

ÉVALUATION DE LA PRÉCISION GÉOMÉTRIQUE DES IMAGES DE RADARSAT

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

Téléphone : (613) 947-1293
Télécopieur : (613) 947-1385

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'un projet du programme de Développement des applications et des possibilités de recherche de l'Agence spatiale canadienne, la géométrie et la précision de localisation cartographique des images de RADARSAT sont évaluées. A partir de différents types d'images sur la région de Sherbrooke (Québec), des traitements géométriques (monoscopiques ou stéréoscopiques) sont réalisés en variant certains paramètres qui ont un impact sur la géométrie des images. A l'aide du modèle paramétrique de correction géométrique développé au Centre canadien de télédétection, les précisions de localisation géométrique sont alors quantifiées en fonction du mode, du faisceau, de l'orbite, de la résolution et de la taille du pixel, ainsi que du nombre d'images et de points d'appui.

ABSTRACT

The geometry and the accuracy of the cartographic localisation of RADARSAT images are being evaluated as part of the Canadian Space Agency's Applications Development Research Opportunity program. Geometric processing (mono or stereoscopic) of different images acquired over an area in Sherbrooke, Quebec, was done by varying those parameters that have an impact on image geometry. Using a parametric geometric modelling method developed at the Canada Centre for Remote Sensing, the accuracy of the cartographic localisation is quantified as a function of the mode, the beam, the orbit, the resolution and pixel spacing, the number of images and control points.

1. INTRODUCTION

La cartographie avec des images radar a toujours été un sujet de recherche depuis les années 60 (La Prade 1963; Rosenfield, 1968) : d'abord à partir de plates-formes aéroportées (Crandall, 1969) ensuite avec la navette spatiale américaine SIR-B (Simard *et al.*, 1986), puis à partir de satellites (principalement avec ERS). Leberl (1990), Schreier (1993), et Polidori (1996) sont de bonnes références sur les traitements et les applications cartographiques des images radar. Mais la plupart des expériences ont été principalement limitées à des travaux de recherche avec des simulations ou des données radar peu accessibles au niveau opérationnel. Le lancement de RADARSAT, le 4 novembre 1995, permet donc de combler ce vide résultant des limitations des autres capteurs. En

effet, le radar à synthèse d'ouverture (RSO) de RADARSAT peut créer 25 types d'images, de jour comme de nuit et de façon opérationnelle : chacune varie en fonction du mode d'acquisition, du faisceau et de son orientation, mais aussi du terrain imagé.

Il est bien reconnu que l'imagerie radar représente particulièrement bien les formes du terrain et la topographie grâce sa sensibilité au relief ; l'effet de rapprochement avec de forts angles d'incidence ou l'ombrage avec des angles d'incidence faibles génèrent des effets radiométriques (réponses à l'illumination) qui augmentent la perception des éléments du relief (Simonett and Davis, 1983). La combinaison de différents types d'images de RADARSAT intègrent et rehaussent donc ces caractéristiques.

De façon qualitative, la vision stéréoscopique permet cette intégration ; en plus de la variation entre les réponses à l'illumination suivant l'angle d'incidence, elle permet l'ajout de la troisième dimension. La vision stéréoscopique, une des principales caractéristiques de l'œil humain, augmente les capacités d'interprétation et d'analyse des données, car elle fournit de l'information supplémentaire sur les relations entre les formes et les structures du terrain, les pentes et les cours d'eau, les matériaux de surface et la croissance de la végétation, etc. Confirmant cette évidence biologique, des recherches en psychologie sur la vision humaine et la perception du relief ont démontré que l'interprétation d'information cartographique est beaucoup plus facile avec une représentation tridimensionnelle que bidimensionnelle (Benis *et al.*, 1988).

De façon quantitative, la vision stéréoscopique permet d'extraire des éléments planimétriques (routes, lacs, occupation du sol) dans la référence cartographique de l'utilisateur sans la connaissance de l'altitude puisqu'elle est induite dans le modèle stéréoscopique. La précision de positionnement planimétrique n'est alors pas affectée par une erreur quelconque sur l'altitude du point, car l'élément est toujours pointé suivant la verticale locale. De plus, les coordonnées planimétriques sont calculées indépendamment de la coordonnée altimétrique (Toutin, 1997). L'autre aspect très recherché et le plus à la mode de la stéréoscopie est sa possibilité d'extraire numériquement des altitudes relatives et absolues (points cotés, modèle numérique d'altitude, MNA, dénivelés, pentes, hauteurs d'arbres).

Pour utiliser efficacement les images de RADARSAT, à savoir les fusionner, les intégrer avec d'autres données multi-sources et multi-format, mais aussi pour évaluer leur potentiel pour les applications cartographiques, il est nécessaire en premier lieu de valider la qualité géométrique des images et des données auxiliaires. Les aspects radiométriques et le contenu cartographique des différents types d'images seront le sujet d'un autre article. Afin donc d'évaluer les performances cartographiques des images de RADARSAT, les objectifs de cette première partie du programme ADRO de l'Agence spatiale canadienne sont : (i) d'analyser les différents paramètres géométriques (modes, faisceaux, taille du pixel, points d'appui, etc.) qui jouent un rôle prépondérant dans le traitement géométrique en monoscopie ou en stéréoscopie, et (ii) de présenter des résultats quantitatifs sur la précision de localisation cartographique des images radar.

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 and Lemieux, 1990). La zone d'essai est constituée de deux feuillets topographiques au 1:50 000 : la moitié nord du feuillet 21E4 (Coaticook) et la moitié sud du feuillet 21E5 (Sherbrooke); 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 jusqu'à trente degrés dans les stations de ski alpin. Les données utilisées dans cette recherche consistent en :

1. des cartes-papier au 1:50 000 et 1:250 000;
2. un 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. Ces éléments ont été saisis par stéréo-numérisation (B8-S, 2^{ième} ordre) avec une précision de l'ordre de trois à cinq mètres. Ces données ne sont pas structurées (sans topologie) et pas nettoyées (erreur de fermeture aux polygones et de segmentation aux intersections);
3. trois cents points-référence dont les coordonnées cartographiques ont été saisies à l'aide d'un stéréo-comparateur modèle STK-1 avec une précision d'un à trois mètres. Ces points sont principalement des intersections entre autoroutes, routes, chemins et/ou voies ferrées. Parmi ces points, 280 sont situés à l'intérieur de la zone d'essai (les deux demi-feuillets) et les 20 autres à l'extérieur; et
4. 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 est de l'ordre de cinq mètres.

Les données RADARSAT sont présentées dans le tableau 1. Elles donnent un bon échantillonnage des différents types d'images couramment utilisées : orbites ascendantes (asc.) ou descendantes (desc.), différents modes et résolutions, et angles de visées ou d'illumination variant de 20° à 60°. Toutes les images sont en amplitude encodées sur 16 bits, en présentation distance au sol et orientées suivant la trace au sol (format SGF). Aucun traitement radiométrique n'est effectué. Le fichier des éphémérides est fourni pour chaque image.

Les figures 1 et 2 sont des exemples des images en modes fin (4 x 4 km) et standard/prolongé (7 x 6 km) respectivement, sur une sous-zone du site, le long de la rivière Massawipi avec la partie Nord du Lac Massawipi dans la figure 2. Les parties supérieures de chaque imagerie correspondent à une topographie vallonnée (pente de 10° à 25°) reliée à la formation de drumlins.

3. TRAITEMENT DES DONNÉES

L'évaluation des paramètres qui ont un impact sur le traitement géométrique, ainsi que la précision de localisation cartographique, nécessitent la connaissance de la loi de transformation de l'espace-terrain à l'espace-image. Le modèle mathématique utilisé dans cette étude, qui représente cette loi physique de transformation, a été déjà décrit en détails pour différents types d'images dans le visible

Tableau 1 : Description des données RADARSAT.

MODE ET FAISCEAU	DATE	ORBITE	ANGLES DE VISÉE (degrés)	COUVERTURE AU SOL (km)	RÉSOLUTION AU SOL (m)	TAILLE DU PIXEL (m)
Fin F1	20/10/96	Asc.	37° - 40°	50 x 50	9,1 x 8,4	6,25 x 6,25
Fin F2	21/10/96	Desc.	39° - 42°	50 x 50	8,7 x 8,4	6,25 x 6,25
Fin F4	04/10/96	Desc.	43° - 46°	50 x 50	8,1 x 8,4	6,25 x 6,25
Fin F5	08/06/96	Asc.	45° - 48°	50 x 50	7,8 x 8,4	6,25 x 6,25
Standard S1	24/10/96	Desc.	20° - 27°	100 x 100	26 x 27	12,5 x 12,5
Standard S2	03/11/96	Asc.	24° - 31°	100 x 100	22 x 27	12,5 x 12,5
Standard S4	14/10/96	Desc.	34° - 40°	100 x 100	25,7 x 27	12,5 x 12,5
Standard S5	24/05/97	Asc.	36° - 42°	100 x 100	24,2 x 27	12,5 x 12,5
Standard S7	10/05/97	Asc.	45° - 49°	100 x 100	20,1 x 27	12,5 x 12,5
Standard S7	11/10/97	Desc.	45° - 49°	100 x 100	20,1 x 27	12,5 x 12,5
Prolongé H3	04/04/97	Desc.	52° - 55°	75 x 75	19,1 x 27	12,5 x 12,5
Prolongé H6	12/01/97	Desc.	57° - 59°	75 x 75	18,0 x 27	12,5 x 12,5

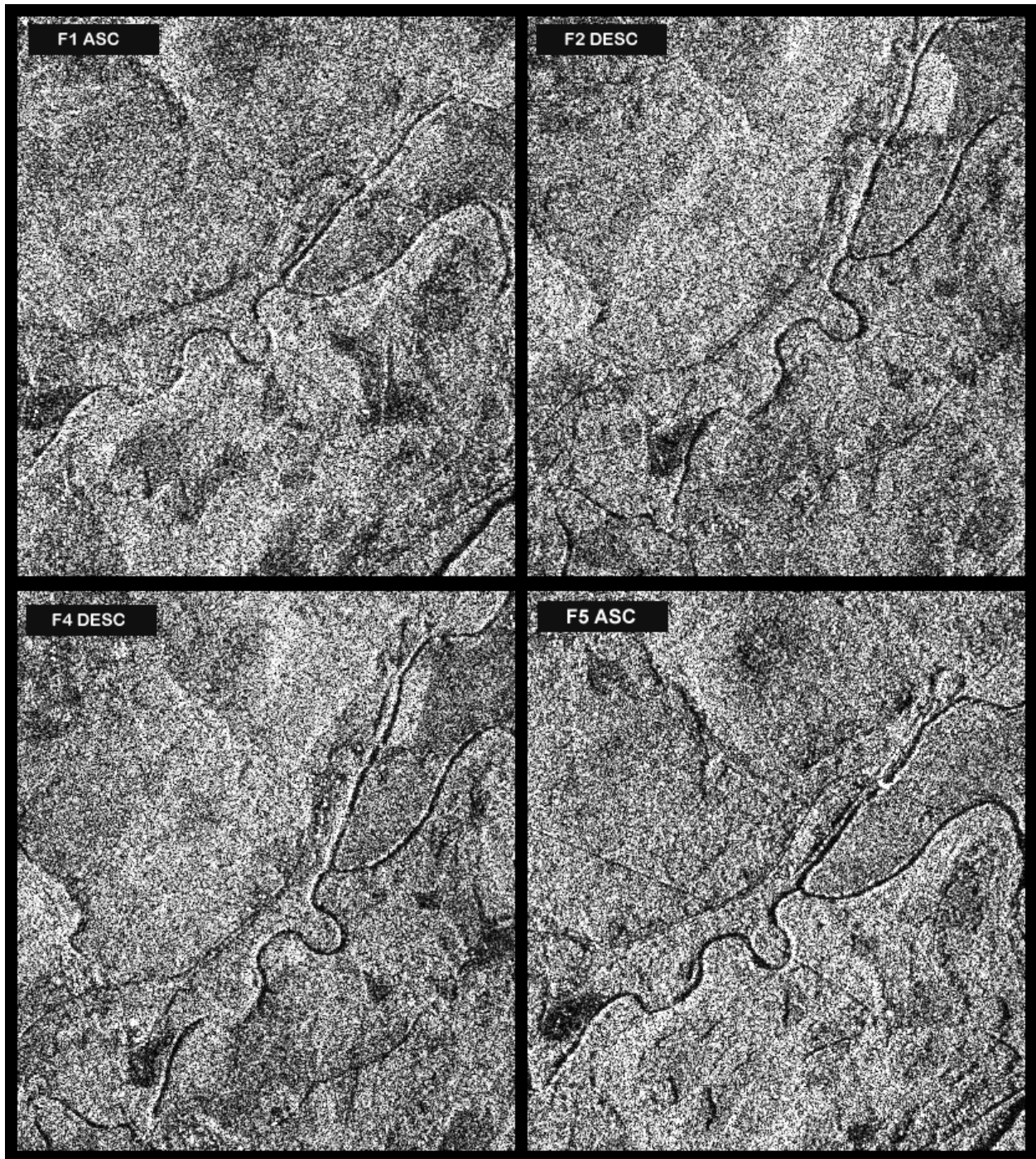
et l'infrarouge (VIR) et dans les micro-ondes (Toutin, 1983; 1995a). Le développement de cette équation repose sur des principes liés à la photogrammétrie (condition de colinéarité et de coplanarité), à l'orbitographie (trajectoire de vol représentée par une ellipse osculatrice), à la géodésie (utilisation d'un ellipsoïde de référence) et à la cartographie (conformité de la projection).

Afin d'aboutir à un nombre réduit d'inconnues décorréllées, ce développement intègre et combine entre elles les différentes distorsions lors de la formation de l'image, à savoir :

1. les distorsions relatives à la plateforme (position, vitesse, orientation);
2. les distorsions relatives au capteur (orientation, angle d'incidence, résolution);
3. les distorsions relatives à la Terre (géoïde-ellipsoïde) dont le relief; et
4. les déformations relatives à la projection cartographique (ellipsoïde-plan cartographique).

En rapport avec ce modèle géométrique, les étapes du traitement géométrique sont :

1. l'acquisition et le pré-traitement des paramètres de la géométrie de prise de vue à partir du fichier des éphémérides et de paramètres généraux sur l'image et le terrain;
2. l'acquisition des points-référence : coordonnées-images et coordonnées-terrain X, Y, Z;
3. le calcul des paramètres du (des) modèle(s) de correction géométrique avec une compensation itérative par moindres carrés ; et
4. l'évaluation des résiduelles et des erreurs sur les points d'appui et de vérification, respectivement, résultant de cette compensation par moindres carrés.



© Radarsat ASC/CSA 1996

Sherbrooke, Québec, Canada

Figure 1 : Exemples des images de RADARSAT en mode fin à partir d'orbites ascendantes ou descendantes sur une sous-zone (4 x 4 km) du site de Sherbrooke (Québec) le long de la rivière Massawipi.

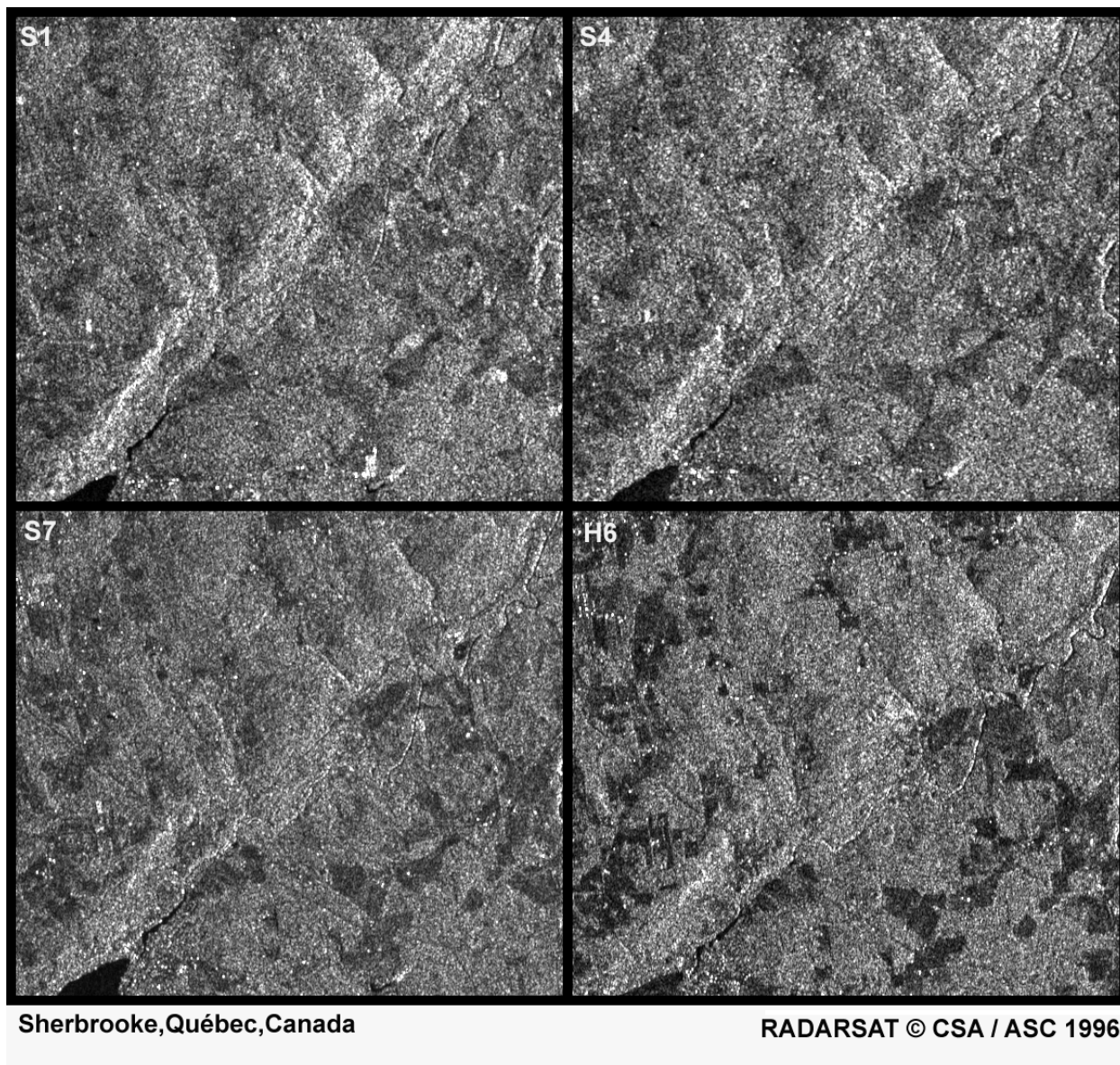


Figure 2 : Exemples des images de RADARSAT en modes standard/prolongé acquises à partir d'orbites descendantes sur une sous-zone (7 x 6 km) du site de Sherbrooke (Québec) le long de la rivière Massawipi. La partie Nord du Lac Massawipi est visible en bas à gauche.

Pour chaque image, un certain nombre de points-référence de la base de données ont été pointés pour obtenir les coordonnées-image. Ce nombre et la précision de pointé varient en fonction de l'illumination liée au coefficient de rétrodiffusion du radar : comme l'illumination est différente pour chaque image, cela affecte non seulement la visibilité mais aussi la forme et l'apparence de la cible. Le nombre de points-référence est ainsi de l'ordre de 180 pour les images en mode fin et de 120-150 pour les autres. La précision de pointé est de l'ordre d'un à deux pixels, sauf pour les images S1 et S2 avec une précision de 2-3 pixels à cause de la qualité des images et des plus grandes distorsions.

Après avoir pointé ces points en monoscopie sur chaque image indépendamment, les images ont été associées deux par deux pour créer des couples stéréoscopiques, à savoir : F1-F5, F2-F4, S1-S4, S7-H6. Les points référence sont alors pointés de nouveau en utilisant la vision stéréoscopique. Cela présente trois avantages :

1. l'utilisation de deux images permet de mieux définir le point en combinant les différentes illuminations de la cible résultant de deux angles d'incidence distincts;
2. le pointé simultané sur les deux images améliore la position relative de la cible; et
3. la perception du relief aide à reconnaître et à positionner la cible.

En faisant varier différents paramètres, des tests de calcul du modèle de correction géométrique, qui permettent d'évaluer la précision de localisation, sont effectués :

1. en fonction du mode, du faisceau et de la résolution;
2. en changeant le nombre de points d'appui et de vérification;
3. en utilisant le pointé monoscopique ou stéréoscopique avec un traitement monoscopique (une image à la fois) ou stéréoscopique (deux images ensemble);
4. en variant l'angle d'intersection¹ du couple stéréoscopique avec des visées de même côté ou de côtés opposés; et
5. en traitant plusieurs images ensemble dans une compensation simultanée par bloc.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Le premier résultat porte sur les résiduelles moyennes quadratiques (RMQ) en X et en Y résultant de la compensation par moindres carrés du calcul du modèle de correction géométrique. Le calcul a utilisé tous les points-référence comme points d'appui (de 120 à 190), pointés en monoscopie pour chaque image. Le tableau 2 donne ces résultats dans lequel les RMQ sont données en mètre, en unité de pixel (6,25 m et 12,5 m pour le mode fin et standard/prolongé, respectivement) et en résolution.

Il est intéressant de noter que les variations entre les résultats pour les différents modes varient en fonction de l'unité. Avec l'unité résolution, les résultats semblent meilleurs pour le mode standard, alors qu'avec l'unité pixel il y a une certaine uniformité, compte tenu de la précision de pointé sur S1 et S2 mentionnée précédemment. La raison est que le ratio résolution sur pixel est plus grand pour les images en modes standard (1,6 à 2,1) que pour les images en mode fin (1,2 à 1,4) ou en mode prolongé (1,4). Ces dernières images en format SGF sont donc sous-échantillonnées, réduisant ainsi le contenu d'information et la précision géométrique. Le format SGX, dans lequel les images en modes fin et prolongé sont générées avec une taille de pixel de 3,125 m et de 8 m respectivement, serait alors plus approprié pour les applications dans lesquelles la précision cartographique est importante. Ce format permettrait alors d'obtenir le même genre de précision (meilleure qu'une résolution) que pour les images en mode standard.

¹ L'angle d'intersection d'un couple stéréoscopique est la différence entre les deux angles d'incidence.

Tableau 2 : Résiduelles moyennes quadratiques (RMQ) en unité mètre, pixel et résolution du traitement géométrique en monoscopie des images en modes fin, standard et prolongé sur les points d'appui (PA) pointés en monoscopie. Les images en italique ont été acquises à partir d'orbites ascendantes.

Images	Nombre de PA	RMQ sur les PA					
		unité mètre		unité pixel		unité résolution	
		R _x	R _y	R _x	R _y	R _x	R _y
<i>F1</i>	179	<i>9,1</i>	<i>7,2</i>	<i>1,5</i>	<i>1,2</i>	<i>1,0</i>	<i>0,9</i>
F2	191	9,1	6,8	1,5	1,1	1,0	0,8
F4	188	11,3	7,9	1,8	1,3	1,4	0,9
<i>F5</i>	180	<i>7,9</i>	<i>6,4</i>	<i>1,3</i>	<i>1,0</i>	<i>1,0</i>	<i>0,8</i>
S1	132	26,6	21,4	2,1	1,7	1,0	0,8
<i>S2</i>	<i>112</i>	<i>24,8</i>	<i>19,4</i>	<i>2,0</i>	<i>1,6</i>	<i>1,1</i>	<i>0,7</i>
S4	130	19,2	17,1	1,5	1,0	0,7	0,6
S7	144	18,3	10,9	1,5	1,0	0,9	0,4
<i>S7</i>	<i>138</i>	<i>16,1</i>	<i>14,3</i>	<i>1,3</i>	<i>1,1</i>	<i>0,8</i>	<i>0,5</i>
H3	144	18,8	16,2	1,5	1,3	1,0	0,6
H6	159	19,3	14,6	1,5	1,2	1,1	0,5

Comme les RMQ en unité pixel sont du même ordre de grandeur que la précision de pointé monoscopique (1-2 pixels), les résultats démontrent que le mode (fin, standard, prolongé), le faisceau (angle d'incidence de 20° à 60°) et l'orientation (ascendant, descendant) ne sont pas des paramètres géométriques qui affectent le traitement géométrique pour autant que le modèle de correction géométrique soit rigoureux. Ces variations entre les RMQ en unité pixel dépendent donc de la précision de pointé liée à la qualité radiométrique de l'image et de la cible en fonction de sa visibilité, sa forme et son apparence sur l'image.

Le deuxième résultat permet de vérifier la précision géométrique de la correction et de la localisation. Parmi les 20 points-référence à l'extérieur du site, seuls les points bien identifiables sont utilisés comme points d'appui (PA); les autres points, à l'intérieur du site, sont utilisés comme points de vérification (PV) indépendants. Les résiduelles sur les PA reflètent la précision de modélisation et les erreurs sur les PV la précision de restitution. Mais comme l'erreur de pointé est comprise dans cette erreur, la précision des ortho-images est meilleure que celle de restitution, pour autant que le MNA soit de bonne qualité.

Bien que cinq (5) et six (6) PA, bien répartis en planimétrie et altimétrie, soient le nombre minimum théorique pour résoudre le modèle de correction géométrique pour des images en mode fin et en mode standard/prolongé respectivement, des études précédentes ont montré que 10-12 PA est un bon compromis en raison des différentes erreurs (définition de la cible, pointé, coordonnées cartographiques) sur les points (Toutin and Carbonneau, 1992). Ainsi, pour vérifier la précision du système dans des conditions normales d'opérations, le prochain test n'utilise que 12 PA.

Le tableau 3 donne les RMQ et les erreurs moyennes quadratiques (EMQ) (en mètres) sur 12 PA et 110-170 PV, respectivement. Les variations des résultats (RMQ, EMQ) entre les différentes images ne sont pas corrélées avec un paramètre géométrique (angles d'incidence, orientation de la visée, orbite ascendante ou descendante) autre que la résolution. Elles sont principalement dues à la qualité et au contenu radiométriques, donc à la qualité des pointés; en effet les EMQ sur les PV sont de l'ordre de la précision de pointé monoscopique (1-2 pixels). Ces résultats, à savoir une précision de l'ordre de ou meilleure que la résolution (mode fin, 8-10 m; modes standard et prolongé, 20-27 m), confirment de précédentes recherches avec d'autres images radar (Toutin, 1995a).

Tableau 3 : Résiduelles et erreurs moyennes quadratiques, RMQ et EMQ, (en mètres) du traitement géométrique en monoscopie des images en modes fin, standard et prolongé sur 12 points d'appui (PA) et 110-170 points de vérification (PV), respectivement ($R_{xy}^2 = R_x^2 + R_y^2$). Les images en italique ont été acquises à partir d'orbites ascendantes.

MODE ET FAISCEAU	RMQ sur PA			EMQ sur PV		
	R_x	R_y	R_{xy}	R_x	R_y	R_{xy}
<i>F1</i>	6,4	4,7	7,9	11,2	9,1	14,4
F2	2,8	3,8	4,7	11,4	7,7	13,8
F4	6,2	2,2	6,6	15,7	10,4	18,8
<i>F5</i>	4,5	3,8	5,9	9,3	6,9	11,6
S1	13,7	11,6	17,9	32,4	23,1	39,8
<i>S2</i>	15,4	14,5	21,2	30,2	21,4	37,0
S4	22,2	18,9	29,2	24,3	20,4	31,8
S7	17,9	13,1	22,2	16,7	13,1	21,2
<i>S7</i>	18,3	10,9	21,0	17,8	21,7	28,1
H3	18,8	16,2	24,8	21,9	17,0	27,8
H6	16,5	15,7	22,8	19,1	16,9	25,5

L'utilisation des capacités stéréoscopiques de RADARSAT nécessite la compréhension de la méthode, des traitements associés et des paramètres afin d'obtenir les meilleurs résultats géométriques. Le tableau 4 présente des résultats (résiduelles moyennes quadratiques sur les PA en mètres) sur le traitement géométrique en monoscopie ou en stéréoscopie en fonction du pointé monoscopique ou stéréoscopique des points d'appui, et en associant différemment les images deux par deux (F1-F5, S1-S4, S4-S7, etc.). Quelque soit le couple, les meilleurs résultats sont obtenus avec la totale capacité de la stéréoscopie, à savoir le traitement mais aussi le pointé stéréoscopiques. Ces résultats, à savoir une précision de l'ordre de la résolution ou mieux, sont conformes avec les résultats précédents. Pour les mêmes raisons que celles mentionnées précédemment pour le tableau 2, les résultats sont meilleurs, proportionnellement à la résolution, en mode standard qu'en mode fin

On s'aperçoit aussi que le pointé stéréoscopique améliore les résultats des traitements en monoscopie, car on utilise les avantages de la vision stéréoscopique, mentionnées précédemment,

pour mieux définir les PA. Cette amélioration est encore plus évidente pour les images de moins bonne qualité radiométrique, S1 et S2, qui ont été associées avec une autre image de meilleure qualité (comme S7).

Tableau 4 : Résiduelles moyennes quadratiques (en mètres) sur les points d'appui (PA) des traitements géométriques en monoscopie ou en stéréoscopie avec des pointés monoscopiques ou stéréoscopiques des PA. Les images en italique ont été acquises à partir d'orbites ascendantes.

TRAITEMENT GÉOMÉTRIQUE	En monoscopie				En stéréoscopie		
	R _x	R _y	R _x	R _y	R _x	R _y	R _z
Pointé monoscopique	<i>F1</i>		<i>F5</i>		<i>F1 - F5</i>		
	9,1	7,2	7,9	6,4	33,7	7,1	32,2
	F2		F4		F2 - F4		
	9,1	6,8	11,3	7,9	90,0	15,9	71,2
	S1		S4		S1 - S4		
	26,6	21,4	19,2	17,1	65,9	22,2	48,4
	S4		S7		S4 - S7		
19,2	17,1	18,3	10,9	81,7	17,5	84,7	
S1		S7		S1 - S7			
26,6	21,4	18,3	10,9	37,8	16,5	31,2	
S7		H6		S7 - H6			
18,3	10,9	19,3	14,6	102,5	25,2	159,4	
Pointé stéréoscopique	<i>F1</i>		<i>F5</i>		<i>F1 - F5</i>		
	7,9	6,1	7,5	5,5	9,1	4,8	7,0
	F2		F4		F2 - F4		
	9,1	6,1	8,8	5,8	12,2	5,6	9,8
	S1		S4		S1 - S4		
	19,2	12,5	12,4	11,9	16,0	9,6	12,7
	S4		S7		S4 - S7		
12,4	11,9	15,5	11,3	19,7	12,2	15,7	
S1		S7		S1 - S7			
19,2	12,5	15,5	11,3	17,9	10,8	11,0	
S7		H6		S7 - H6			
15,5	11,3	17,6	14,7	19,2	13,1	19,3	

Par contre, traiter en stéréoscopie un couple d'images dont les PA ont été pointés en monoscopie entraînent une grande détérioration. En effet, les résiduelles R_x et R_z, et dans une moindre mesure R_y, ne sont plus du tout du même ordre de grandeur : un rapport de 5 à 10 par rapport au traitement en monoscopie qui se traduit par une erreur de 5 à 8 résolutions dans les pires cas tels que F2-F4 et S7-H6. La comparaison de différents couples permet de constater que cette détérioration s'accroît :

- plus l'angle d'intersection du couple décroît, F1-F5 versus F2-F4, et S1-S7 versus S1-S4 ou S4-S7;
- plus les angles de visée des images du couple deviennent rasants pour un angle d'intersection à peu près constant, telle la séquence S1-S4, S4-S7, et S7-H6.

Mais pour des angles de visée et d'intersection à peu près équivalents (F1-F5 et S4-S7), la détérioration dans les directions en X et Z est à peu près équivalente et proportionnelle à la résolution de l'image : 8 à 9 m en monoscopie (1 résolution) versus 33 m en stéréoscopie (4 résolutions) pour F1-F5, et 21 m en monoscopie (1 résolution) versus 84 m (4 résolutions) pour S4-S7.

La raison de cette détérioration est donc purement géométrique puisque les points d'appui sont des cibles relativement bien définies radiométriquement dans les images radar (routes, chemin de fer, etc.). Même si ceux-ci sont bien pointés indépendamment pour chaque image avec une précision d'un à deux pixels, cela crée donc une parallaxe artificielle entre les deux images qui génère ainsi une erreur dans le stéréo-modèle, principalement en X et en Z. Due à la géométrie à visée de même côté de ces couples stéréoscopiques, cette erreur croît alors avec des faibles angles d'intersection ou des angles de visée rasante.

Par conséquent, il est recommandé d'utiliser la vision stéréoscopique pour l'acquisition des PA dans les cas où on a deux images, même si on ne réalise que des traitements en monoscopie, tels que fusion d'ortho-images, création de mosaïques, etc. Mais, il est impératif de le faire dans toute application qui fait appel à la stéréoscopie avec des images radar (extraction d'informations cartographiques, de MNA, etc.), afin d'éviter de créer le stéréo-modèle avec des erreurs de plusieurs résolutions : erreurs qui vont ensuite se propager dans l'extraction de l'information planimétrique ou altimétrique.

Ces résultats sont conformes aux études théoriques sur la stéréoscopie radar, qui ont démontré que la précision en distance-temps et en altitude s'améliore avec l'angle d'intersection (LaPrade, 1963; Leberl, 1990). Ces études de propagation d'erreur ne s'appuient que sur les aspects géométriques de la stéréoscopie comme pour les images dans le visible, et ne tiennent pas compte des aspects radiométriques. Elles s'appliquent donc très bien à notre recherche et à ses différents tests sur les points-référence généralement bien définis sur les deux images, et pour lesquels la radiométrie joue un rôle secondaire par rapport à la géométrie, comme on a pu le constater avec les résultats en monoscopie (Tableaux 2 et 3). Par contre, cela ne sera plus le cas dans l'extraction d'éléments (MNA, forêt, etc.) moins bien définis pour laquelle la radiométrie a un rôle aussi important que la géométrie.

La figure 3 représente les RMQ en X, Y et Z en fonction de l'angle d'intersection pour différentes combinaisons de couples à visée de même côté et de côtés opposés. Ces résultats pratiques confirment l'évaluation de propagation d'erreur en distance-temps et en altitude : ceci est remarquable pour les faibles angles d'intersection entre 4° et 23° avec un palier à partir de 14°. Les variations pour les grands angles (89° à 101°) ne sont pas significatives, bien qu'on note une plus grande homogénéité qui résulte d'une géométrie stéréoscopique meilleure et plus robuste. Ceci

confirme de précédentes recherches sur la supériorité des couples à visée de côtés opposés (Fullerton *et al.*, 1986; Toutin, 1995b).

Dans la direction Y, qui correspond approximativement au sens de déplacement du satellite, les variations sont négligeables; la géométrie du couple stéréoscopique, approximativement perpendiculaire au sens de déplacement du satellite n'a guère d'impact.

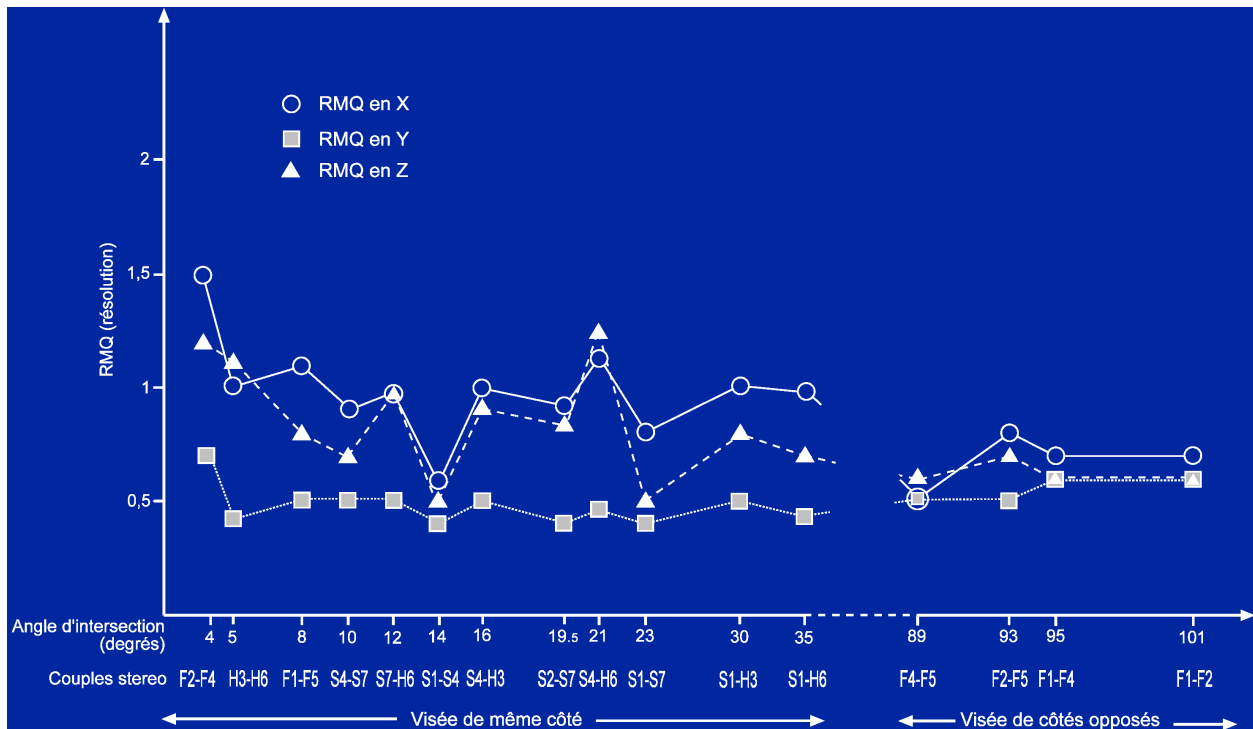


Figure 3 : Résiduelles moyennes quadratiques (RMQ) (en résolution) du traitement stéréoscopique des différents couples d'images sur les 120 - 180 points d'appui (PA) pointés en stéréoscopie, en fonction de l'angle d'intersection.

Le dernier résultat est la comparaison d'une compensation simultanée, pour une compensation par blocs, en fonction du nombre d'images (Tableau 5). Ce test est utile pour vérifier la précision d'une mosaïque de moins de dix images de RADARSAT acquises de modes, de faisceaux et d'orbites différents. Bien que chaque image ait utilisé des PA dans la compensation par blocs, ceux-ci sont aussi utilisés comme points de liaison entre chaque couple d'images pour augmenter la précision relative entre elles. Cela augmente d'autant le nombre d'équations dans le système d'équations normales de la compensation par moindres carrés; et plus il y a d'images, plus il y a d'équations dues aux points de liaison.

Seulement les quatre images en mode fin et deux des images en mode standard ont été utilisées afin de ne pas trop mélanger les modes et leur différente résolution pour pouvoir comparer les résultats. A partir des images en mode fin toutes les combinaisons ont été calculées. Les différences des résultats dans chaque groupe (1, 2, 3 images) étant faibles, seule une moyenne pour chaque groupe

a été retenue. Pour le groupe 5 images, seulement les deux cas d'une image en mode standard combinée avec les quatre images en mode fin ont été calculés. On peut du reste constater qu'à partir de 5 et 6 images, la moins bonne résolution de ces images a un léger impact sur les résiduelles, mais qu'elles sont quand même meilleures que les résiduelles (15-20 m) pour les couples d'images en mode standard (Tableau 4). En règle générale, comme ces résiduelles restent stables en fonction du nombre d'images traitées simultanément, cela permettra d'obtenir des précisions relatives de l'ordre de la résolution ou mieux pour un bloc d'images ou une mosaïque de RADARSAT.

Tableau 5 : Résiduelles moyennes quadratiques, RMQ (en mètres), sur les points d'appui pour une compensation par bloc en fonction du nombre d'images.

NOMBRE D'IMAGES	1	2		3	4	5	6
		Même côté	Côté opposé				
RMQ							
R _x	8,4	10,6	6,4	6,4	6,6	8,7	9,3
R _y	5,9	5,2	4,6	4,5	4,2	5,7	6,5
R _z	---	8,4	5,5	5,6	5,9	7,7	8,9

5. CONCLUSIONS

Cet article a présenté des résultats sur l'évaluation de la géométrie des images de RADARSAT. A partir de différents modes et faisceaux imagés sur la région de Sherbrooke (Québec), des traitements géométriques différents ont été réalisés pour évaluer la précision de localisation cartographique en fonction de certains paramètres ayant un impact sur la géométrie des images. Le modèle de correction géométrique utilisé est celui qui a été développé au CCT pour différentes types d'image (VIR, RSO). L'ensemble de ces résultats peut se résumer ainsi :

1. une précision d'une résolution ou mieux est possible quel que soit le mode et le faisceau;
2. 10-12 points d'appui permettent d'obtenir cette précision dans des conditions normales d'opération;
3. le sous-échantillonnage des images en mode fin utilisé pour le format SGF réduit un peu le contenu d'information et la localisation géométrique par rapport à sa résolution;
4. le format SGX (pixel de 3,125 m) devrait alors être considéré dans les applications topographiques pour obtenir une précision meilleure qu'une résolution comme pour le mode standard;
5. le pointé stéréoscopique des points d'appui améliore les résultats au niveau précision et robustesse pour les deux types de traitements, mais plus particulièrement en stéréoscopie. C'est donc un pré-requis pour toute application utilisant deux images et plus particulièrement pour celles utilisant explicitement la stéréoscopie (création de MNA);
6. la précision d'un couple stéréoscopique à visée de même côté s'accroît avec l'angle d'intersection, en accord avec les prévisions théoriques de propagation de l'erreur géométrique;
7. la précision d'un couple stéréoscopique à visée de côtés opposés ne varie pas significativement avec l'angle d'intersection;

8. un couple stéréoscopique à visée de côtés opposés donne des résultats meilleurs et plus robustes qu'un couple à visée de même côté (précision de moins d'une résolution versus une ou plus d'une résolution); et
9. la compensation simultanée par bloc pour une meilleure précision relative entre plusieurs images permet d'obtenir les mêmes résultats qu'avec une ou deux images.

Cet ensemble de résultats confirme la précision élevée de localisation géométrique d'un système radar et de sa modélisation mathématique. Les performances de la cartographie radar sont alors plutôt limitées par les aspects radiométriques (illumination, identification, pointé, appariement, etc.) que par les aspects purement géométriques (modes, faisceaux, angles, etc.). La prochaine étape de cette étude ADRO est donc de se pencher sur ces aspects radiométriques et le contenu d'information en fonction des différentes images pour l'extraction d'information altimétrique ou planimétrique, tels les modèles numériques de terrain ou les routes, respectivement.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie l'Agence spatiale canadienne pour avoir commandité les images de RADARSAT dans le programme ADRO du Plan spatial à long terme. Il remercie MM. J.-C. Deguise et R. Touzi du Centre canadien de télédétection ainsi que les réviseurs anonymes pour leurs commentaires. MM. René Chénier et Daniel Alvarez de Consultants TGIS inc. ont contribué à l'acquisition et aux pré-traitements des données.

RÉFÉRENCES

Benis, S.W., J.L. Leeds and E.A. Winer, 1988. Operator Performance as a Function of Type of Display: Conventional Versus Perspective, *Human Factors*, Vol. 30, pp. 162-169.

Crandall, C., 1969. Radar Mapping in Panama, *Photogrammetric Engineering*, Vol. 35, No. 7, pp. 641-646.

Fullerton, J.K., F. Leberl and R.E. Marke, 1986. Opposite-Side SAR Images Processing for Stereo-Viewing, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 52, No. 9, pp. 1487-1498.

LaPrade, G., 1963. An Analytical and Experimental Study of Stereo for Radar, *Photogrammetric Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 294-300.

Lasserre, M. and J.P. Lemieux, 1990. Sherbrooke Data Set for Topographic Applications of Remote Sensing, Final Report, EMR, Canada, 40 pages.

Leberl, F., 1990. *Radargrammetric Image Processing*, Norwood, MA, Artech House.

Polidori, L., 1996. *Cartographie radar*, Gordon & Breach Science Publishers, Amsterdam, Pays-Bas.

Rosenfield, G.H., 1968. Stereo Radar Techniques, *Photogrammetric Engineering*, Vol. 34, No. 4, pp. 586-594.

Schreier, G., 1983. *SAR Geocoding and Data Systems*, Wichmann, Karlsruhe, Germany.

Simard, R., F. Plourde and Th. Toutin, 1986. Digital Elevation Modelling with Stereo SIR-B Image Data, Proceedings of the Symposium of Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management, Enschede, The Netherlands, pp. 161-166.

Simonett, D.S. and R.E. Davis, 1983. Image Analysis - Active Microwave, Manual of Remote Sensing (2nd ed.) American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 1125-1181.

Toutin, Th., 1997. Single Versus Stereo ERS-1 SAR Imagery for Planimetric Feature Extraction, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, No. 18, pp. 3909-3914.

Toutin, Th., 1995a. Multisource Data Fusion with an Integrated and Unified Geometric Modelling, *EARSel Journal "Advances in Remote Sensing"*, Vol. 4, No. 2, pp. 118-129.

Toutin, Th., 1995b. Opposite Side ERS-1 SAR Stereo Mapping over Rolling Topography, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 34, No. 2, pp. 543-549.

Toutin, Th. and Y. Carbonneau, 1992. MOS and SEASAT Image Geometric Correction, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, No. 3, pp. 603-609.

Toutin, Th., 1983. Analyse mathématique des possibilités cartographiques du système SPOT, Mémoire de DEA, Paris, France. 74 pages.