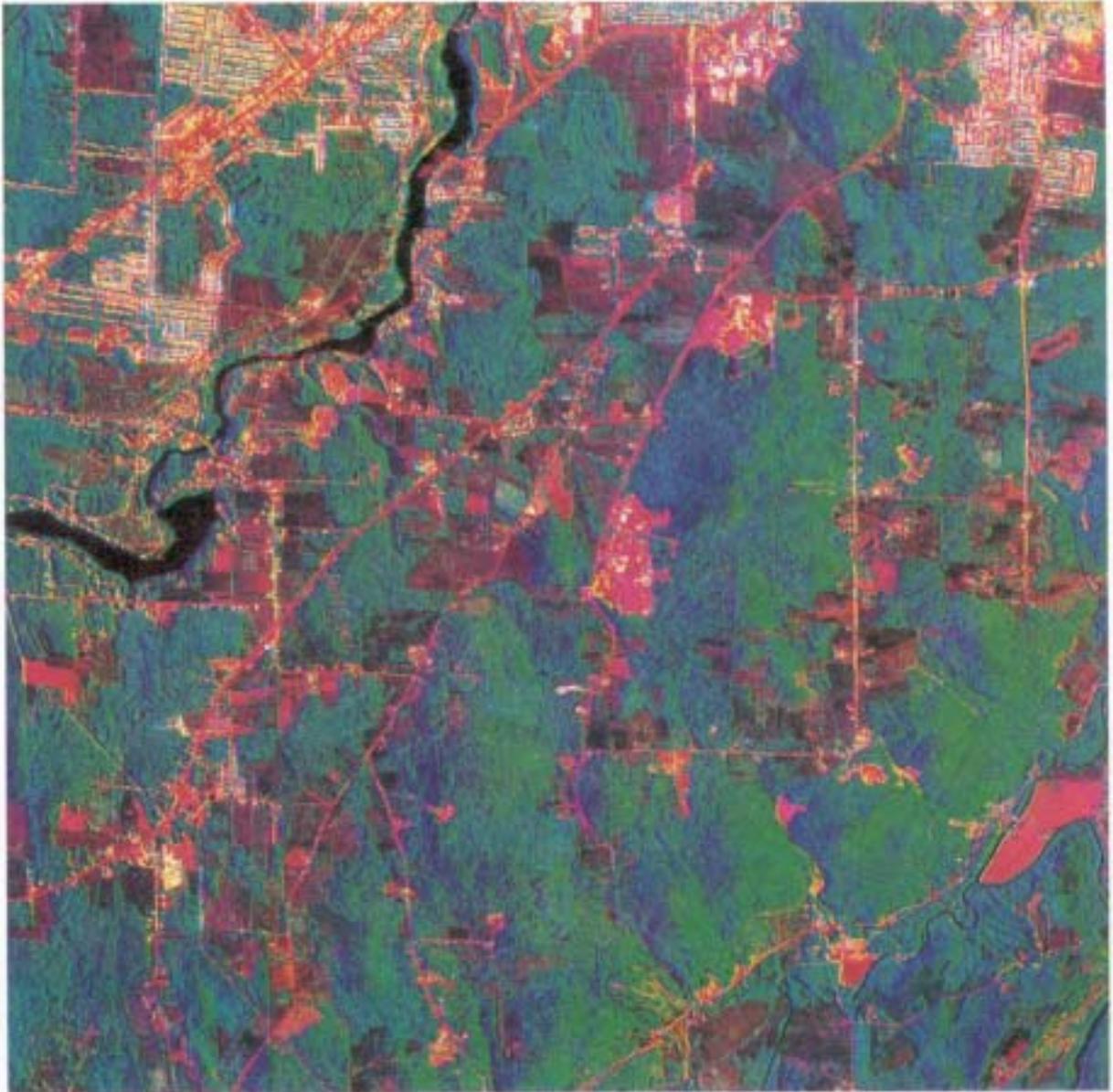


Figure 3. Sous-ortho-image composé (10 km sur 10 km; pixel de 5 m) en utilisant le codage RVB (SPOT-P/RAS-ouest/RAS-est).

L'image de la Figure 5 a une très bonne qualité visuelle et elle combine bien les caractéristiques des différentes images originales. De plus, elle montre beaucoup plus de texture grâce à la RAS-ouest assignée à l'intensité. Le contraste des couleurs est assez prononcé entre les forêts, les champs et les sols nus.

Pour comparer le résultat de ces différentes méthodes, on peut interpréter visuellement, au niveau du contenu d'image, les trois ortho-images composées pour les applications traditionnelles de la télédétection : cartographie topographique, agriculture, foresterie et géologie. Sans être une interprétation approfondie et exhaustive, cela permet de montrer

les principaux éléments qui peuvent être extraits de chaque ortho-image composée et de déterminer pour chaque application la ou les meilleure(s) combinaison(s) entre SPOT-P et deux RAS.



Figure 4. Sous-ortho-image composée (10 km sur 10 km; pixel de 5 m) en utilisant le codage ITS (SPOT-P/RAS-ouest/RAS-est).

4.2.1 Cartographie topographique

Dans les trois images, les routes peuvent être extraites facilement grâce à la résolution spatiale (5 m) et au contraste par rapport aux autres éléments. Par contre, dans l'image de la Figure 4, elles se confondent avec les immeubles et espaces bâtis, à cause du manque

de contraste et de couleur. De même les routes des nouveaux développements résidentiels dans les zones forestières n'y sont pas visibles, alors qu'elles le sont nettement dans les deux autres.

Pour les rivières, il y a peu de variation de couleur venant de la SPOT-P et le contraste modéré ne permet pas d'extraire autre chose que les limites.



Figure 5. Sous-ortho-image composée (10 km sur 10 km; pixel de 5 m) en utilisant le codage ITS (RAS-ouest/SPOT-P/RAS-est).

Dans l'image de la Figure 4, les taches blanches représentent des sédiments en suspension, bien qu'en certains endroits il pourrait s'agir de réflexion sur une surface

rugueuse, comme par exemple, au niveau du barrage. Cette information est moins visible sur l'image de la Figure 3 et invisible sur l'autre image (Figure 5).

Au niveau de la topographie, l'image de la Figure 4 ne donne aucune information, car les caractéristiques du RAS sensible au relief ne sont pas visibles. Dans les deux autres images (Figures 3 et 5), les ombres et leur orientation sont rehaussées par l'utilisation de deux RAS de visée opposée. De plus, pour la Figure 5, le codage de la mosaïque RAS-ouest en intensité accentue la texture de l'image.

4.2.2 Agriculture

Pour les trois images, les limites de champs sont bien visibles; dans les images des Figures 3 et 5, elles sont rehaussées par les clôtures, très visibles grâce à l'information du RAS très présente dans ces images. Pour la même raison, les champs avec des souches ou en reboisement sont identifiables. La latitude de mesure ("*dynamic range*") étant plus grande dans l'image de la Figure 3, elle permet une meilleure discrimination pour l'utilisation du sol et entre les champs nus ou cultivés.

4.2.3 Foresterie

Les trois images sont très bonnes pour distinguer la forêt du reste. Mais il est pratiquement impossible de distinguer les arbres à feuilles caduques des conifères, sauf à certains endroits de l'image de la Figure 4. Ceci doit venir de l'image SPOT-P en intensité, car les conifères sont plus foncés dans les images SPOT-P.

Dans l'image de la Figure 3, on peut voir une texture sur la voûte des arbres qui est reliée à la taille de la couronne et non au type d'arbres (caduques versus conifères). Les allées d'arbres isolés sont aussi visibles grâce à leur ombrage.

Dans l'image de la Figure 5, il y a une impression visuelle de la hauteur des arbres superposées au relief, qui permet d'interpréter les caractéristiques et les perturbations des plantations à partir de la hauteur du couvert forestier. De plus, cette impression, ajoutée à l'ombrage, permet de distinguer les allées d'arbres isolés.

4.2.4 Géologie

Quand le relief n'est pas utile, les trois images permettent d'extraire à peu près les mêmes éléments géomorphologiques : les deux rivières NE-SW et leurs caractéristiques (méandres, digues, barre). Mais dès que l'interprétation nécessite la connaissance du relief, les images des Figures 3 et 5 sont plus utiles : pente des rives, formation glaciaire avec des drumlins, des arêtes qui indiquent l'avancée des glaces NE-SW. De même, des linéaments NE-SW et des plissements, identifiables que sur ces deux images, sont probablement reliés à la tendance structurale de la région.

D'après ces comparaisons pour les différentes applications, les combinaisons qui ont conservé l'intégrité des données originales présentent le plus grand potentiel, à savoir le

codage RVB et le codage ITS en assignant RAS-ouest/SPOT-P/RAS-est, respectivement.

Cette dernière combinaison paraissait le plus logique dans notre cas, car SPOT-P recouvre le spectre visible, et les images RAS de plus haute résolution (4 m vs 10 m) avec plus de texture modulent mieux l'intensité et la saturation, ce qui correspond aux tests et résultats de Jaskolla et al. (1988) et Welch et Ehlers (1988).

5. CONCLUSION

Dans le but d'évaluer, de façon quantitative et qualitative, l'impact de traitements géométrique et radiométrique sur la création de produits composés qui intègrent des images de capteurs multiples (SPOT-P et RAS) et des données géocodées d'autres sources (modèle numérique d'élévation, fichier numérique de données de position d'éléments cartographiques), cet article a comparé :

- pour les traitements géométriques, des méthodes polynomiales du 2e et 3e ordre et photogrammétrique;
- pour les traitements radiométriques, différents codages (RVB, CP, ITS, FPH) pour mixer l'information spectrale

5.1 Traitement géométrique

Comme prévu théoriquement, la méthode photogrammétrique a montré sa supériorité et sa plus grande efficacité par rapport aux méthodes polynomiales (2e et 3e ordres) pour les deux types d'images.

La méthode polynomiale du 3e ordre n'apporte pas d'amélioration par rapport au 2e ordre et même dégrade la qualité de l'ortho-image : les termes du 3e ordre (x^3 , x^2y , xy^2 , y^3) ont une contribution négligeable (inférieure à 0,10 m) dans la correction des images.

Cette supériorité de la méthode photogrammétrique provient principalement du fait que le modèle mathématique respecte la réalité physique de la géométrie de prise de vue et tient compte des distorsions dues au relief. Comme dans notre site d'étude, la dénivelée n'est pas très importante (350 m), cette supériorité sera d'autant plus grande que la dénivelée sera forte.

L'impact sur la création de l'ortho-image composée est de deux ordres, quantitatif et qualitatif :

- une précision relative du pixel (5 m) et de 4-5 pixels pour les méthodes photogrammétrique et polynomiale, respectivement;
- une précision absolue de 10 m et de 30-40 m pour les méthodes photogrammétrique et polynomiale, respectivement;
- pour la méthode photogrammétrique : une image plus nette et précise, de meilleure qualité et plus proche de la réalité, dont des éléments cartographiques sont bien

- délimités et plus faciles à interpréter;
- pour la méthode polynomiale : une image plus floue avec des éléments cartographiques moins contrastés donc difficiles à interpréter et à délimiter; une image moins intégrée avec la création d'artefacts et d'informations ne correspondant pas à la réalité.

Dans la première méthode, les traitements ultérieurs seront facilités, alors que dans le deuxième, des traitements plus compliqués seront nécessaires pour retirer ces artefacts et ces fausses informations. Mais comme ceux-ci ne correspondent pas à une réalité physique et sont dépendants des conditions de prise de vue (images, terrain, ...), les méthodes et les traitements ultérieurs développés pour un jeu d'images multisources dans des conditions particulières s'appliquent très mal ou pas du tout à un autre jeu d'images multisources dans des conditions différentes, limitant ainsi l'utilisation et les applications futures de ces images composées.

5.2 Traitement radiométrique

Deux codages ont été éliminés des comparaisons : le FPH car il ne s'applique pas à ce jeu de données et les CP car elles ne conservent pas l'intégrité des données originales à cause des transformations arithmétiques/statistiques sur la radiométrie.

Les codages qui ont montré le plus de potentiel sont les transformations d'affichage de couleur : RVB et ITS, qui ne transforment pas la radiométrie. Parmi celles-là, les combinaisons (SPOT-P/RAS-ouest/RAS-est en RVB et TIS, respectivement), pour lesquelles la nature et les caractéristiques des données originales sont les mieux conservées, ont été comparées qualitativement, pour quatre applications traditionnelles de la télédétection : topographie, agriculture, foresterie et géologie. Les deux combinaisons donnent des résultats à peu près équivalents, avec un plus pour ITS en foresterie et en géologie, grâce à la texture et l'impression de relief des arbres et un plus pour RVB en agriculture grâce à la meilleure latitude de mesure provenant de la SPOT-P plus visible.

Finalement, la superposition de données multisources de télédétection avec des données vectorielles dans des systèmes d'information géographique exigent des méthodes rigoureuses de correction géométrique pour obtenir des précisions du pixel ou mieux, mais aussi des traitements radiométriques qui respectent la nature et les caractéristiques des données, afin de conserver dans l'image composée le meilleur de l'information de chaque image et leur intégrité.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie les scientifiques du CCT de leur collaboration dans l'interprétation des images composées : MM Frank Ahern, Brian Brisco, Douglas O'Brien et Vernon Singhroy. Il remercie aussi MM. Réjean Simard et Philippe Teillet du CCT pour la révision et les commentaires critiques. Le traitement d'images a été réalisé par Mme Liyuan Wu de Consultants TGIS Inc., et les aspects informatiques pour le logiciel «Système de

Rectification des Images de Télédétection» ont été traités par M. François Naud de Consultants TGIS Inc.

RÉFÉRENCES

Anuta, P.E., Freeman, D.M., Shelly, B.M. and Smith, C.R., 1978, SAR-Landsat image registration systems study, LARS Contract Report 082478, Purdue University, Ind., U.S.A.

Chavez, P.S. Jr., Sides, S.C. et Anderson, J.A., 1991, Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat-TM and SPOT panchromatic, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(3), 295-303.

Clark, J., 1980, Training site statistics from Landsat and Seasat satellite imagery registered to a common map base, *Proceedings of the ASPRS Semi-Annual Convention*, held in Niagara Falls, (U.S.A., American Society of Photogrammetry), RS.1.F.1-RS.1.F.9

Colwell, R.N., 1983, *Manual of Remote Sensing*, 2nd edition, Vol. 1, (Falls Church, Virginia, U.S.A., Sheridan Press).

Daily, M., Farr, T., Elachi, C. and Schuber, G., 1979, Geologic interpretation from composite radar and Landsat imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 45(8), 1109-1116.

Guertin, F., and Shaw, E., 1981, Definition and potential of geocoded satellite imagery products, *Proceedings of the 7th Canadian Symposium on Remote Sensing*, held in Winnipeg, Canada, September 8-11, (Manitoba Remote Sensing Centre, Canada), 384-394

Guindon, B., Harris, J.W.E., Teillet, P.M., Goodenough, D.G. and Meunier, J.F., 1980, Integration of MSS and SAR data for forested regions in mountainous terrain, *Proceedings of the 14th International Symposium of Remote Sensing Engineering* held in San Jose, Costa Rica, (USA, ERIM), 79-84.

Guindon, B., 1985, Automated control point acquisition in radar optical image registration, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 11(1), 103-112.

Harris, J.R., Murray, R. and Hirose, T., 1990, IHS transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data, *Photogrammetric Engineering of Remote Sensing*, 56(2), 1631-1641.

Jaskolla, F., Rast, M., and Bodechtel, J., 1985, The use of SAR system for geological applications, *Proceedings of the Workshop on Thematic Applications of SAR Data*, held in Frascati, Italy, SP-257, (Paris, ESA), 41-50.

Lasserre, M., et Lemieux, J.P., 1990, Zone d'essai de Sherbrooke pour les applications

topographiques de la télédétection, Rapport final, Énergie, Mines et Ressources Canada.

Livingstone, C.E., Gray, A.L., Hawkins, R.K., Olsen, R.B., Halbertsma, J.G., et Deane, R.A., 1987, CCRS C-band airborne radar: system description and test results, *Proceedings of the 11th Canadian Symposium on Remote Sensing*, held in Waterloo, Canada, 22-25 June, (University of Waterloo, Canada), 379-395.

Murphrey, S.W., 1978, SAR-Landsat image registration study, Final report, IBM Corp., Gaithersburg, MD, U.S.A.

Toutin, Th., 1986, Étude mathématique pour la rectification d'images SPOT, *Comptes rendus du XVIIIe Congrès international des géomètres*, tenu à Toronto, Canada, 1-11 juin, (Institut canadien des levés, Ottawa, Canada), 379-395.

Toutin, Th., et Carbonneau, Y., 1989, La multi-stéréoscopie pour les corrections d'images SPOT-HRV, *Journal canadien de télédétection*, 15(2), 110-119.

Toutin, Th., et Carbonneau, Y., 1992, La création d'ortho-images avec MNA : description d'un nouveau système, *Journal canadien de télédétection*, 18(3), 136-141.

Toutin, Th., Carbonneau, Y., et St-Laurent, L., 1992, An integrated method to rectify airborne radar imagery using DEM, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58(4), 417-422.

Welch, R. and Ehlers, M., 1988, Cartographic feature extraction with integrated SIR-B and Landsat-TM images, *International Journal of Remote Sensing*, 9(5), 873-889.

Zobrist, A.L., Blackwell, R.J., and Stromberg, W.D., 1979, Integration of Landsat, Seasat and other geodata sources, *Proceedings of the 13th Annual Symposium on Remote Sensing of the Environment*, held in Ann Arbor, (U.S.A., ERIM), 271-279.