Télédétection, 2001, Vol. 2, n° 2, p. 103-117
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2001 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *GB Science Publisher*
Imprimé en France

Cartographie géologique à l'aide du capteur RSO de RADARSAT-1 : cas de l'île Axel Heiberg, Arctique canadien

SIMON RIOPEL [a*], ANDRÉ DESROCHERS [b], MARC D'IORIO [c], PAUL BUDKEWITSCH [d] et BENOÎT BEAUCHAMP [e]

[a] *Centre géoscientifique Ottawa-Carleton, Département des Sciences de la Terre, Université d'Ottawa, 140, rue Louis Pasteur, Ottawa, On K1N 6N5 ; courriel : sriopel@oreo.uottawa.ca*
[b] *Centre géoscientifique Ottawa-Carleton, Département des Sciences de la Terre, Université d'Ottawa, 140, rue Louis Pasteur, Ottawa, On K1N 6N5 ; courriel : aldesroc@science.uottawa.ca*
[c] *Centre canadien de télédétection, Ressources naturelles Canada, 588, rue Booth, Ottawa, On K1A 0Y7 ; courriel : marc.diori@ccrs.nrcan.gc.ca*
[d] *Centre canadien de télédétection, Ressources naturelles Canada, 588, rue Booth, Ottawa, On K1A 0Y7 ; courriel : paul.budkewitsch@ccrs.nrcan.gc.ca*
[e] *Commission géologique du Canada, 3303, 33rd ST. NW, Calgary, AB T2L 2A7 ; courriel : bbeaucha@rncan.gc.ca*

(soumis le 28 mars 2000 ; révisé le 30 juin 2000 ; accepté le 4 octobre 2000)

Des images radar à synthèse d'ouverture (RSO) de RADARSAT-1 couvrant le secteur nord de l'île Axel Heiberg ont été acquises dans le but d'évaluer leur potentiel pour la cartographie géologique dans un environnement froid et aride avec une topographie relativement accidentée. Ces images acquises avec les faisceaux fin, standard et prolongé haute incidence ont différentes résolutions, couvertures, directions de visée, angles d'incidence et dates d'acquisition. Les contacts géologiques des principales successions tectono-stratigraphiques du bassin de Sverdrup et de la zone mobile Franklinienne y sont identifiés. De nombreuses intrusions tabulaires post-Paléozoïques ont aussi été identifiées. Les éléments structuraux et les linéaments sont mieux représentés dans les images acquises avec des angles d'incidence élevés car le repliement est restreint dans cette région relativement accidentée. Les variations saisonnières de la teinte radar associées à la fonte locale du mollisol sont clairement visibles lorsqu'on compare des images RSO de RADARSAT-1 acquises en hiver et en été, particulièrement dans les régions où d'épais dépôts alluvionnaires sont présents. Les images RSO de RADARSAT-1 peuvent être utilisées comme couples stéréoscopiques. Le couple stéréoscopique standard 3 / standard 7, dont les images ont été acquises avec la même direction de visée (orbite descendante), a été utilisé pour l'analyse qualitative de la région d'étude ainsi que pour générer un modèle numérique d'altitude (MNA). Ce MNA a permis une analyse planimétrique et altimétrique comme l'orthorectification d'images RSO de RADARSAT-1 et a aussi été utilisé dans l'intégration d'images et la création d'images en perspective. La capacité du capteur RSO de RADARSAT-1 d'acquérir des images indépendamment de l'illumination solaire et des conditions météorologiques ainsi que la possibilité de générer des couples stéréoscopiques, MNA, images intégrées et images en perspective, en font un outil innovateur et important pour la cartographie géologique dans l'Arctique canadien.

Mots-clefs : arctique ; géologie ; cartographie ; stéréoscopie ; modèle numérique d'altitude ; RADARSAT-1.

Geological mapping using the SAR sensor of RADARSAT-1 : examples from Axel Heiberg Island, canadian high Arctic

RADARSAT-1 synthetic aperture radar (SAR) images of the northern part of Axel Heiberg Island were acquired to evaluate their potential for geological mapping in this cold and arid environment with local rugged topography. Fine, Standard, and Extended High beam mode images with different resolutions, areas of coverage, look directions, incidence angles, and dates of acquisition were analyzed in this study. Major geological contacts in this part of the Sverdrup Basin and the Franklinian Mobile Belt are well identified in the images. Numerous post-Paleozoic tabular intrusive bodies were also identified. The structural features and lineaments were best highlighted in RADARSAT-1 SAR images with larger incidence angles where less topographic displacement is present. Significant seasonal changes in radar image tone associated with localized melting of the active layer were clearly visible between winter and summer images, especially in regions where important alluvial deposits are present. RADARSAT-1 SAR beam modes were successfully used to make stereo-pairs. The stereo-pair Standard 3 / Standard 7 descending was used for qualitative analysis and interpretation of the study area as well as digital elevation model (DEM) generation. DEM was employed for quantitative planimetric and altimetric purposes including orthorectification and the creation of integrated and perspective images. The capacity of the SAR sensor of RADARSAT-1 to provide images regardless of solar illumination and atmospheric conditions, and to produce stereo-pairs, DEM, integrated products and perspective images make it an innovative and important tool for geological investigations in the Canadian High Arctic.

Keywords : arctic ; geology ; cartography ; stereoscopy ; numerical altitude model.

* Correspond principal

1. INTRODUCTION

La cartographie géologique dans l'Arctique canadien a toujours été ardue étant donné l'importante logistique et le coût élevé que requiert une campagne de terrain dans cet environnement. De plus, les campagnes de terrain doivent couvrir un énorme territoire pendant une très courte saison de terrain. La télédétection est un outil particulièrement intéressant dans ce type d'environnement permettant la production de cartes régionales qui peuvent servir à la planification de futures campagnes de terrain et du même coup réduire les coûts et le temps pour accomplir un projet. Les capteurs qui opèrent dans les micro-ondes génèrent leur propre source d'énergie permettant ainsi une acquisition de jour comme de nuit qui n'est pas limitée par les conditions météorologiques, ou par exemple le couvert nuageux. La sensibilité du capteur radar à synthèse d'ouverture (RSO) de RADARSAT-1 aux variations topographiques, de rugosités de surface et d'humidité permet une bonne reconnaissance des éléments géologiques présents dans une région d'étude. De plus, dans les environnements arctiques comme la région d'étude où le couvert végétal est restreint, la rétrodiffusion radar porte souvent une signature provenant de la nature des sédiments en surface et des affleurements rocheux.

L'objectif de l'étude est l'évaluation du potentiel des images RSO de RADARSAT-1 pour la cartographie lithologique et structurale dans un environnement arctique. Nous avons utilisé une gamme de produits (par exemple des couples stéréoscopiques, des ortho-images, des MNA, des images intégrées et des images en perspective) qui peut être dérivée à partir de ces images radar afin de rehausser le niveau d'interprétation et d'analyse.

1.1. Localisation

La présente étude porte sur un territoire couvrant la portion nord de l'île Axel Heiberg située à environ 80° de latitude nord et 90° de longitude ouest (figure 1), dont la superficie est couverte par une image standard RSO de RADARSAT-1 (100 x 100 km). L'île Axel Heiberg fait partie de l'archipel de la Reine-Élizabeth situé au nord du chenal Parry dans l'archipel Arctique et couvrant une région de 1,3 millions de kilomètres carrés. D'importantes ressources pétrolières et de charbon sont présentes dans l'archipel Arctique, et tout particulièrement près de notre région d'étude. Dix-sept importants réservoirs d'hydrocarbures ont été découverts, à ce jour, dans les grès du Trias Supérieur-Crétacé Inférieur de la partie ouest du bassin de Sverdrup. Les principales ressources en charbon sont localisées dans le Groupe Eureka Sound d'âge Crétacé Supérieur à Paléogène de la partie est de l'île Axel Heiberg et le centre ouest de l'île Ellesmere (Trettin, 1989).

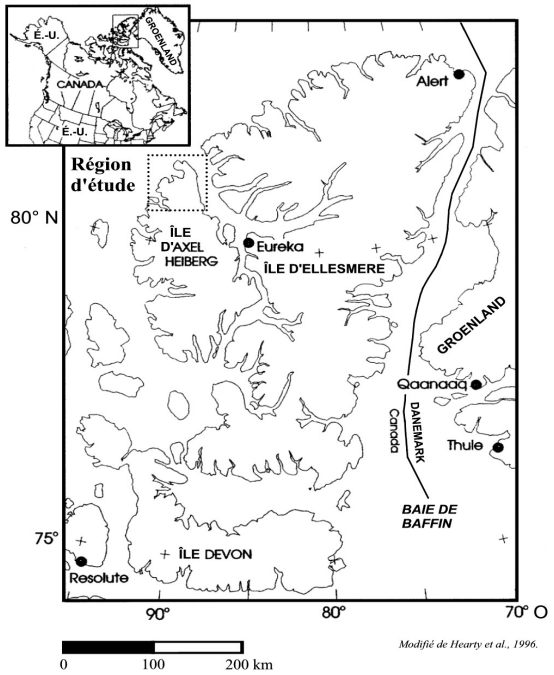


FIGURE 1 Carte de localisation illustrant la partie nord de l'archipel de la Reine-Élizabeth et la région d'étude qui couvre le secteur nord de l'île Axel Heiberg. *Location map showing the northern part of Queen Elizebeth Island and the study area covering the northern portion of Axel Heiberg Island.*

1.2. Climat

Un climat sec et aride caractérise l'archipel de la Reine-Élizabeth comme en témoigne le faible taux de précipitations annuelles (64 mm) enregistré à la station météorologique d'Eureka (figure 1) (Lewkowicz *and* Duguay, 1999). La température moyenne journalière annuelle varie entre –16 °C et –19 °C, ce qui explique la présence de pergélisol dans l'archipel, lequel peut atteindre une épaisseur d'environ 500 m dans le secteur d'Eureka (Hogson, 1991). Le pergélisol est recouvert du mollisol, la portion du sol qui gèle et dégèle en fonction des variations saisonnières de températures (French, 1976). Le mollisol a une épaisseur qui peut varier entre 40 et 90 cm (Lewkowicz *and* Duguay, 1999). Dans cet environnement, la végétation passe de la transition arbustives-herbacées à herbacées dans les régions les plus nordiques (Hodgson, 1991).

1.3. Cadre géologique

Dans la région d'étude, deux régions géologiques sont bien exposées : la zone mobile Franklinienne et le bassin de Sverdrup (figure 2). De plus, d'importants dépôts alluvionnaires sont présents dans la portion nord.

1.3.1. Zone mobile Franklinienne

La zone mobile Franklinienne est principalement composée de roches sédimentaires d'âge Protérozoïque moyen à Dévonien Inférieur qui reposent en discordance angulaire sur le Bouclier Canadien (Trettin, 1989). Cette zone comprend trois provinces géologiques : *i)* la plate-forme, *ii)* le bassin d'eau profonde et *iii)* le « terrane » Pearya (Trettin, 1991). Le bassin d'eau profonde se subdivise en une sous-province sédimentaire et une sous-province sédimentaire-volcanique. La sous-province sédimentaire-volcanique comprend les zones de plissement de Clements Markham et de Northern Heiberg (Trettin, 1989), cette dernière étant bien exposée dans la région d'étude. Les roches de la zone mobile Franklinienne ont été déformées lors de plusieurs événements dont le dernier épisode a été l'Orogenèse Ellesmérienne, active du Dévonien supérieur au Carbonifère inférieur (Trettin, 1989).

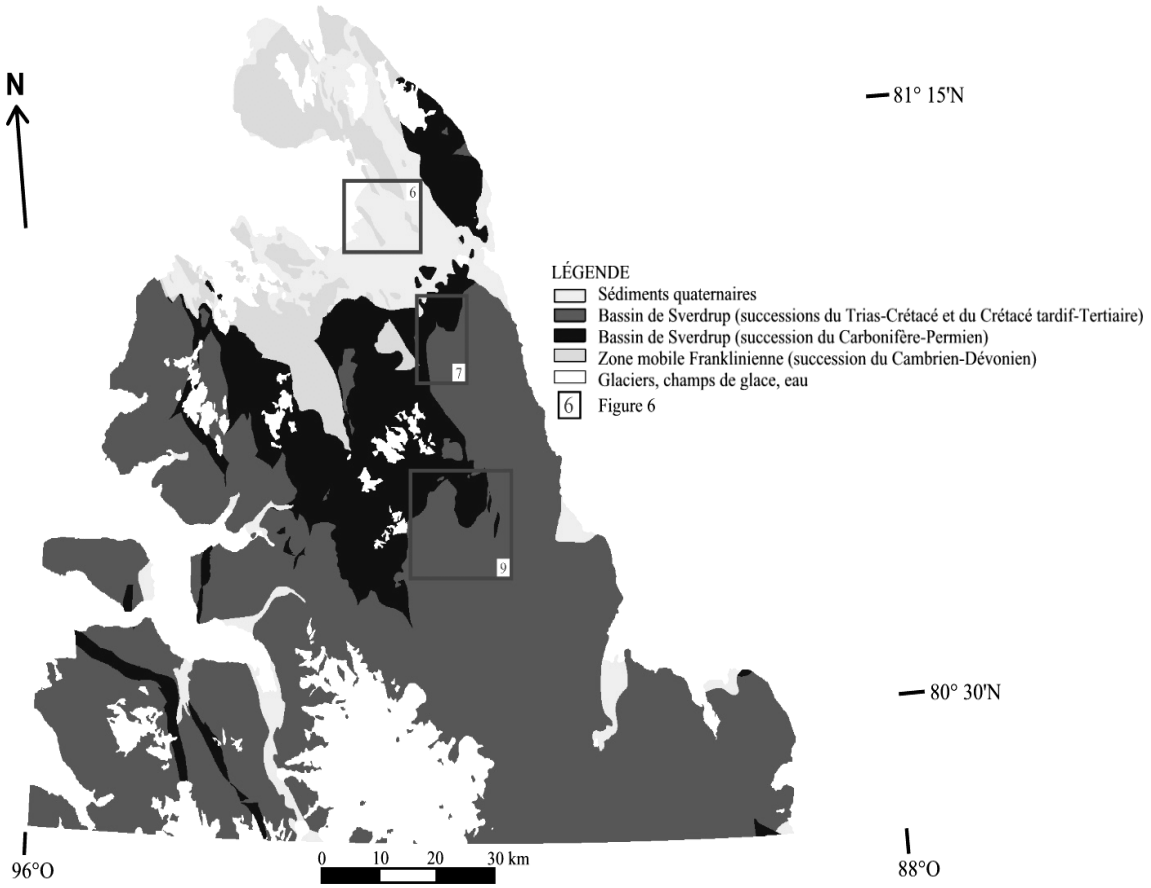


FIGURE 2 Cette figure illustre les principaux éléments géologiques présents dans le nord de l'île Axel Heiberg. Cette figure a été créée en reclassifiant la carte géologique du bassin de Sverdrup (Mayr *et al.*, 2000 ; voir le texte pour explication). La localisation des sous-scènes RSO de RADARSAT-1 discutées dans cet article est indiquée par un encadré rouge. *This figure illustrates the main geological elements present in the northern part of Axel Heiberg Island. This map was created by reclassifying the geological map of the Sverdrup Basin (Mayr et al., 2000 ; see text for explanation). The location of the RADARSAT-1 SAR sub-scenes presented in this paper are outlined in red.* (voir image couleur VII à la fin de la revue).

1.3.2. Bassin de Sverdrup

Le bassin de Sverdrup, qui s'étend sur 1300 km de longueur et 400 km de largeur, s'est développé du Carbonifère inférieur tardif au Paléogène. Les roches du bassin reposent en discordance angulaire sur celles de la zone mobile Franklinienne (Trettin, 1998) et comprennent trois successions tectono-stratigraphiques d'âges Carbonifère-Permien (> 2,5 km d'épaisseur), Trias-Crétacé (> 8 km d'épaisseur) et Crétacé tardif-Tertiaire (> 3 km d'épaisseur) (Trettin, 1991). Dans la région d'étude, on ne retrouve que les deux premières. La succession du Carbonifère-Permien est composée de sept séquences transgressives-régressives où des calcaires massifs sont abondants en bordure du bassin alors que des cherts et des shales sont abondants au centre du bassin (Beauchamp *et al.*, 1989a et b). La succession Trias-Crétacé se divise en 30 séquences transgressives-régressives où des grès sont abondants en bordure du bassin alors que des shales et des siltstones dominent au centre du bassin (Embry, 1991).

L'histoire sédimentaire du bassin de Sverdrup a été ponctuée par plusieurs événements (Beauchamp *et al.*, 1989a et b). Un des événements majeurs est une baisse importante du niveau marin durant le Permien tardif marquant le contact concordant entre les successions du Carbonifère-Permien et du Trias-Crétacé (Trettin, 1989 ; Embry, 1991). Aussi, une phase de sédimentation suivie par une phase déformation du Crétacé tardif au Paléogène se sont mises en place dans la portion nord-est des îles Arctiques. Il en a résulté une succession de roches sédimentaires clastiques dérivées du bassin de Sverdrup connue sous le nom du Groupe Eureka Sound (exposée dans le sud-est de la région d'étude).

Les successions du Carbonifère-Permien et du Trias-Crétacé sont recoupées par des dykes et des sills de composition mafique mis en place à la suite d'une période de volcanisme durant le Crétacé (Embry, 1991). Les dykes orientée N-S sont bien exposés dans la région d'étude, tout particulièrement dans la succession du Trias-Crétacé.

1.3.3. Périodes du Tertiaire et du Quaternaire

Une intense période de déformation, l'orogenèse Eurékienne, a affecté le nord des îles Arctiques durant le Paléogène (Trettin, 1989). Dans la portion nord de l'île Axel Heiberg, il en résulte la formation de l'arche Princesse Margaret et de plusieurs failles associées (Trettin, 1989 ; Okulitch *and* Trettin, 1991).

Les fjords qui recoupent l'archipel résultent du développement d'un important système de drainage durant le Tertiaire (Trettin, 1989). Des sédiments glaciaires sont abondants dans le sud du chenal Parry mais seulement à quelques rares endroits sur l'archipel de la Reine-Élizabeth. De plus, d'importantes formations meubles composées d'altérites sont présentes dans l'archipel. Ces dernières ainsi que les sédiments glaciaires constituent les sédiments quaternaires des îles Arctiques (Hogson, 1991).

1.4. Caractéristiques du satellite RADARSAT-1

RADARSAT-1, lancé en 1995, est le premier satellite canadien d'observation de la Terre. Le satellite est muni d'un capteur radar à synthèse d'ouverture (RSO) orientée pour acquérir des images du côté droit avec une fréquence de 5,30 GHz (bande C, longueur d'onde de 5,6 cm) et en polarisation HH (Parashar *et al.*, 1993). Le capteur RSO de RADARSAT-1 peut acquérir 27 types de faisceaux (35 en incluant les faisceaux fins proximaux et distaux) avec différents angles d'incidence (10-59°), résolutions (8-100 m) et superficies (moins de 50 km x 50 km à 500 km x 500 km) (Luscombe *et al.*, 1993). De plus, les faisceaux peuvent être acquis avec une direction de visée vers l'est (orbite ascendante) ou vers l'ouest (orbite descendante) (Parashar *et al.*, 1993). Les longueurs d'ondes radar peuvent pénétrer le couvert nuageux ainsi qu'une certaine épaisseur de neige sèche (Ulaby, 1982 ; Ulaby *et al.*,1986). De plus, ce capteur actif qui émet sa propre source d'énergie a la capacité de prendre des images de jour comme de nuit (Parashar *et al.*, 1993).

1.5. Données utilisées

Dix images RSO de RADARSAT-1 ont été acquises avec le support de l'Agence spatiale canadienne (Programme de développement d'applications et possibilités de recherche - ADRO, projet 087). Les faisceaux standard, fin et prolongé haute incidence, chacun caractérisé par une résolution et une couverture données, ont été choisis avec différents angles d'incidence, de directions de visée (ascendante et descendante) et de dates d'acquisition (tableau 1). De plus, des cartes topographiques au 1 : 250 000 et des cartes géologiques à l'échelle du 1 : 250 000 (Trettin, 1996 ; Thorsteinsson *and* Trettin, 1972 a et b) et du 1 : 125 000 (Mayr *et al.*, 2000 ; version numérique) ont été utilisées. Aussi, les données météorologiques enregistrées à la station Eureka (figure 1) ont été consultées.

TABLEAU 1 Description des images RSO de RADARSAT-1 utilisées dans cette étude. *Description of RADARSAT-1 SAR images acquired for this study.*

FAISCEAUX	DIRECTION DE VISÉE	ANGLE INCIDENCE	DATE D'ACQUISITION	RÉSOLUTION (portée x azimut)	FORMAT
Standard 7	Descendante	45° - 49°	15 février 1998	20,09 m x 27 m	SGX
Standard 3	Descendante	30° - 37°	13 février 1998	27,6 m x 27 m	SGX
Standard 3	Ascendante	30° - 37°	6 mai 1996	27,6 m x 27 m	SGF
Fin 1 proximal	Ascendante	36,4° - 39,6°	16 février 1998	9,1 m x 8,4 m	SGX
Fin 1 proximal	Descendante	36,4° - 39,6°	2 août 1997	9,1 m x 8,4 m	SGX
Fin 3 distal	Descendante	42,8° - 44,3°	11 février 1998	8,4 m x 8,4 m	SGX
Fin 1	Descendante	36,8° - 39,9°	17 février 1998	9,1 m x 8,4 m	SGX
Fin 1	Ascendante	36,8° - 39,9°	25 août 1997	9,1 m x 8,4 m	SGX
Prolongé haute incidence 6	Ascendante	57° - 59°	5 août 1997	18,0 m x 27 m	SGX
Prolongé haute incidence 6	Ascendante	57° - 59°	13 février 1998	18,0 m x 27 m	SGX

SGX = « system georeferenced x » (RADARSAT International, 1998). *SGF = « system georeferenced full image », (RADARSAT International, 1998)* (Denyer *et al.*, 1993).

2. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie employée dans cette étude comprend trois grandes sections : réception et géoréférence, création d'un modèle numérique d'altitude (MNA), et orthorectification et création de produits dérivés. Par la suite, les différents produits résultants de ces trois sections ont été utilisés pour l'analyse lithologique et structurale de la région d'étude.

2.1. Réception et géoréférence (méthode polynomiale)

Les étapes effectuées dans cette section sont consignées à la figure 3. Les points d'appui (PA) ont été choisis à partir de cartes topographiques à l'échelle du 1 : 250 000 pour deux images (faisceaux fin et standard) qui ont subséquemment été utilisées pour géoréférencer les huit images non corrigées. Il en résulte dix images géoréférencées selon une équation polynomiale du 1er ou 2e ordre où les PA ont des résiduelles moyennes quadratiques (RMQ) inférieures à 2 pixels en X et en Y.

De plus, la création de couples stéréoscopiques a permis de visualiser la région d'étude en 3D. Dans les environnements où la topographie est relativement accidentée, comme c'est le cas dans la région d'étude, les couples stéréoscopiques formés d'images acquises avec la même direction de visée sont recommandés pour limiter les problèmes de parallaxe (D'Iorio *et al.*, 1997). Même si la vision stéréoscopique est possible avec une petite différence entre les angles d'incidence, une grande différence est préférable pour assurer un maximum de parallaxe (e.g. 13° pour le couple standard 3 / standard 7).

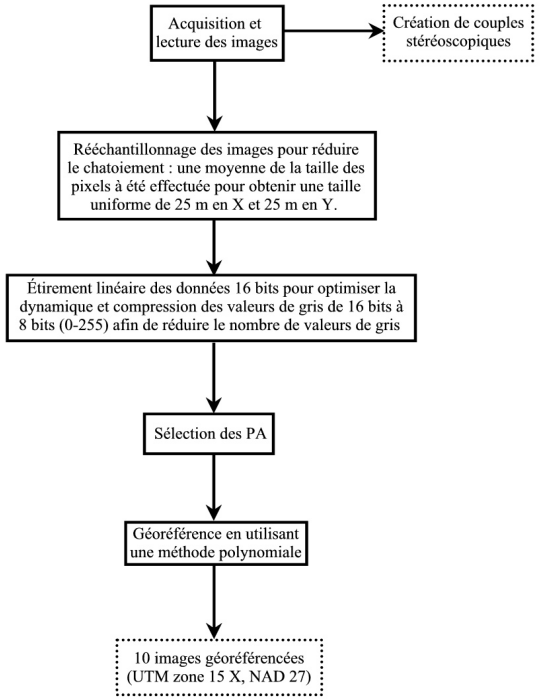


FIGURE 3 Organigramme qui illustre les différentes étapes pour géoréférencer à l'aide de la méthode polynomiale les images RSO de RADARSAT-1 utilisées dans cette étude. Le rectangle en pointillés indique les produits créés. *Flow chart illustrating the steps followed in this paper for geoferencing RADARSAT-1 SAR images using a polynomial method. The rectangle with a dashed contour shows the generated products.*

2.2. Création d'une MNA et orthorectification

Les étapes effectuées dans cette section sont consignées sur la figure 4. Le MNA a été produit à partir du couple stéréoscopique RSO de RADARSAT-1 standard 3 / standard 7 descendant, en utilisant une méthode radargrammétrique et des PA provenant de cartes topographiques à l'échelle du 1 : 250 000. Les PA, communs aux deux images, ont été pointés en stéréoscopie car le pointé monoscopique induit une parallaxe artificielle dans le modèle mathématique, qui augmente les RMQ des PA et diminue la précision du MNA produit (Toutin, 1998a et b).

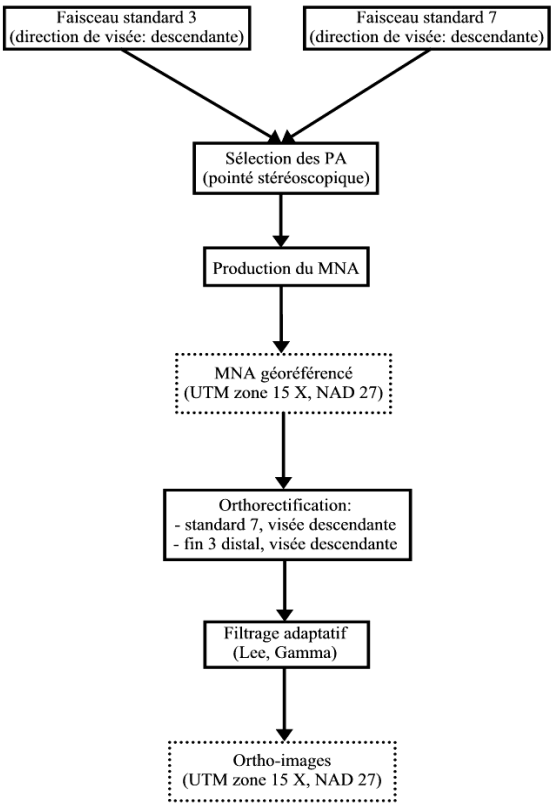


FIGURE 4 Étapes pour la création d'un modèle numérique d'altitude (MNA) à partir d'un couple stéréoscopique d'images RSO de RADARSAT-1 et d'ortho-images en utilisant une méthode radargrammétrique. Les rectangles en pointillés indiquent les produits créés. *Steps followed for digital elevation model (DEM) generation from RADARSAT-1 SAR stereo-pair and orthorectification using a radargrammetric method. The rectangles with a dashed contour show the generated products.*

Sur le tableau 2, qui contient les RMQ des PA pointés en monoscopie et en stéréoscopie de la région d'étude, on démontre la supériorité du pointé stéréoscopique. La méthode radargrammétrique considère le relief du terrain imagé, les paramètres orbitaux et la projection cartographique pour créer le MNA (Toutin, 1995 ; Toutin et Carbonneau, 1992). Le MNA produit a une précision altimétrique de l'ordre de 50 m avec 90 % de confiance, basée sur les résultats de Toutin (1999). Cette précision est supérieure à celle des MNA disponibles au Centre d'information topographique pour la région d'étude qui est de 100 m en altimétrie (André Bérubé, Centre d'information topographique, comm. pers.).

TABLEAU 2 Les résiduelles moyennes quadratiques (RMQ) en X, Y et Z pour 15 points d'appui (PA) en utilisant le pointé monoscopique *versus* stéréoscopique. *Root Mean Square (RMS) errors of 15 Ground Control Points (GCPs) in the X, Y, and Z directions using monoscopic* versus *stereoscopic plotting.*

	X – RMQ	**Y – RMQ**	**Z – RMQ**
Pointé monoscopique	31,5 m	29,5 m	27,7 m
Pointé stéréoscopique	21,1 m	19,8 m	15,0 m

Les faisceaux descendants fin 3 distal et standard 7 ont été orthorectifiées à l'aide d'une méthode radargrammétrique qui permet de corriger le repliement et de géoréférencer l'image contrairement à la méthode polynomiale qui ne corrige pas le repliement (figure 4 ; Toutin, 1995). Des PA ont été choisis pour produire le modèle mathématique (tableau 3). L'erreur planimétrique des ortho-images produites est fonction de la précision du MNA, de l'angle d'incidence et de la précision des PA (Toutin *and* Rivard, 1997). Étant donné la précision de ~50 m du MNA utilisé pour l'orthorectfication et l'angle d'incidence des faisceaux fin 3 distal et standard 7, l'erreur planimétrique des ortho-images fin 3 distal et standard 7 est de l'ordre de 50 m. Mais, lorsqu'on considère la précision des PA, l'erreur planimétrique est, cependant, supérieure à 50 m.

TABLEAU 3 Les résiduelles moyennes quadratiques (RMQ) des points d'appui (PA) utilisés pour créer les modèles mathématiques pour l'orthorectification des images RSO de RADARSAT-1 standard 7 et fin 3 distal. *Root Mean Square (RMS) errors of the Ground Control Points (GCPs) used to create the mathematical models for the orthorectification of Standard 7 and Fine 3 Far RADARSAT-1 SAR images.*

	X-RMQ	**Y-RMQ**	**XY-RMQ**	**NOMBRE de PA**
Image standard 7	21,0 m	20,9 m	29,6 m	15
Image fin 3 distal	5,45 m	7,71 m	9,44 m	12

2.3. Produits dérivés

Les étapes effectuées dans cette section sont consignées sur la figure 5. Une image chromo-

stéréoscopique permet une perception en 3D du relief avec des lunettes ChromaDepth[tm] (Toutin, 1997). Le MNA et l'ortho-image standard 7 ont subi des étalements de leur dynamique afin d'augmenter leur contraste. Aussi, leur dynamique a été compressée de 16 bits à 8 bits (0-200) pour obtenir une bonne perception du relief et augmenter le potentiel d'identification (figure 5 ; Toutin, 1997). L'image chromo-stéréoscopique ainsi produite permet de percevoir le relief de la région d'étude en 2D et en 3D ainsi que l'information provenant du radar.

La carte géologique de Mayr *et al.* (2000) a été obtenue sous forme de fichiers E00. Ces fichiers ont été importés dans un logiciel de SIG et la carte a été recréée. De plus, la carte a été reclassifiée selon les provinces et les successions exposées dans la région d'étude pour former une carte géologique simplifiée (figure 2). La carte géologique détaillée a été encodée en trois canaux rouge-vert-bleu (RVB). Pour la fusion, les canaux RVB ont été transformés dans l'espace de couleur intensité-teinte-saturation (ITS). Le canal intensité a été remplacé par l'ortho-image standard 7 et ces trois canaux ITS ont été retransformés dans l'espace RVB (figure 5 ; Harris *et al.*, 1990 et 1994). L'image fusionnée qui en résulte comprend l'information de l'image radar et de la carte géologique. Les images en perspective ont été produites à partir d'une ortho-image ou d'une image fusionnée en utilisant les attitudes du MNA (figure 5).

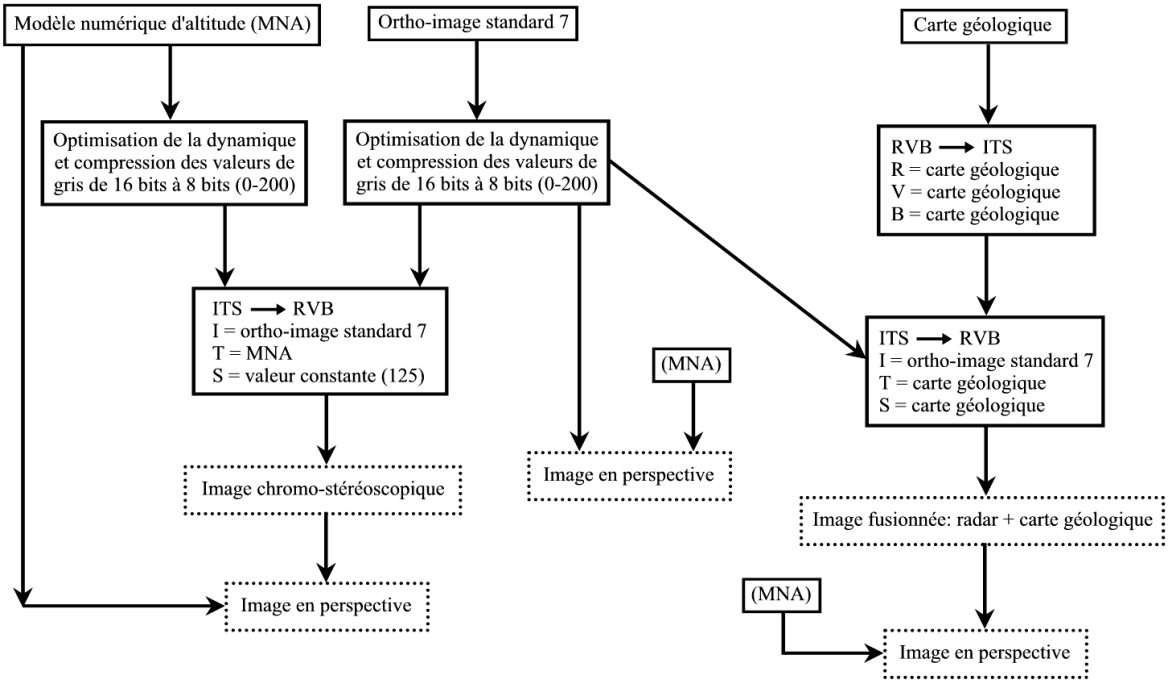


FIGURE 5 Organigramme qui illustre les différentes étapes pour l'obtention d'images chromo-stéréoscopiques, fusionnées et en perspective. Les rectangles en pointillés indiquent les produits créés. *Flow Chart illustrting the steps followed in this study to generate chromo-stereoscopic, fused and perspective images. The rectangles with a dashed contour indicate the generated products.*

3. DISCUSSION

Cette section portera sur la cartographie géologique dans un environnement arctique à l'aide d'images RSO de RADARSAT-1. Une courte description des paramètres qui influencent le signal rétrodiffusé sera présentée, suivie d'exemples de cartographies lithologique et structurale de la région d'étude.

3.1. Facteurs de contrôle du signal rétrodiffusé

L'interprétation des images radar repose sur l'étroite interaction entre les ondes radar et la surface de la Terre. Le signal rétrodifffusé est modulé par les paramètres d'acquisition et le type de terrain imagé. Les paramètres d'acquisition comprennent la direction de visée, l'angle d'incidence, la date d'acquisition et la résolution *versus* la superficie du territoire imagé. Les caractéristiques du terrain imagé qui affectent grandement le signal rétrodiffusé sont l'humidité du sol, la topographie et la rugosité de surface.

3.1.1. Paramètres d'acquisition

Direction de visée. La direction de visée est un paramètre important car plus les structures géologiques (strates, contacts, failles, dykes) sont orientées perpendiculairement à la direction de visée, plus le potentiel de détecter ces dernières est grand (Sabins, 1997 ; Lewis and Henderson, 1998). De plus, la possibilité du capteur RSO de RADARSAT-1 d'acquérir des images avec des directions de visée opposée assure qu'aucune information géologique n'est masquée par des effets de repliement ou d'ombrage.

Angle d'incidence. Le choix de l'angle d'incidence lors de l'acquisition d'une image radar est primordial car les effets de repliement augmentent avec de plus petits angles d'incidence (Raney, 1998). Il est donc préférable de choisir de grands angles d'incidence dans les régions où le relief est élevé afin de réduire au maximum le repliement (Singhroy *and* St-Jean, 1999). Avec de grands angles d'incidence, les effets d'ombrage sont accentués pour les pentes opposées à la direction de visée (Raney, 1998). Les effets d'ombrage sont toutefois utiles à l'interprétation géologique en ce sens que l'identification des linéaments est accentuée par une grande différence de teintes dans l'image radar. Dans les régions où le relief est faible, de petits angles d'incidence sont privilégiés car ils accentuent la représentation du relief ce qui contribue à l'identification de structures géologiques (Singhroy *and* St-Jean, 1999). Dans notre région d'étude, de grands angles d'incidence (par exemple 45° à 59°) ont été privilégiés pour les régions plus accidentés, comme la succession du Carbonifère-Permien du bassin de Sverdrup. Par contre, pour la succession du Trias-Crétacé du bassin de Sverdrup qui présente un relief moins important, de plus petits angles d'incidence (par exemple 30° à 37°) ont été choisis pour l'interprétation géologique.

Date d'acquisition. La date d'acquisition est un paramètre très important lorsqu'on planifie l'achat d'images radar. Les effets saisonniers (e.g. gel et dégel du mollisol) et les variations journalières météorologiques (e.g. accumulation de pluie ou de neige) affectent l'humidité du sol et par conséquent l'intensité du signal rétrodiffusé. Dans la région d'étude, certaines unités lithologiques caractérisées par différentes conditions d'humidité du mollisol, ont été cartographiées à l'aide des images radar. Étant donné que la date d'acquisition détermine le taux d'humidité dans le sol, une discussion plus approfondie sera présentée dans la section sur l'humidité du sol.

Résolution *versus* la superficie du territoire imagé. Pour cette étude, les images RSO de RADARSAT-1 acquises en faisceau standard ont été utilisées pour une cartographie géologique régionale étant donné la grande superficie de territoire imagé (100 km x 100 km). En comparaison, les faisceaux fins ont été employés pour une cartographie locale, plus détaillée, grâce à une meilleure résolution (~8 m x 8 m par rapport à ~25 m x 25 m pour les faisceaux standard), en dépit d'une diminution de la superficie couverte (50 km x 50 km) (Parashar, 1993). De plus, la grande superficie des faisceaux standard permet de produire des MNA et des images intégrées sans avoir recours à des mosaïques. Pour la région d'étude, les faisceaux standards ont servi à la production de cartes aux échelles variant de 1 : 100 000 à 1 : 500 000, tandis que les faisceaux fins, utilisés pour une cartographie locale, ont produit des cartes aux échelles variant de 1 : 50 000 à 1 : 125 000.

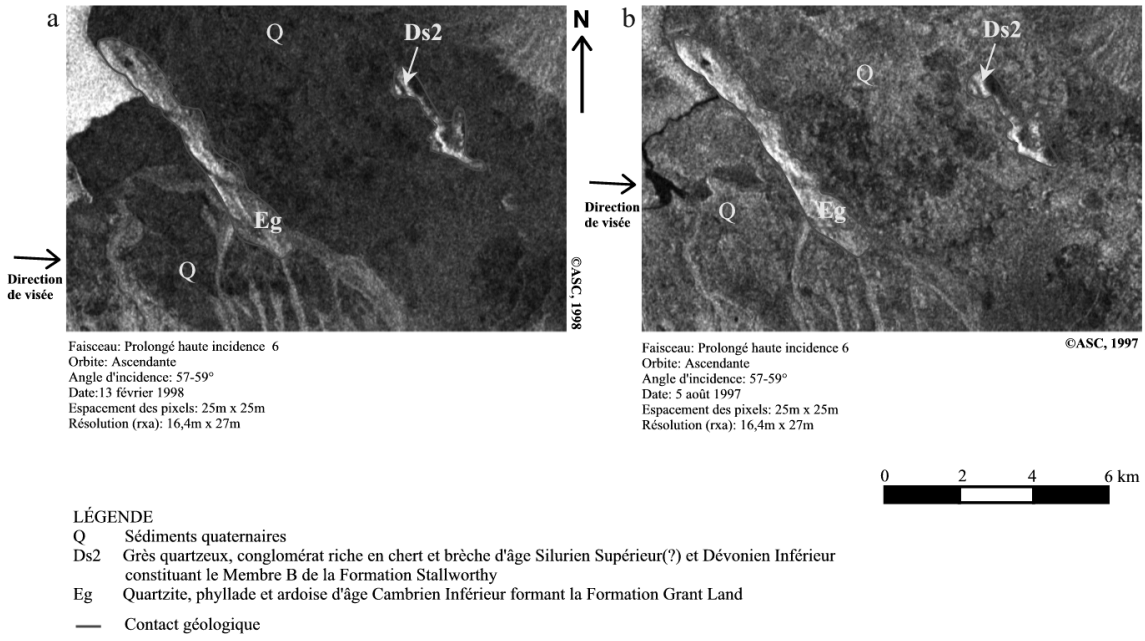
3.1.2. Type de terrain imagé

Humidité du sol. Le taux d'humidité dans le sol influence la constante diélectrique, ce qui a un effet sur le signal rétrodiffusé (Ulaby, 1982 ; Ulaby *et al.*, 1986). Une augmentation de l'humidité du sol aura pour effet d'augmenter l'intensité du signal rétrodiffusé. Dans un environnement arctique comme la région d'étude, les différences de teintes entre des images acquises avec différentes conditions d'humidité sont bien visibles lorsqu'on observe les sédiments qui forment le mollisol. Pendant la saison estivale, la température augmente produisant une saturation en eau du mollisol au-dessus du pergélisol imperméable se traduisant sur l'image radar par des teintes plus claires que dans le cas d'une image acquise en hiver.

Sur la figure 6, on montre l'effet des variations temporelles de l'humidité dans le sol sur le signal rétrodiffusé. Les deux sous-scènes RSO de RADARSAT-1 illustrées ont été respectivement acquises avec une température au sol supérieure et inférieure à 0°C (tableau 4).

TABLEAU 4 Données recueillies à la station météorologique Eureka (voir figure 1 ; données fournies par Environnement Canada). *Meteorological data recorded at the Eureka Weather Station (see figure 1 ; data provided by Environment Canada).*

Dates d'acquisition pour les 2 images acquises en faisceau prolongé 6 haute incidence	**5 août 1997**	**13 février 1998**
Température journalière maximale (°C)	7,1	–42,4
Température journalière minimale (°C)	3,2	–46,8
Température moyenne journalière (°C)	5,2	–44,6
Pluie (cm)	0,4	0
Neige (cm)	0	0
Précipitation totale (pluie et neige) (cm)	0,4	0
Neige au sol (cm)	0	11



Interprétation géologique modifiée d'après Thorsteinsson and Trettin (1972b)

FIGURE 6 Cette figure montre les variations de teintes radar des sédiments quaternaires entre une image RSO de RADARSAT-1 acquise en été et une autre acquise en hiver. Ces variations résultent d'une fluctuation saisonnière de l'effet de la constante diélectrique associée au gel/dégel des sédiments se retrouvant dans le mollisol (voir le texte pour explication). *This figure illustrates the radar tonal variations of Quaternary sediments between a summer and a winter RADARSAT-1 SAR images. These variations result from fluctuation in the dielectric constant effect associated with the freezing/melting of the sediments forming the active layer (see text for explanation).* (voir image couleur VIII à la fin de la revue).

Dans la sous-scène hivernale, le mollisol est gelé, adoptant une teinte radar sombre en comparaison des unités lithologiques de la zone mobile Franklinienne qui ont une teinte relativement claire. En revanche, la fonte du mollisol dans la sous-scène estivale induit une teinte beaucoup plus claire grâce à la présence d'eau en phase liquide. Cette capacité du capteur RSO de RADARSAT-1 de suivre le gel et le dégel du mollisol, par l'acquisition d'images multidates avec les mêmes paramètres d'acquisition, le désigne comme une technologie de première importance pour suivre la progression du réchauffement global de la planète dans les régions polaires. De plus, en comparant les deux sous-scènes (figure 6), on constate que la discrimination entre les sédiments quaternaires et les unités lithologiques de la zone mobile Franklinienne est plus accentuée en hiver. Des observations similaires ont été enregistrées dans d'autres environnements arctiques (Budkewitsch *et al.*, 1997). En effet, dans la sous-scène hivernale, les sédiments quaternaires gelés adoptent une teinte radar sombre liée à la réduction de l'effet de la constante diélectrique qui contraste davantage avec les teintes radar plus claires des unités lithologiques (figure 6).

Topographie. Dans une région où le relief est important, les teintes présentes dans une image radar résultent majoritairement des variations topographiques (Ford, 1998) lorsque l'effet de l'humidité du sol est minimisé. Ces variations topographiques du terrain subissent les effets du repliement dans l'image radar. Le repliement est responsable des teintes très claires adoptées par les pentes orientées face à la direction de visée et des teintes très sombres de celles opposées à la direction de visée (Raney, 1998). Dans la région d'étude, les différentes successions géologiques (par exemple la succession du Carbonifère-Permien du bassin de Sverdrup) qui présentent un relief modéré à important, adoptent des teintes radar caractéristiques suite aux effets de repliement et d'ombrage plus au moins prononcés. Une discussion plus approfondie sera présentée dans la section sur la cartographie lithologique.

Rugosité de surface. Dans les régions arctiques où le relief est faible et la végétation est restreinte, les teintes radar sont dérivées principalement de la taille et de la forme des grains qui forment les formations meubles et les affleurements rocheux. Les formations meubles résultent des différents types de roches en place en réponse à des processus d'altération physique, principalement la gélifraction dans un environnement froid et aride comme pour notre région d'étude (Hogson, 1991 ; Plaut *et al.*, 1999). Les unités lithologiques résistantes s'altèrent en fragments grossiers et adoptent une teinte claire tandis que les unités moins résistantes, altérées en fragments de plus petite taille, ont une teinte plus sombre (Budkewitsch *et al.*, 1996 ; Plaut *et al.*, 1999). Dans la région d'étude, les différentes successions qui présentent un relief peu accidenté adoptent des teintes radar caractéristiques suite aux variations de rugosité de surface, lesquelles correspondent à des changements lithologiques sur le terrain (par exemple shale *versus* grès dans la succession du Trias-Crétacé du bassin de Sverdrup). Une discussion plus approfondie sera présentée dans la section sur la cartographie lithologique.

3.2. Cartographie

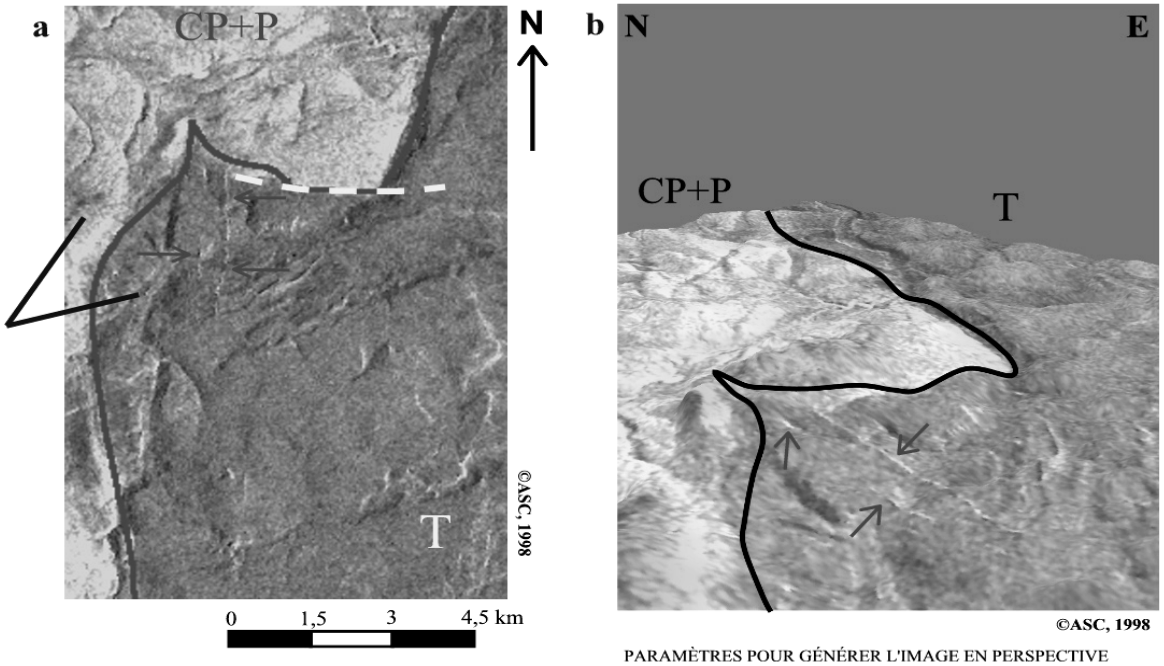
Plusieurs études (Desrochers *et al.*, 1997 ; D'Iorio *et al.*, 1997, 1995 ; Ford, 1998 ; Lewis and Henderson, 1998 ; Paradella *et al.*, 1998 ; Plaut *et al.*, 1999 ; Rivard *et al.*, 1994 ; Singhroy and St-Jean, 1999 ; Singhroy *et al.*, 1993 ; Webster *et al.*, 1997a et b) ont montré le potentiel de l'imagerie radar pour la cartographie géologique, mais seulement quelques études ont été réalisées dans des environnements arctiques (Budkewitsch *et al.*, 1997, 1996 ; Plaut *et al.*, 1999). La présente étude a permis la cartographie lithologique et structurale basée sur les variations de teintes et de textures radar, et les relations structurales observées à partir d'images RSO de RADARSAT-1 et des différents produits dérivés (couples stéréoscopiques, MNA, images fusionnées, images en perspective).

3.2.1. Cartographie lithologique

La cartographie lithologique a été réalisée à l'échelle des provinces et des successions géologiques et, par la suite, à l'échelle plus détaillée des formations et des sous-unités. Différents exemples sont présentés dans cette section.

Le facteur qui influence avec le plus de poids les teintes présentes dans l'image radar à l'échelle des provinces et des successions géologiques (> 1 : 250 000) est la topographie dans la région d'étude où le relief est important (> 1200 m). Sur la figure 7, on illustre un exemple de cartographie lithologique à l'échelle régionale où les successions du Carbonifère-Permien et du Trias-Crétacé du bassin de Sverdrup adoptent des teintes différentes résultant d'un changement marqué du relief. La succession du Carbonifère-Permien est principalement formée principalement de calcaires massifs et caractérisée par un relief local important (figure 8). Les pentes ainsi formées adoptent une teinte radar claire engendrée par le repliement de ces dernières (figure 7a). À l'opposé, la succession du Trias-Crétacé qui est moins résistante à l'altération physique et possède un faible relief local adopte une teinte sombre sur les images radar permettant ainsi de la discriminer de la succession du Carbonifère-Permien (figure 7a). La figure 7b est une image en perspective produite à partir d'une image chromo-stéréoscopique qui illustre ce contact marqué par des différences de relief mettant en valeur le potentiel de visualisation des images RSO de RADARSAT-1 pour la cartographie géologique.

À l'échelle des formations et des sous-unités, les teintes radar résultent des variations topographiques et de rugosité de surface, avec une plus grande influence de la rugosité de surface à l'échelle des sous-unités. Sur la figure 9, on montre la discrimination lithologique basée sur l'alternance des teintes radar. Les shales avec concrétions ferriques de la Formation Roche Point, caractérisés par un relief local plus accentué, adoptent une teinte radar claire (figure 9). Cette teinte claire se distingue des teintes plus sombre des formations Murray Harbour et Hoyle Bay composées de shales moins résistants à l'altération physique. Les rubanements lithologiques présents à la figure 9 correspondent à des sous-unités radar non représentées sur les cartes géologiques existantes au 1 : 250 000 (Trettin, 1996) et au 1 : 125 000 (Mayr *et al.*, 2000). Ces rubanements lithologiques caractérisés par une alternance de teintes sombres et claires résultent de variations locales de rugosité de surface contrôlées par de légères différences lithologiques (figure 9).



Faisceau: Standard 7
Orbite: Descendante
Angle d'incidence: 45-49°
Date: 15 février 1998
Espacement des pixels: 16m x 16m
Résolution (rxa): 19,1m x 27m

PARAMÈTRES POUR GÉNÉRER L'IMAGE EN PERSPECTIVE
Ouverture de la prise de vue = 30°
Position de la prise de vue: direction = 45°N, inclinaison = 45°
Exagération verticale = 2
Hauteur de la prise de vue =1350m (au-dessus du niveau de la mer)

LÉGENDE

Trias (T)
- Tbah: Formation Hoyle Bay: shale et siltstone calcaireux
- Tbar: Formation Roche Point: shale contenant des concretions ferriques, calcaire micritique et siltstone calcaireux
- Tbam: Formation Murray Harbour: shale
- Tbl: Formation Blind Fiord: siltstone et shale silteux

Permien (P)
- Ptf: Formation Trold Fiord: grès, shale et grès calcaireux
- Pgb: Formation Great Bear Cape: calcaire contenant des nodules de chert
- Ptc: Formation Trappers Cove: chert et calcaire avec structures en flaser

Carbonifère-Permien (CP)
- CPn: Formation Nansen: calcaire

Dyke
Faille inverse
Contact géologique entre les successions du Carbonifère-Permien et du Trias-Crétacé
Direction de la prise de vue pour la création de l'image en perspective

Interprétation géologique modifiée d'après Mayr et al. *(2000) et Thorsteinsson and Trettin (1972a et b)*

FIGURE 7 Cette figure illustre le contact géologique localement faillé séparant les successions du Carbonifère-Permien et du Trias-Crétacé du bassin de Sverdrup ; a) ortho-image standard 7 avec le contact géologique qui a été superposé, et b) image en perspective produite à partir de l'image chromo-stéréoscopique. *This figure illustrates the locally faulted geological contact between the Carboniferous-Permian and the Triassic-Cretaceous successions of the Sverdrup Basin ; a) ortho-image Standard 7 overlaid by the geological contact, and b) perspective image generated from the chromo-stereoscopic image.* (voir image couleur IX à la fin de la revue).

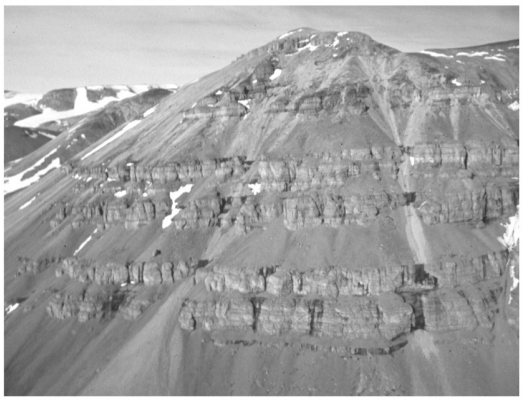


FIGURE 8 Photographie de terrain qui donne un exemple de relief local important associé avec les calcaires massifs de la succession du Carbinifère-Permien du bassin de Serdrup. Les calcaires et les cherts de la Formation Great Bear Cape sont ici représentés. Localisation : 25 km au nord-est du fiord Bukken. *Field photograph illustrating the high local relief that characterise the Carnoniferous-Permian succession of the Sverdrup Basin. Massive limestones and shales forming the Great Bear Cape Formation are shown here. Localisation : 25 km nord-east of Bukken fiord.* (voir image couleur X à la fin de la revue).

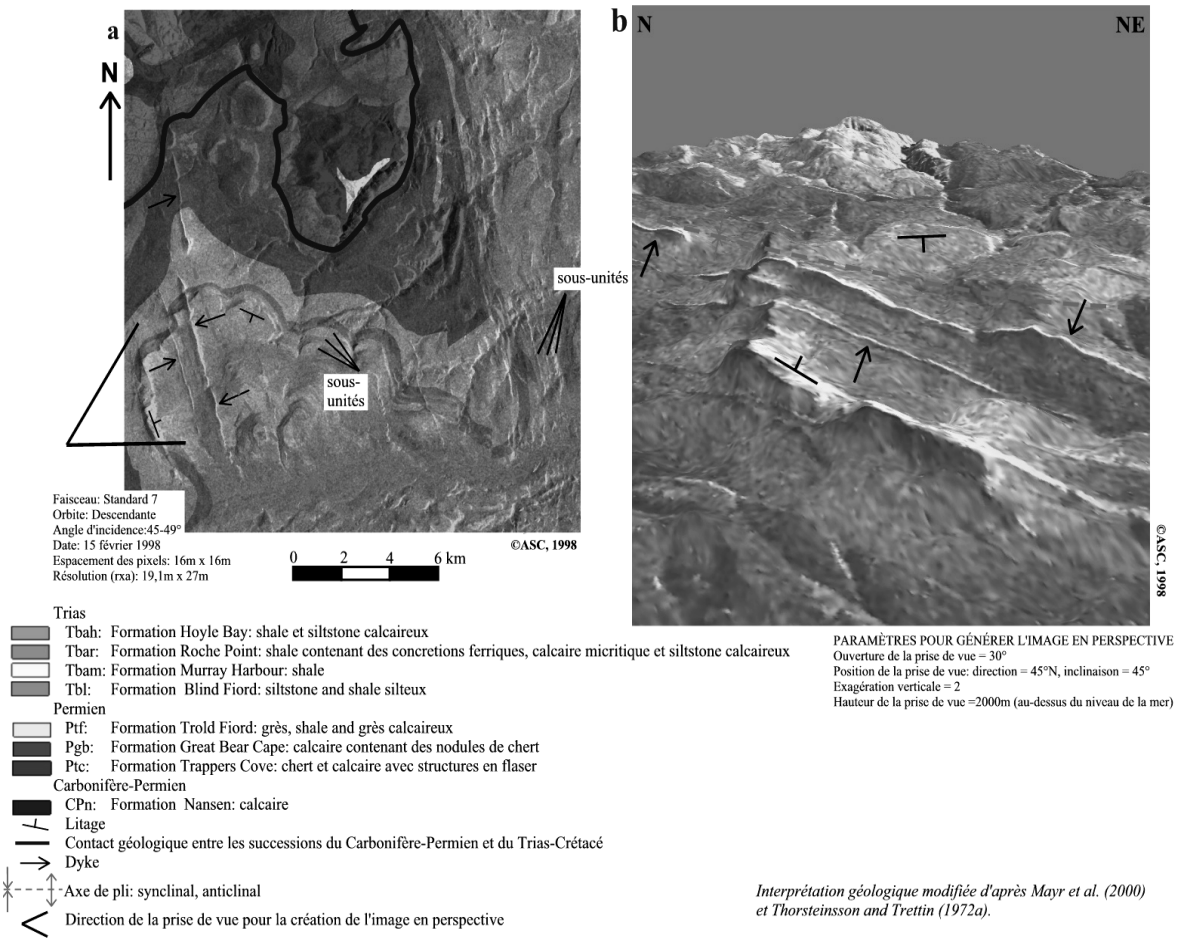


FIGURE 9 Figure illustrant une structure plissée plongeant vers le sud et recoupée par des dykes d'orientation nord-sud ; *a)* image fusionnée créée à partir de l'ortho-image standard 7 et la carte géologique, et *b)* image en perspective produite à partir de l'image chromo-stéréoscopique. *Figure illustrating a folded structure plunging to the south cross-cutted by N-S dykes ;* a) *fused image created from ortho-image Standard 7 and the geological map, and* b) *perspective image generated from the chromo-stereoscopic image.* (voir image couleur XI à la fin de la revue).

3.3.2. Cartographie structurale

Dans cette section, on présente quelques exemples représentatifs d'éléments structuraux (par exemple failles, dykes, plis) cartographiés à partir d'images RSO de RADARSAT-1 et des différents produits dérivés.

Sur la figure 7, on montre une faille inverse qui a déplacé le contact entre les successions du Carbonifère-Permien et du Trias-Crétacé du bassin de Sverdrup avec un rejet apparent estimé à 3 km. Ce rejet est facilement identifiable grâce à la grande différence de teintes radar de part et d'autre du contact de faille.

Sur la figure 9, on illustre des dykes d'âge Crétacé orientés nord-sud qui recoupent une structure plissée de la succession du Trias-Crétacé du bassin de Sverdrup. Ces dykes mafiques sont des unités résistantes qui agissent comme des réflecteurs en coin et adoptent une teinte claire saturée permettant de les tracer sur plus de 15 km. La structure plissée, formée d'un synclinal et d'un anticlinal, qui plonge vers le sud est bien identifiée à partir des différences de teintes radar et de l'orientation des formations dans l'espace. La présence du rubannement lithologique permet de suivre la continuité de cette structure sur plusieurs kilomètres (figure 9a). De plus, la direction et le pendage des flancs du pli sont biens illustrés sur la figure 9, tout particulièrement à l'aide de l'image en perspective.

4. CONCLUSION

Cette étude démontre le potentiel des images RSO de RADARSAT-1 et des différents produits dérivés pour la cartographie lithologique et structurale dans l'Arctique canadien. Cette variété de produits de grande précision permet une visualisation détaillée et complète des éléments liés à la l'analyse lithologique et structurale. Ces produits incluent :

- des couples stéréoscopiques de grande qualité ;
- des MNA de grande précision ;
- des ortho-images avec de faibles erreurs planimétriques ;
- des images chromo-stéréoscopiques qui permettent une vision 2D et 3D du relief et de l'information radar associée ;
- des images fusionnées qui combinent l'information de l'ortho-image radar et de la carte géologique ;
- des images en perspective qui représentent adéquatement les caractéristiques du terrain.

L'analyse lithologique a démontré que l'identification des contacts géologiques séparant les provinces, successions, formations et sous-unités lithologiques est possible à partir des images RSO de RADARSAT-1, grâce aux variations de teintes et de textures radar marquées sur ces dernières. La résolution de ces images RSO a permis de répertorier des sous-unités non cartographiées du bassin de Sverdrup. De plus, l'analyse d'images RSO multidates a permis d'observer un meilleur contraste lithologique en hiver lorsque le mollisol est gelé et que le couvert neigeux est sec, réduisant ainsi au minimum l'effet de la constante diélectrique sur le signal radar rétrodiffusé. Finalement, la grande sensibilité de images RSO aux variations topographiques a permis de cartographier sur ces images les principaux éléments structuraux (failles, dykes et plis) présents dans la région d'étude.

La versatilité des images RSO de RADARSAT-1 montre l'énorme quantité d'informations géologiques disponibles pour compléter un projet de cartographie géologique sur le terrain. Cet apport est d'autant plus important dans les régions où les campagnes de terrain sont difficiles et coûteuses et que la cartographie géologique réalisée est seulement à grande échelle comme c'est le cas pour notre région d'étude et plusieurs autres régions du monde. D'autres analyses quantitatives de routine sont possibles à partir d'images RSO de RADARSAT-1 comme par exemple le calcul de direction / pendage et le calcul de l'épaisseur stratigraphique de formations et de sous-unités en utilisant une méthode photogrammétrique qui requiert une ortho-image et un MNA. Des travaux préliminaires (Riopel, 2000) nous laissent croire qu'il s'agira d'un nouvel apport d'imagerie RSO à la cartographie géologique dans les régions isolées comme notre région d'étude.

Remerciements

Les images RSO de RADARSAT-1 ont été fournies par l'Agence spatiale canadienne dans le cadre du Programme de développement d'applications et possibilités de recherche (projet ADRO nº 087). Le Centre canadien de télédétection pour le traitement des images et les données météorologiques, Dr. T. Toutin et Mr. R. Chénier pour les discussions au sujet des MNA et les PA en pointé stéréoscopique, et Dr. U. Mayr et son équipe de la Commission géologique du Canada pour l'obtention de la version numérique de la carte géologique du bassin de Sverdrup sont tous grandement remerciés par les auteurs pour leur contribution à ce projet de recherche.

Références

Beauchamp, B., Harrison J.C. *and* Henderson, C.M. (1989a) Upper Paleozoic stratigraphy and basin analysis of the

Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago : Part 1, time frame and tectonic evolution. *Current Research*, Part G, Geological Survey of Canada, Paper 89-1G, p. 105-113.

Beauchamp, B., Harrison J.C. *and* Henderson, C.M. (1989b) Upper Paleozoic stratigraphy and basin analysis of the Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago : Part 2, transgressive-regressive sequences. *Current Research*, Part G, Geological Survey of Canada, Paper 89-1G, p. 115-124.

Bérubé, A. (1999) *Discussion concernant la précision des cartes topographiques*. Centre d'information topographique, Canada.

Budkewitsch, P., D'Iorio, M.A., Wilkinson, L. *and* Henderson, J. (1997) Radar Images as a Source of Geological Information in Northern Barren Environments. *Geomatics in the Era of RADARSAT (GER'97)*, 25-30 May 1997, Natural Resources Canada / National Defense, 7 p.

Budkewitsch, P., D'Iorio, M.A *and* Harrison, J.C. (1996) C-band Radar Signatures of Lithology in Arctic Environments: Preliminary Results from Bathurst Island, Northwest Territories. *Current Research* 1996-B, Geological Survey of Canada, p. 67-72.

Denyer, N., Raney, R.K. *and* Shepherd, N. (1993) The Radarsat SAR Data Processing Facility. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 19, nº 4, p. 311-316.

Desrochers, A., D'Iorio, M.A. *and* Gauthier É. (1997) Enhancement of the Geologic Mapping of Anticosti Island using SAR data. *Geomatics in the Era of RADARSAT (GER'97)*, 25-30 May 1997, Natural Resources Canada / National Defense, 7 p.

D'Iorio, M.A., Budkewitsch, P. *and* Mahmood, N.N. (1997) Practical Considerations for Geological Investigations using RADARSAT-1 Stereo Images Pairs in Tropical Environments. *Geomatics in the Era of RADARSAT (GER'97)*, 25-30 May 1997, Natural Resources Canada / National Defense, 8 p.

D'Iorio, M.A., Ley, L.N., Bubkewitsch, P.A. *and* Richardson, R. (1995) Geological Map Update Using Airborne and RADARSAT Simulated SAR Data in Sarawak, Malaysia. *Geocarto International*, vol. 10, nº 3, p. 43-50.

Embry, A.F. (1991) Mesozoic history of the Arctic Islands ; Chapter 14. In H.P. Trettin (ed.) *Geology of the Innuitian Orogen and Arctic Platfrom of Canada and Greenland*. Geological Survey of Canada, Geology of Canada, nº 3, p. 369-434.

French, H. (1996) *The periglacial environment*. Longman, London, 341 p.

Ford, J.P. (1998) Radar Geology ; Chapter 10. In R.A. Ryerson (ed.) *Principles and Applications of Imaging Radar – Manual of Remote Sensing*. John Wiley and Sons, Inc., third edition, vol. 2, p. 511-566.

Harris, J.R., Bowie, C., Rencz, A.N. *and* Graham, D. (1994) Computer-Enhancement Techniques for the Integration of Remotely Sensed, Geophysical, and Thematic Data for the Geosciences. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 20, nº 3, p. 210-221.

Harris, J., Murray, R., *and* Hirose, T. (1990) IHS Transform for Integration of Radar Imagery with other Remotely Sensed Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, nº 12, p.1631-1641.

Hearty, D.B., Seeman, D.A., Maye, P. *and* Jackson, R. (1996) Regional gravity survey of Ellesmere and Axel Heiberg islands, Northwest Territories. *Current Research* 1996-B, Geological Survey of Canada, p. 73-79.

Hogson, D.A. (1991) The Quaternary record ; Chapter 19. In H.P. Trettin (ed.) *Geology of the Innuitian Orogen and Arctic Platfrom of Canada and Greenland*. Geological Survey of Canada, Geology of Canada, nº 3, p. 497-514.

Lewkowicz, A.G. *and* Duguay, C.R. (1999) Detection of Permafrost Features Using SPOT Panchromatic Imagery, Forsheim Peninsula, Ellesmere Island, N.W.T. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 25, nº 1, p. 34-44.

Lewis, A.J., *and* Henderson, F.M. (1998) Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective ; Chapter 3. In R.A. Ryerson (ed.) *Principles and Applications of Imaging Radar – Manual of Remote Sensing*. John Wiley and Sons, Inc., third edition, vol. 2, p. 131-182.

Luscombe, A.P., Ferguson, I., Shepherd, N., Zimcik, D.G. *and* Naraine, P. (1993) The Radarsat Synthetic Aperture Radar Development. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 19, nº 4, p. 298-310.

Mayr, U., Beauchamp, B. *and* Harrison, J.C. (2000) *Geology of Northern Axel Heiberg Island, Canadian Arctic Islands (parts of Cape Stallworthy and Bukken Fiord map sheets, NTS 560D and 560A)*, Geological Survey of Canada, Map 000A, 1 : 125,000 (sous presse).

Okulitch, A.V. and Trettin, H.P. (1991) Late Cretaceous – Early Tertiary deformation, Arctic Islands ; Chapter 17. In H.P. Trettin (ed.) *Geology of the Innuitian Orogen and Arctic Platfrom of Canada and Greenland*. Geological Survey of Canada, Geology of Canada, nº 3, p. 467-490.

Paradella, W.R., dos Santos, A.R., Dall'Agnol, R., Pietsch, R.W. *and* Sant'Anna, M.V. (1998) A Geological Investigation Based on Airborne (SAREX) and Spaceborne (RADARSAT-1) SAR Integrated Products in the Central Serra dos Carajás Granite Area, Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 24, nº 4, p. 376-392.

Parashar, S., Langham, E., McNally, J. *and* Ahmed, S. (1993) Radarsat Mission Requirements and Concept. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 19, nº 4, p. 280-288.

Plaut, J.J., Rivard, B. and D'Iorio, M.A. (1999) Radar: Sensors and Case Studies ; Chapter 12. In R.A. Ryerson (ed.) *Remote Sensing for Earth Sciences – Manual of Remote Sensing*. John Wiley and Sons, Inc., third edition, vol. 3, p. 613-642.

RADARSAT International (1998) *RADARSAT Illuminated: Your guide to products and services*, Canada, 113 p.

Raney, R.K. (1998) Radar Fundamentals: Technical Perspective ; Chapter 2. In R.A. Ryerson (ed.) *Principles and Applications of Imaging Radar – Manual of Remote Sensing*. John Wiley and Sons, Inc., third edition, vol. 2, p. 9-130.

Riopel, S. (2000) *The Use of RADARSAT-1 Imagery for Lithological and Structural Mapping in the Canadian High Arctic*. University of Ottawa, Canada, 80 p.

Rivard, B., Kellett, R.L., Saint-Jean, R. *and* Singhroy, V. (1994) Characterization of fault and dyke intrusion in the Benny Deformation Zone, North Range of Sudbury, from airborne magnetics and SAR. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 20, nº 3, p. 324-328.

Sabins, F.F.Jr. (1997) *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. W.H. Freeman and Company, New York, third edition, 450 p.

Singhroy, V. *and* St-Jean, R. (1999) Effects of Relief on the Selection of RADARSAT Incidence Angle for Geological Applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 25, nº 3, p. 211-217.

Singhroy, V., Slaney, R., Lowman, P., Harris, J. *and* Moon, W. (1993) Radarsat and Radar Geology in Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 19, nº. 4, p. 338-351.

Thorsteinsson, R. *and* Trettin, H.P. (1972a) *Geology Of Bukken Fiord, District of Franklin, Northwest Territories*. Geological Survey of Canada, "A" Series Map 1310A, 1 : 250 000.

Thorsteinsson, R. *and* Trettin, H.P. (1972b) *Geology Of Cape Stallworthy, District of Franklin, Northwest Territories*. Geological Survey of Canada, "A" Series Map 1305A, 1 : 250 000.

Toutin, T. (1999) Radar Stereo Pairs for DEM Generation, RADARSAT for Stereoscopy. *GIM International*, vol. 13, nº 1, p. 6-9.

Toutin, T. (1998a) Évaluation de la précision géométrique des images de RADARSAT. *Journal canadien de télédétection*, vol. 24, nº 1, p. 80-88.

Toutin, T. (1998b) Stereo RADARSAT for Mapping Applications. *Proceedings of the Final RADARSAT ADRO symposium*, Montréal, Canada, 13-15 October.

Toutin, T. (1997) Qualitative Aspects of Chromo-Stereoscopy for Depth Perception. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 63, nº 2, p. 193-203.

Toutin, T. *and* Rivard, B. (1997) Value Added Radarsat Products for Geoscientific Applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 23, nº 1, p. 63-70.

Toutin, T. (1995) Intégration de données multisources: comparaison de methodes géométriques et radiométriques. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, nº 15, p. 2795-2811.

Toutin, T., *et* Carbonneau, Y. (1992) La création d'ortho-images avec MNE: description d'un nouveau système. *Journal canadien de télédétection*, vol. 18, nº 3, p. 136-141.

Trettin, H.P. (1998) *Pre-Carboniferous Geology of the Northern Part of the Arctic Islands*. Isotopic Age Determination by J.E. Gabites and Paleontological Appendices by B.S. Norford, T.T. Uyeno, M.J. Copeland, T.A. de Freitas and others, Geological Survey of Canada, Bulletin 425, 401 p.

Trettin, H.P. (1996) *Geology, parts of Cape Stallworthy and Bukken Fiord, District of Franklin, Northwest Territories*. Geological Survey of Canada, Map 1884A, 1 : 250 000.

Trettin, H.P. (1991) Tectonic Framework ; Chapter 4, In H.P. Trettin (éd.) ; *Geology of the Innuitian Orogen and Arctic Platfrom of Canada and Greenland*. Geological Survey of Canada, Geology of Canada, nº 3, p. 57-66.

Trettin, H.P. (1989) The Arctic Islands, in Bally, A.W., and Palmer, A.R. (éds)., *The Geology of North America - An overview*. Boulder, Colorado, Geological Society of America, The Geology of North America, vol. A., p. 349-370.

Ulaby, F.T., Moore, R.K. *and* Fung, A.K. (1986) *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume III: From Theory to Applications*. Artech House, Norwood, MA, p. 1065-2162.

Ulaby, F.T. (1982) Radar Signatures of Terrain: Useful Monitors of Renewable Resources. *Proceedings of the IEEE*, vol. 70, nº 12, p.1410-1428.

Webster, T., Raymond, D. *and* Akhavi, M.S. (1997a) Preliminary Analysis of Spaceborne Radar Imagery Integrated with Geoscience Datasets for Central Nova Scotia. *Geomatics in the Era of RADARSAT (GER'97)*, 25-30 May 1997, Natural Resources Canada / National Defense, 16 p.

Webster, T., Murphy, B.J. *and* Barr, S.M. (1997b) Remote Sensing and GIS analysis of the St.Marys Basin, Central Nova Scotia. *Geomatics in the Era of RADARSAT (GER'97)*, 25-30 May 1997, Natural Resources Canada / National Defense, 18 p.