Télédétection, 2006, vol. 6, n° 1, p. 45-55
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

APPORT DES DONNÉES RSO POLARIMÉTRIQUES MULTI-FRÉQUENTIELLES ET MULTI-TEMPORELLES POUR LA CARTOGRAPHIE DE LA NEIGE SÈCHE EN ENVIRONNEMENT DE HAUTE MONTAGNE (ALPES FRANÇAISES)

Audrey Martini[1], Jean-Pierre Dedieu[2], Laurent Ferro-Famil[1], Éric Pottier[1]

[1] IETR - UMR CNRS 6164,
Institut d'Électronique et de Télécommunications de Rennes, Université de Rennes 1, Bâtiment 11D,
263 avenue du Général Leclerc, CS 74205, 35042 Rennes cedex, France.
Téléphone : 33 (0)2 23 23 50 85 ;
télécopieur : 33 (0)2 02 23 23 69 63 ;
courriel :
au_martini@yahoo.fr, laurent.ferro-famil@univ-rennes1.fr,
eric.pottier@univ-rennes1.fr

[2] Laboratoire EDYTEM - UMR CNRS 5204,
Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne,
Université de Savoie - Campus scientifique, 73376 Le Bourget du Lac cedex, France.
Téléphone : 33 (0)4 79 75 94 03 ;
Télécopieur : 33 (0)4 79 75 87 77 ;
courriel : Jean-Pierre.Dedieu@univ-savoie.fr

Soumis le 4 juillet 2005 ; révisé le 6 avril 2006 ; accepté le 8 mai 2006

L'objectif de cet article est de présenter une nouvelle méthode de détection d'un couvert de neige sèche en région de haute montagne alpine. Les résultats présentés ont été obtenus à partir de données RSO en polarisation complète, acquises en bande L et C, lors de la mission expérimentale SIR-C menée en avril et octobre 1994 sur les Alpes françaises du sud. En raison de la grande diversité des environnements naturels alpins, la première étape de ces travaux consiste à classifier les milieux naturels sous jacents, tels que les forêts et les surfaces ouvertes, à partir des données d'été en bande L. La neige sèche est ensuite discriminée au moyen de méthodes polarimétriques adaptées à chaque milieu, à partir des données d'hiver en bande C. Les forêts enneigées sont détectées à partir de l'indicateur polarimétrique $\overline{\alpha}$, relatif à la nature du mécanisme de diffusion. Dans le cas des surfaces ouvertes enneigées, une procédure originale d'optimisation polarimétrique (PCVE) est proposée pour accroître la variation du contraste polarimétrique été/hiver dû à la présence de neige. Les performances de la méthode en bande L et C sont testées sur deux sites et les résultats sont comparés aux images optiques acquises simultanément (Landsat-5). Cette approche s'inscrit dans la préparation au nouveau capteur RADARSAT-2 de l'Agence spatiale canadienne (ASC).

Mots-clés : Radar à synthèse d'ouverture (RSO) ; polarimétrie ; cartographie de la neige.

DRY SNOW DISCRIMINATION IN A HIGH MOUNTAINOUS ENVIRONMENT (FRENCH ALPS). USING MULTI-FREQUENCY AND MULTI-TEMPORAL POLARIMETRIC SAR DATA

This paper presents a new method for discriminating dry snow from bare soil in alpine regions. The results presented were obtained from fully polarimetric SIR-C data in L- and C-band acquired in April and October 1994 over the southern French Alps. Due to the wide spatial and altitudinal diversity in alpine environments, the scene under study was first segmented into forested and non-forested area classes using L-band summer polarimetric SAR data. Dry snow is then discriminated over each class using adaptive methods. Snow covered bare soils are discriminated by applying an original polarimetric multi-temporal optimization procedure, called PCVE, proposed to increase the summer/winter polarimetric contrast. Snow covered forests are discriminated using polarimetric indicators resulting from a decomposition of incoherent matrix representations. The effectiveness of this method using L- and C-band is demonstrated over two different alpine test sites and preliminary results are correlated with fieldwork measurements and simultaneous optical data (Landsat-5). This study was developed so as to adapt itself to the future RADARSAT-2 sensor of the Canadian Space Agency (CSA).

Keywords : Synthetic aperture radar (SAR) ; radar polarimetry ; snow mapping

1. INTRODUCTION

L'expérience acquise dans le domaine des systèmes RSO (Radar à synthèse d'ouverture) depuis les années 1990 a démontré que ce sont des outils très puissants pour l'observation de la Terre puisque l'acquisition des images est indépendante des conditions météorologiques ou de l'éclairement solaire (ERS-1 et 2, RADARSAT-1, JERS-1), contrairement à l'imagerie optique. Toutefois, les capteurs qui opèrent dans un seul canal de polarisation, par exemple HH pour RADARSAT-1 ou VV pour ERS1-2, ont des capacités limitées pour des applications autres que la cartographie en agriculture, foresterie ou hydrologie. De ce fait, un capteur RSO en polarisation multiple ou, mieux, en polarisation complète est un outil plus performant pour mesurer certaines grandeurs physiques des milieux naturels (hauteur, volume, densité, humidité, etc.). Les améliorations sont significatives dans l'identification des frontières d'un milieu ou de ses propriétés physiques (glace de mer, nivologie, etc.). Cependant, peu de capteurs opérationnels existent à l'heure actuelle en mode polarimétrique complet et ces derniers sont essentiellement aéroportés (*Convair*, Canada ; *Airsar*, USA ; *E-SAR*, Allemagne ; *Ramsès*, France ; *Pisar*, Japon ; *Emisar*, Danemark, etc.).

Dans la gamme des fréquences RSO intermédiaires (bande L, 1,2 GHz et bande C, 5,3 GHz), l'identification de la neige sèche demeure toujours un problème difficile à résoudre (Shi *et al.*, 1993 ; Bernier and Fortin, 1998a). De plus, la forte topographie en milieu alpin influe très fortement l'amplitude et les caractéristiques polarimétriques du signal (Nagler and Rott, 2005). En bande L, la neige sèche influe peu le signal rétrodiffusé dont la composante dominante de diffusion est directement reliée à la réponse du milieu sous jacent (Ulaby *et al.*, 1986). En bande C, la réponse rétrodiffusée par un couvert de neige dépend du type de neige (sèche ou humide), mais aussi de l'angle d'incidence radar (Koskinen *et al.*, 1997 ; Dedieu *et al.*, 2005 ; Martini, 2005). Dans le cas de neige humide en période de fusion printanière, où le signal est fortement atténué par la présence du couvert, l'identification directe de la neige par rapport aux autres surfaces environnantes devient alors plus aisée. Ainsi dans le cas précis des applications nivologiques, l'imagerie RSO en mode amplitude simple (polarisation parallèle) peut prétendre à cartographier l'étendue du couvert nival essentiellement sous conditions de neige humide (Magagi and Bernier, 2003).

Pour les gestionnaires de l'eau ou les climatologues, la connaissance d'un couvert de neige sèche hivernale est essentielle afin d'obtenir un suivi cartographique complet entre la période d'accumulation et celle de fusion. Plusieurs études ont ainsi été menées à partir de données RSO pour atteindre cet objectif (Storvold *et al.*, 2005; Malnes and Guneriussen, 2002), voire remonter à l'Équivalent en Eau de la Neige (ÉEN) (Bernier *et al.*, 1998). Dans ce contexte, les nouveaux capteurs RSO expérimentaux ou opérationnels peuvent apporter des réponses plus précises (Hallikainen *et al.*, 2002). Beaucoup de modèles hydrologiques pour la prévision des débits en haute montagne sont des modèles globaux fondés sur un réseau de mesures ponctuelles très sensibles aux variations climatologiques (Paquet et Garçon, 2001). L'apport essentiel de l'imagerie RSO repose sur une cartographie tout temps, donc sur une spatialisation de la mesure qui permet une discrétisation des modèles hydrologiques à l'échelle du bassin versant en complément du réseau au sol existant (Gailhard, 2005). En bandes C et L, la polarimétrie a permis d'établir des procédures de cartographie d'un couvert de neige sèche en milieux alpins (Martini *et al.*, 2005 ; Martini *et al.*, 2006).

Dans cet article, on propose une méthode de détection d'un couvert de neige sèche au moyen d'une procédure séquentielle. Une cartographie des milieux naturels en été est tout d'abord élaborée afin d'adapter dans un second temps les procédures de discrimination de la neige sèche sur ces milieux (Martini *et al.*, 2004a). Cette étude est menée à partir des données SIR-C en configuration de polarisation complète, en mode multi-fréquentiel (bandes L et C) et multi-temporel (été, hiver). Les résultats obtenus sont des résultats novateurs obtenus sur une zone localisée des Alpes françaises.

2. SITE D'ÉTUDE ET DONNÉES

La méthode proposée est appliquée sur les données acquises en mode mono vue complexe, lors de la mission SIR-C/X-SAR de 1994 conduite par la navette Endeavour (*Mission To Planet Earth* de la NASA).

Le bassin versant d'application est celui de la Haute-Durance, dans les Alpes françaises du sud (N 44° 15'/E 7° 15') ; ce secteur de haute montagne couvre environ 1 300 km² dont plus de 30 % sont situés au dessus de 2 500 m d'altitude (figure 1).

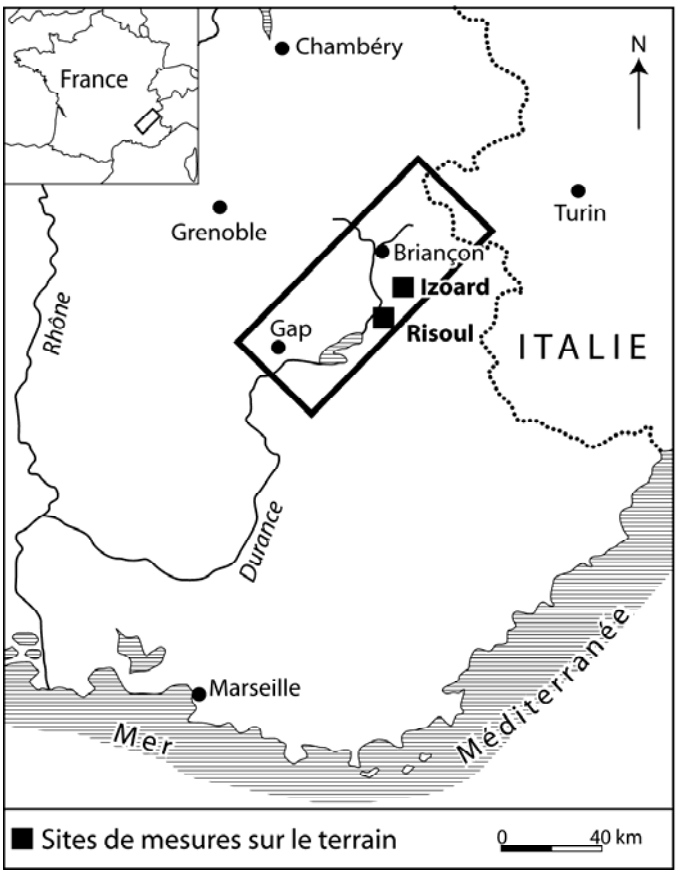


FIGURE 1 : Carte de localisation du site d'étude. *Location of the study area.*

Deux sites tests ont été retenus, Risoul (300 km²) et Izoard (800 km²), en raison de leur localisation au centre des images et d'un appui en mesures de terrain simultanées. Sur le tableau 1, on présente les caractéristiques d'acquisition des images radar lors de la mission SIR-C. Les dates d'enregistrement concernent les 10, 12 et 14 avril 1994 (neige sèche) ; 1er, 3 et 5 octobre 1994 (hors-neige). Seules les images du 12 avril et du 3 octobre ont été retenues, pour leurs conditions identiques de localisation géographique, de géométrie et d'orbite. Les angles d'incidence élevés (50 °) permettent de limiter les artéfacts en imagerie RSO dus aux effets de relief (raccourcissement, recouvrement), contrairement aux artéfacts géométriques et radiométriques présents sur les images ERS-1 et ERS-2, acquises avec de faibles angles d'incidence (26 °).

TABLEAU 1 : Paramètres d'acquisition des données SIR-C. *SIR-C acquisition characteristics.*

Paramètres	SIR -C
Fréquence	Bandes L (1,5 GHz) et C (5,3 GHz)
Canaux de polarisation	HH, HV, VH, VV (Single Look Complex)
Angle d'incidence	49,84 ° (octobre) et 50,02 ° (avril)
Résolution	6,19 m (azimut) et 20,7 m (distance)
Dates d'acquisition	SRC-1 : 10 au 12 avril 1994, SRC-2 : 1 au 3 octobre 1994
Orbite	Ascendante, Réf : DT14.
Heure d'acquisition (TU)	06 h 05 (octobre) et 05 h 54 (avril)

L'étape de validation spatialisée des caractéristiques de la neige (limites de couverture, état de surface) a été fournie par des images optiques du capteur Thematic Mapper de Landsat-5 (résolution 30 m), et ce pour les bandes du visible, infrarouge proche et moyen. L'image d'hiver est simultanée à l'enregistrement radar (scène 195-029 du 12 avril 1994) et l'image d'été est en date du 23 juillet 1994 (scène 195-029). Sur la figure 2, on présente une comparaison pour les deux sites entre l'image radar de l'intensité en bande C d'octobre 1994 et l'image optique TM de Landsat de juillet 1994.

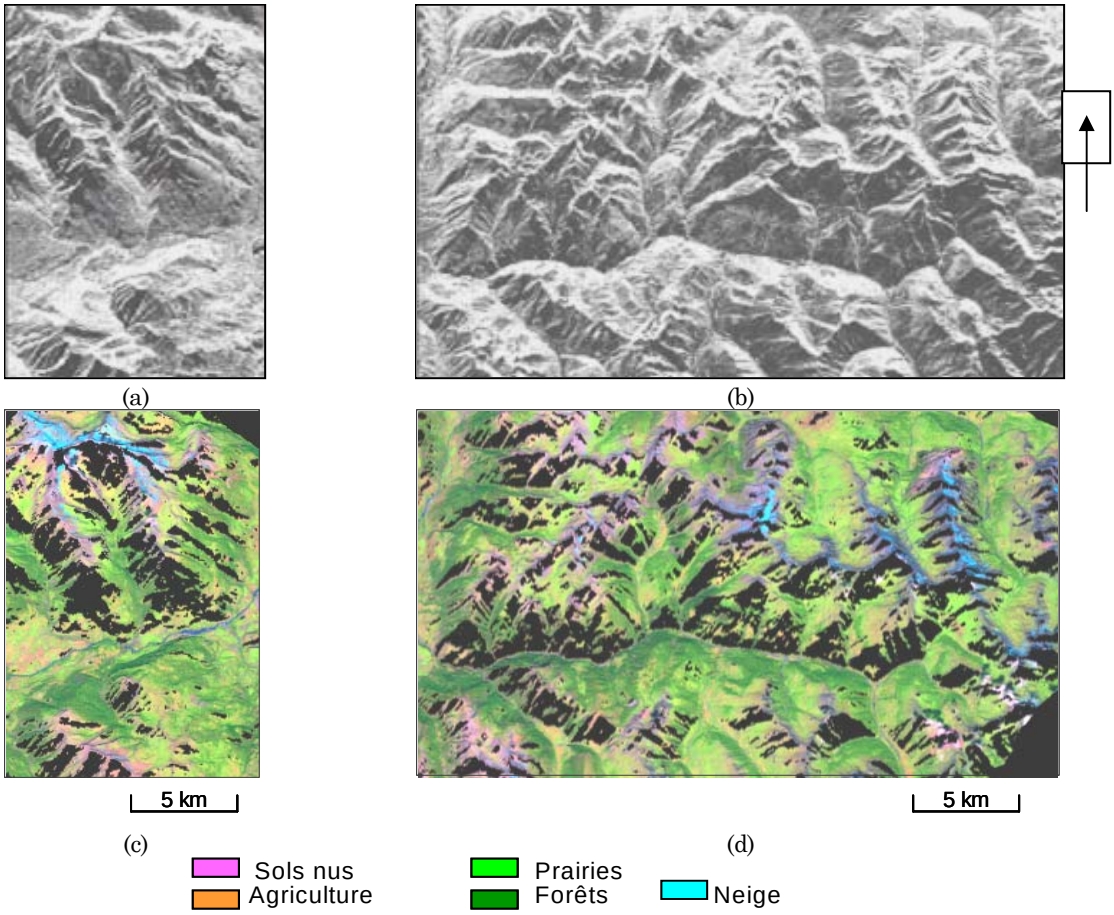


FIGURE 2 : Représentation des images d'intensité SIR-C du 03/10/1994 pour les sites de Risoul (a) et Izoard (b) et des images TM de Landsat-5 du 23/07/1994 projetées dans le plan d'incidence radar pour Risoul (c) et Izoard (d). *Representation of the SIR-C intensity images of 10/03/1994 for the Risoul (a) and Izoard (b) sites and the slant range projected Landsat-5 Thematic Mapper images of 07/23/1994 for the Risoul (c) and Izoard (d) sites.*

Au moment de l'acquisition SIR-C en hiver, des mesures simultanées de terrain ont été effectuées. Ces mesures proviennent soit des postes automatisés de Météo-France et Électricité de France (EDF) (épaisseur, densité et température en temps réel), soit de mesures manuelles renforcées pour la campagne et menées entre 8 h et 9 h TU (profil vertical et stratigraphique, taille des grains, épaisseur, densité, température, teneur en eau liquide). Sur le tableau 2, on résume ces valeurs pour l'ensemble du secteur d'étude. L'enneigement était continu de 1 200 m à 3 000 m, où le manteau neigeux atteignait 2 mètres d'épaisseur. Les densités variaient de 80 kg.m^{-3} en haute altitude pour atteindre 500 kg.m^{-3} au pied des versants. La neige était essentiellement fraîche à grains fins (chutes abondantes des 9 et 10 avril), sèche et froide à toutes altitudes lors du passage matinal de la navette. Cette information a été validée par le jeu des mesures simultanées de terrain. Pour l'acquisition sans neige d'octobre, des mesures d'humidité des sols et de rugosité ont été menées sur les mêmes sites qu'en avril. La rugosité était faible (terrains herbeux lisses) et l'humidité volumique comprise entre 15 % et 26 % (sols alpins acides), donc des sols secs. Ces deux paramètres n'ont pas été intégrés dans l'analyse radar menant à la cartographie des milieux en été.

TABLEAU 2 : Caractéristiques du couvert neigeux du 12 avril 1994.*Snow properties on 12 April 1994.*

Paramètres	Neige sèche
Hauteur (m)	$h \leq 2$
Densité (kg.m^{-3})	$80 < m_v < 500$
Rayon des grains (mm)	$0{,}8 < D_m < 3{,}5$
Teneur en eau liquide (%^{vol})	0
Constante diélectrique neige	$1{,}53 - i0{,}0002$

3. MÉTHODOLOGIE

Il est particulièrement important de pouvoir caractériser la réponse électromagnétique de la

neige à la fois sous un couvert forestier et sur une surface dégagée, car la majeure partie des sites montagneux dans les Alpes sont recouverts soit de forêts, soit de pâturages associés à des éboulis.

Les sites tests de Risoul et Izoard se décomposent en trois environnements principaux : les surfaces non boisées (rochers, pelouses) dominent en haute altitude, en altitude moyenne les forêts (conifères dominants), et en basse altitude les vallées (agriculture, habitat). En raison de cette variabilité de l'environnement alpin, la méthodologie sera décomposée en trois étapes. Dans un premier temps, une classification non dirigée des données RSO d'été en bande L est effectuée plutôt qu'en bande C. De nombreuses études ont montré l'efficacité de cette bande de fréquence pour la classification et la cartographie des milieux naturels (Durden *et al.*, 1989, Lee *et al.*, 2001, Ferro-Famil *et al.*, 2003). En effet, la longueur d'onde spécifique de la bande L, 30 cm, permet une meilleure pénétration des milieux que celle de la bande C, 6 cm, (Ulaby, 1986). Sa présence sur la plate-forme SIR-C offre la possibilité de l'utiliser pour une discrimination adaptée des modes d'occupation des sols. Néanmoins, dans le cadre d'un capteur mono-fréquence en bande C (ENVISAT, RADARSAT), cette méthode mène aussi à des résultats satisfaisants, mais parfois moins précis pour certaines frontières de classes (Martini, 2005). En outre, la bande L est privilégiée pour vérifier la pertinence d'une classification RSO en regard de celle de l'optique. Si l'imagerie optique de Landsat permet certes d'obtenir bien plus aisément une classification des modes d'occupation des sols, la méthode proposée est avant tout basée sur une configuration RSO « tout-temps », sans le recours nécessaire à l'optique. Les images Landsat sont utilisées ici pour valider la méthode polarimétrique proposée et en mesurer les limites.

Les sites d'étude sont divisés en deux types de milieux naturels : les forêts et les « surfaces ouvertes », territoires sans forêt regroupant les sols nus et les prairies d'altitude. Une cartographie de ces milieux est alors élaborée, permettant ainsi dans un deuxième temps de les traiter séparément puis, d'adapter la méthode de détection de la neige sèche à partir des données hivernales en bande C.

A. Les forêts

Dans le cas des forêts, la détection de la neige est faite à partir du paramètre polarimétrique $\overline{\alpha}$, obtenu par une décomposition aux valeurs et vecteurs propres de la matrice de cohérence **T** (Cloude and Pottier, 1996). Ce paramètre définit la nature du mécanisme de diffusion et varie de 0 ° à 90 °. L'angle $\overline{\alpha}$ égale 0 ° pour une diffusion de surface, 45 ° dans le cas d'une rétrodiffusion de volume et 90 ° pour une réflexion sur un dièdre.

B. Les surfaces ouvertes

Dans le cas des surfaces ouvertes, deux méthodes d'optimisation sont testées successivement : (1) l'amélioration de l'optimisation du contraste polarimétrique « OPCE » (Optimization of Polarimetric Contrast Enhancement) et (2) l'amélioration de la variation du contraste polarimétrique « PCVE » (Polarimetric Contrast Variation Enhancement).

Finalement, le résultat des cartographies de l'enneigement sur les surfaces ouvertes et en zone forestière est fusionné pour réaliser une évaluation quantitative du couvert neigeux. La classification finale est validée par l'imagerie optique de référence et les mesures de terrain hivernales.

Néanmoins, il faut noter que les résultats de la cartographie de la neige sont présentés dans le plan d'incidence oblique radar, puisqu'ils sont obtenus à partir de données RSO, alors que les images Landsat sont représentées initialement dans un repère au sol, car elles sont acquises avec un angle de visée quasi nul. Dans le but de comparer avec précision les images RSO avec les images Landsat sans perdre d'information radar et afin de quantifier la validité des résultats obtenus, il est nécessaire de projeter les images optiques dans le référentiel des images radar. Une transformation géométrique est alors mise au point à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) visant à faire correspondre le référentiel des images RSO avec celui des images optiques (Martini, 2005). Ce modèle numérique de terrain est fourni par la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), menée par la NASA en février 2000. Grâce aux informations latitude-longitude-hauteur contenues dans le MNT, il est possible de trouver des points d'accroche permettant de le projeter dans le plan d'incidence oblique radar par transformation géométrique. Cette transformation est alors utilisée pour projeter les images Landsat depuis une visée verticale vers un plan oblique. Il est toujours possible de projeter une image RSO dans le repère du MNT au sol mais ce principe, largement utilisé car plus simple, mène en zone de relief à des aberrations ainsi qu'à une perte sensible d'information. En effet, le procédé d'une projection au sol utilise une interpolation non linéaire des données qui peut engendrer, entre autres, une modification irrémédiable des statistiques de l'information RSO.

3.1 Bases polarimétriques

Le comportement de rétrodiffusion polarimétrique d'un milieu peut être exprimé en terme de matrice de cohérence polarimétrique, **T**. C'est une représentation (3 x 3) complexe, largement utilisée pour caractériser les propriétés de diffusion polarimétriques incohérentes d'un milieu naturel donné (Cloude and Pottier, 1996 ; Ferro-Famil, 2000). Celle-ci est obtenue à partir de la matrice de diffusion cohérente S comme suit : (surface équivalente radar), σ_{pq}, pour chaque canal de polarisation ou directement à partir des éléments de diffusion cohérents comme suit :

$$\mathbf{T} = \left\langle \mathbf{k}\mathbf{k}^{*T} \right\rangle ,$$

$$\mathbf{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[S_{hh} + S_{vv} , S_{hh} - S_{vv} , 2\, S_{hv} \right]^T \qquad (1)$$

où $\mathbf{k}$ représente le vecteur cible. Ce vecteur contient toute l'information polarimétrique cohérente de la cible observée.
Il a été montré que des paramètres pertinents tels que l'entropie H, l'anisotropie A et l'angle $\overline{\alpha}$ peuvent être extraits de la matrice $\mathbf{T}$ pour caractériser les propriétés de diffusion d'un milieu (Cloude and Pottier, 1996). L'entropie H représente le caractère aléatoire de la rétrodiffusion globale et l'anisotropie A décrit l'importance relative des phénomènes de diffusion secondaires.
De tels paramètres sont obtenus par projection de la matrice de cohérence distribuée sur sa base des vecteurs propres, comme proposé par Cloude et Pottier (1996). Cette approche décompose une matrice de cohérence initiale en une somme pondérée de trois matrices de rang un :

$$\mathbf{T} = \mathbf{V}\, \mathbf{\Lambda}\, \mathbf{V}^{-1} = \sum_{k=1}^{3} \lambda_k \cdot \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^{*T} \qquad (2)$$

avec λ_k, la k-ième valeur propre de $\mathbf{T}$ et $\mathbf{v}_k$ son vecteur propre relié.
L'entropie est définie par

$$\mathrm{H} = -\sum_{k=1}^{3} p_k \ln_3 (p_k)$$

et l'anisotropie par

$$\mathrm{A} = \frac{p_2 - p_3}{p_2 + p_3} ,$$

avec

$$p_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^{3} \lambda_k} .$$

L'angle α, associé à chacune des matrices $\mathbf{T}_k$, est obtenu à partir du vecteur propre

$$\mathbf{v}_k = \begin{bmatrix} v_{k1} \\ v_{k2} \\ v_{k3} \end{bmatrix}$$

tel que

$$\alpha_k = \operatorname{atan} \sqrt{\frac{\left|v_{k2}\right|^2 + \left|v_{k3}\right|^2}{\left|v_{k1}\right|^2}}$$

où l'angle moyen

$$\overline{\alpha} = \sum_{k=1}^{3} p_k \alpha_k \cdot$$

3.2 Cartographie en bande L des milieux en été

Une estimation efficace de la nature des mécanismes de diffusion sur des scènes naturelles peut être réalisée par regroupement des résultats obtenus par des techniques de décomposition et de classification des données RSO. L'image est décomposée en 16 classes polarimétriques au moyen de procédures statistiques non dirigées (Ferro-Famil *et al.*, 2001). Ces classes sont ensuite partagées en regroupements (« clusters » ou regroupements de pixels ayant les mêmes caractéristiques polarimétriques et de localisation géographique proche) spatialement indépendants, sur lesquels une décision est prise.

3.2.1. Les forêts

En bande L, la réponse électromagnétique d'une forêt est caractérisée par son aspect fortement aléatoire (Cloude and Pottier,1997 ; Ferro-Famil, 2000). Ce comportement se traduit par une forte valeur de l'entropie sur ces régions et une faible valeur de l'anisotropie. Ces deux paramètres sont ainsi utilisés pour la détection des zones forestières par rapport à d'autres milieux plus déterministes.
L'entropie, H, et l'anisotropie, A, sont généralement utilisées conjointement pour estimer la distribution des valeurs propres d'une matrice de cohérence avec la relation suivante :

$$HA + (1-H)A + H(1-A) + (1-H)(1-A) = 1 \qquad (3)$$

Les quatre termes de l'équation (3) sont positifs et peuvent être associés à différentes configurations de jeu de valeurs propres. Le terme spécifique $H(1-A)$ est égal à 0 dans le cas d'une diffusion déterministe et atteint la valeur 1 lorsque la diffusion est aléatoire. Les zones de forêts peuvent donc être détectées en utilisant la règle de décision suivante :

$$H(1-A) > HA, (1-H)A, (1-H)(1-A) \Rightarrow H(1-A) > 0.5 \qquad (4)$$

En pratique, H et A sont estimés sur un « regroupement » et le seuil est fixé à 0,65 pour diminuer la sensibilité aux facteurs de perturbation. Ainsi un « regroupement » est attribué à la classe des forêts si :

$$H(1-A) > 0.65 \qquad (5)$$

3.2.2. Les surfaces ouvertes

En bande L, la procédure de détection des surfaces se base sur le nombre de mécanismes dominants dans le phénomène de rétrodiffusion global du milieu (Ferro-Famil *et al.*, 2003). Ces mécanismes sont définis par décomposition de la matrice de cohérence sur sa base des vecteurs propres comme défini en (2). À chacune de ces matrices est associé un angle α à partir duquel la nature du mécanisme de diffusion peut être caractérisé**e**.
Dans le cas d'un mécanisme de diffusion dominant, un « regroupement » est assigné à la classe des surface**s** si :

$$\alpha_1 < 45° \quad (6)$$

où α_1 correspond à l'angle α du premier vecteur propre.

Dans le cas de deux mécanismes de diffusion dominants, la nature du mécanisme de diffusion est déterminé en comparant les deux premiers éléments diagonaux de la matrice distribuée construite comme suit :

$$\mathbf{T}_d = \lambda_1 \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_1^{*T} + \lambda_2 \mathbf{v}_2 \mathbf{v}_2^{*T} \quad (7)$$

Un regroupement est alors attribué à la classe des surfaces si

$$T_{d11} > T_{d22}.$$

3.3 Détection de la neige en bande C (hiver/été)

3.3.1. Sur les forêts

Une étude statistique polarimétrique est menée dans un premier temps à partir des données RSO en bande C. La valeur moyenne de la différence été-hiver des paramètres H et $\overline{\alpha}$, dans le cas de forêts enneigées et de forêts non enneigées, est calculée sur un nombre de zones suffisamment grand. Sur le tableau 3, on montre la valeur moyenne $\langle \Delta x \rangle$ et l'écart type $std(\Delta x)$ des variations temporelles pour les différentes zones sélectionnées et où $x = \mathrm{H}$ ou $\overline{\alpha}$.

TABLEAU 3 : Variations statistiques de $\underline{\alpha}$ et H pour les forêts enneigées. $\underline{\alpha}$ *and H statistic variations for snow under forests.*

	Sans neige (oct. 94)		Neige (avril 94)	
	$\langle \Delta x \rangle$	$std(\Delta x)$	$\langle \Delta x \rangle$	$std(\Delta x)$
$\underline{\alpha}$	1,64	1,96	6,77	2,01
H	0,019	0,021	0,074	0,027

L'observation jointe de la valeur moyenne et de l'écart type montre que le paramètre $\overline{\alpha}$ est un paramètre fiable pour la discrimination de la neige sèche sur les forêts. En effet, les forêts couvertes de neige montrent une diminution importante de $\overline{\alpha}$, tandis que les forêts libres de neige ont un comportement polarimétrique quasi constant. À partir de la valeur moyenne et de l'écart type calculés pour les forêts enneigées, un seuil de valeur égal à 4 ° est retenu. La neige sèche sous forêts est donc détectée si on a $\Delta\overline{\alpha} > 4°$. La méthode est alors appliquée aux deux sites d'étude (Martini *et al.*, 2005).

3.3.2. Sur les surfaces ouvertes

L'analyse statistique polarimétrique, menée précédemment dans le cas des forêts, est aussi appliquée dans le cas des surfaces sur les données en bande C. Sur le tableau 4, on montre la valeur moyenne et l'écart type des variations temporelles calculés pour des surfaces sans neige quelle que soit la saison ainsi que pour des surfaces enneigées en hiver. Il est alors visible qu'une simple méthode basée sur les variations d'été à hiver de l'entropie H ou de l'angle $\overline{\alpha}$ ne suffit pas à discriminer la neige sur les surfaces. En effet, même si la différence été-hiver du paramètre $\overline{\alpha}$ augmente en présence de neige, la valeur de l'écart type reste trop élevée par rapport à la valeur moyenne.

TABLEAU 4 : Variations statistiques de $\underline{\alpha}$ et H pour les surfaces enneigées. $\underline{\alpha}$ *and H statistic variations for snow covered surfaces.*

	Sans neige (oct. 94)		Neige (avril 94)	
	$\langle \Delta x \rangle$	$std(\Delta x)$	$\langle \Delta x \rangle$	$std(\Delta x)$
$\underline{\alpha}$	0,82	2,48	-5,24	4.53
H	0,012	0,032	-0,065	0,059

Afin d'augmenter le faible contraste polarimétrique entre les zones sans neige en octobre et enneigées au mois d'avril, une approche traditionnelle d'optimisation du contraste polarimétrique est proposée. Cette méthode, dite d'OPCE (Optimization of Polarimetric Contrast Enhancement), optimise les états de polarisation à l'émission et à la réception pour maximiser la réponse de la cible par rapport à son environnement (Yang *et al.*, 2000).

En effet, il existe en général des états de polarisation pour lesquels l'amplitude de la réponse d'une cible peut être maximisée par rapport à l'amplitude de la réponse de son environnement (Boerner *et al.*, 1993 ; Ioannidis and Hammers, 1979). Cette technique repose sur l'utilisation des matrices de Kennaugh, $\mathbf{K}$, construites à partir des matrices de cohérence $\mathbf{T}$. Une matrice de Kennaugh relie les vecteurs de Stokes incident et diffusé, respectivement associés à la polarisation des ondes incidente et diffusée tel que

$$\mathbf{g_s} = \mathbf{K}\,\mathbf{g_i}$$

où

$$\mathbf{g} = [g_0 \quad g_1 \quad g_2 \quad g_3]^T$$

est une représentation incohérente. L'OPCE consiste à trouver les états de polarisation satisfaisants :

$$[\mathbf{g}_{opt}, \mathbf{h}_{opt}] = Arg \max_{(\mathbf{g},\mathbf{h})} \left(\rho_{opce} = \frac{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_a \mathbf{g}}{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_b \mathbf{g}} \right) \quad (8)$$

où la cible est représentée par sa matrice de Kennaugh $\mathbf{K_a}$ et l'environnement non désiré par $\mathbf{K_b}$ et $\mathbf{g}$, $\mathbf{h}$ sont les vecteurs de Stokes normalisés associés respectivement aux antennes d'émission et de réception.

Il a été montré dans Martini *et al.* (2004a ; 2004b) que l'image résultant du calcul du rapport d'optimisation ρ_{opce} illustre que des valeurs similaires du rapport d'optimisation peuvent être obtenues aussi bien sur des zones enneigées que sur des régions sans neige telles que les prairies ou les champs agricoles.

Dans le but de surmonter les limitations rencontrées avec l'OPCE, une méthode originale d'optimisation appelée PCVE (Polarimetric Contrast Variation Enhancement) est proposée (Martini *et al.*, 2006). Plutôt que d'optimiser simplement le contraste polarimétrique entre l'été et l'hiver comme le fait l'OPCE, la PCVE a pour but de déterminer l'état de polarisation, $(\mathbf{g}_{\max}, \mathbf{h}_{\max})$, pour lequel le contraste d'été à hiver sur les surfaces enneigées est maximisé tout en maintenant ce contraste à de faibles valeurs sur les zones de surface sans neige. Il s'agit d'une technique dirigée puisque la première étape consiste à localiser deux zones tests au sein de l'image d'hiver (avril), l'une choisie complètement enneigée (zone a) et l'autre libre de neige (zone b). Les mêmes zones sont sélectionnées sur l'image d'été (octobre) et sont donc non recouvertes de neige. À chacune de ces zones sont associées les matrices de Kennaugh $\mathbf{K_a}$, pour la zone (a) enneigée en hiver et non enneigée en été, et $\mathbf{K_b}$, pour la zone (b) sans neige quelle que soit la saison. Ces matrices sont utilisées pour calculer le couple $(\mathbf{g}_{\max}, \mathbf{h}_{\max})$ tel que (Martini, 2005) :

$$[\mathbf{g}_{\max}, \mathbf{h}_{\max}] = Arg\max_{(\mathbf{g},\mathbf{h})} \left(\frac{\rho_{neige}}{\rho_{pasneige}} = \frac{\frac{1}{N_a} \sum_{N_a} \frac{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_{\mathbf{a}-hiver} \mathbf{g}}{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_{\mathbf{a}-été} \mathbf{g}}}{\frac{1}{N_b} \sum_{N_b} \frac{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_{\mathbf{b}-hiver} \mathbf{g}}{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_{\mathbf{b}-été} \mathbf{g}}} \right) \quad (9)$$

N dénote le nombre de pixels contenus dans les zones tests et les indices a et b sont respectivement liés aux zones a et b.

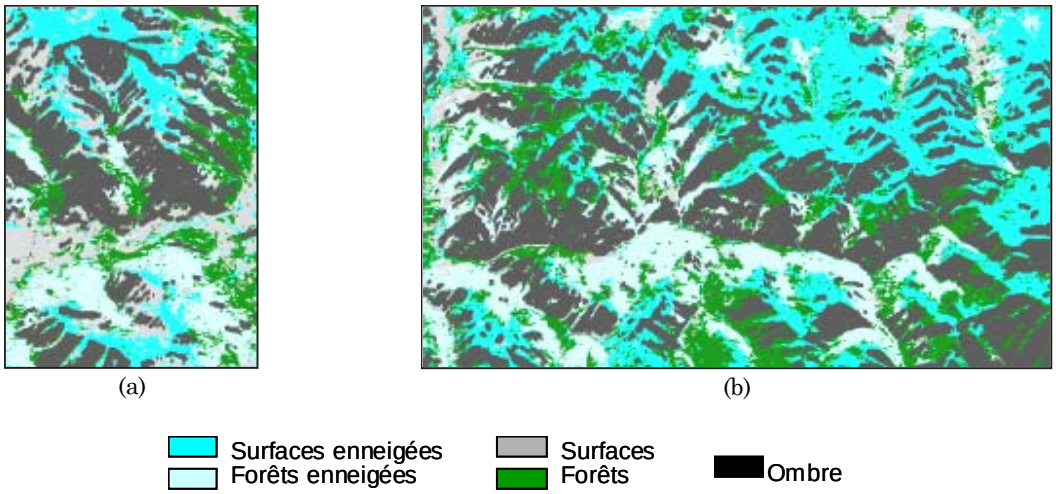
Une fois cet état optimal de polarisation trouvé, il est appliqué sur toute l'image afin de calculer la rapport maximum ρ_{pcve} pour chaque « regroupement » à partir des images d'été et d'hiver tel que :

$$\rho_{pcve} = \frac{\mathbf{h}_{\mathbf{max}}^T \mathbf{K}_{hiver} \mathbf{g}_{\mathbf{max}}}{\mathbf{h}_{\mathbf{max}}^T \mathbf{K}_{été} \mathbf{g}_{\mathbf{max}}} \quad (10)$$

Une valeur de ρ_{pcve} supérieure à 1 (0 dB) indique un accroissement de la réponse, dans la base $(\mathbf{g}_{\max}, \mathbf{h}_{\max})$, en hiver et est associée à la présence de neige.

Cette méthode est appliquée sur les données RSO polarimétriques multi-temporelles en bande C des sites de Risoul et Izoard. La phase d'apprentissage de la méthode, durant laquelle l'état de polarisation maximal est obtenu, est traitée uniquement à partir des données RSO du site de Risoul. Sur la figure 3a, on présente le résultat, sur la région de Risoul, de cet algorithme d'optimisation, permettant de cartographier la neige sèche sur les surfaces non boisées.

L'efficacité de cette méthode est démontrée en appliquant sur les données d'Izoard le même état de polarisation $(\mathbf{g}_{\max}, \mathbf{h}_{\max})$ trouvé à partir des données du site de Risoul. Le résultat obtenu est présenté sur la figure 3b. Ces résultats sont comparés aux images optiques Landsat projetées dans le plan d'incidence oblique. Ces derniers montrent ainsi l'intérêt de cette nouvelle méthode d'optimisation et sont très encourageants quant à son application à venir sur d'autres données RSO polarimétriques.



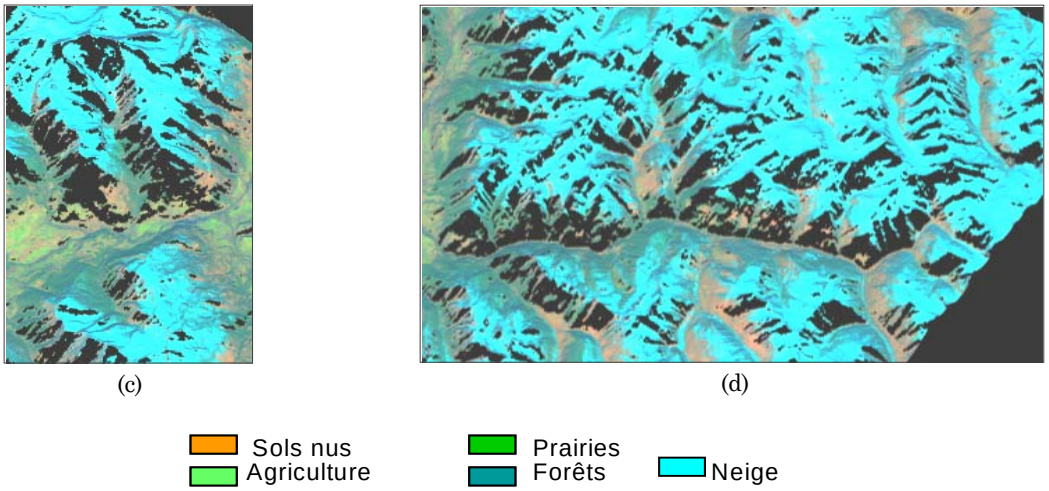


FIGURE 3 : Cartographie de la neige sèche à partir des données RSO polarimétriques de SIR-C du 12/04/1994, sur les sites de Risoul (a) et Izoard (b). Images optiques de Thematic Mapper de Landsat-5 du 12/04/1994 projetées dans le plan d'incidence radar sur les sites de Risoul (c) et Izoard (d). *Dry snow mapping using SIR-C polarimetric SAR data acquired on 04/12/1994 over the Risoul (a) and Izoard (b) sites. Slant range projected optical Landsat-5 TM images acquired on 04/12/1994 over the Risoul (c) and Izoard (d) sites.*

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les masques des deux classes d'occupation des sols en forêts et surfaces ouvertes ont été générés à partir des données RSO polarimétriques d'été en bande L. Cette méthode de classification peut néanmoins être appliquée à la bande C (Martini, 2005). La discrimination de la neige sèche sous les forêts et sur les surfaces ouvertes (prairies, rochers) a été menée en bande C au moyen de méthodes adaptées aux milieux sous jacents, puisque les caractéristiques polarimétriques des forêts et des surfaces non boisées diffèrent fortement. Sur la figure 3, on montre le résultat global de la fusion des résultats de cartographie de la neige sèche pour les sites de Risoul et Izoard. Cette carte finale d'enneigement est constituée de quatre classes correspondant aux deux types de milieux présents sur les deux sites d'étude (Risoul, Izoard) : surfaces non boisées ou forêts, en présence ou en absence de neige. Les limites inférieures de l'enneigement proposées par la cartographie RSO (1 200 m) ont été validées par les mesures au sol simultanées et l'image optique de Landsat du même jour.

La probabilité de bonne classification des quatre classes est de 77,65 % pour Risoul et de 77,09 % pour Izoard. Dans le cas où l'on ne considère que deux classes, zones enneigées et zones non enneigées, la probabilité de bonne classification atteint 81,00 % pour Risoul et à 81,39 % pour Izoard. Cette nouvelle approche présente des résultats très encourageants et mérite d'être appliquée à d'autres données RSO polarimétriques afin d'évaluer ses limitations. Deux remarques sont apportées sur cette méthode de détection de la neige sèche en milieux alpins : le cas des versants non cartographiés et la classification des milieux sous jacents en bande C.

4.1. Le cas des versants non cartographiés

Pour des raisons liées aux principes de mesure et de formation des images RSO, ces dernières sont généralement mesurées avec un angle d'incidence compris entre 20 ° et 60 °. Cet angle d'incidence couplé à la forte topographie rencontrée en milieux alpins rend inévitable l'effet d'ombrage observé sur les images RSO et impose une contrainte que l'on ne rencontre pas en terrain plat. Ainsi certains versants des sites d'étude ne sont pas illuminés par le signal radar.

Au contraire, dans le cas des images optiques de Landsat, où l'enregistrement est effectué en visée nadir (à la verticale du capteur) à 9 h 30 TU, les ombres portées sur l'image sont limitées aux ombres propres des versants abrupts. De ce fait, pour une meilleure comparaison des différentes zones d'intérêt des images radar et optique, un masque d'ombre est créé à partir du modèle numérique de terrain (MNT) pour les angles d'incidence supérieurs à 70 °. Ce masque d'ombre est alors appliqué sur les images RSO ainsi que sur les images optiques de Landsat projetées dans le plan d'incidence radar.

Ainsi, les résultats de classification présentés précédemment ne tiennent pas comptent de ces zones d'ombre illustrées en noir sur les figures 2 et 3.

Ces effets d'ombrage présentent une limitation physique à la cartographie RSO de la neige en milieu montagneux que seule une visée complémentaire opposée immédiate pourrait résoudre. Cas de figure envisageable avec un capteur aéroporté, mais pas avec les capteurs satellitaires actuels en raison de l'écart entre deux orbites complémentaires (12 jours pour RADARSAT-1 ou ENVISAT), et surtout en raison de la très forte variabilité temporelle des couverts neigeux en montagne tempérée.

4.2. La classification des milieux sous jacents en bande C

Comme il a été noté précédemment, la bande L a été privilégiée en raison de ses performances pour la classification des milieux naturels. Néanmoins, dans le cas d'une étude préparatoire au futur capteur RADARSAT-2, une analyse plus fine des avantages et des limites des méthodes de classification des milieux sous jacents en bande C s'impose. Des résultats encourageants de classification des milieux naturels à partir des données en bande C sont développés plus largement dans Martini (2005). Une adaptation des procédures de classification des milieux naturels en été uniquement à partir des données en bande C est possible. La restriction de la procédure de cartographie de la neige sèche se basant exclusivement sur des données RSO polarimétriques acquises en bande C permet ainsi de proposer une analyse mono-fréquentielle des environnements naturels recouverts de neige sèche.

5. CONCLUSION

Cet article s'inscrit dans une phase méthodologique préparatoire au futur capteur polarimétrique en bande C, RADARSAT-2 et présente une nouvelle procédure d'identification et de cartographie de la neige sèche en milieu de haute montagne (Alpes françaises).

La méthodologie proposée s'appuie sur une méthode séquentielle totalement polarimétrique et utilise les paramètres H-A-$\overline{\alpha}$ ainsi qu'une méthode originale d'optimisation de la variation de contraste, la PCVE. Les résultats cartographiques sont préliminaires, mais significatifs puisque la probabilité de bonne classification est supérieure à 77 %.

Dans cette étude, nous avons montré que la bande L donnait une classification de qualité et que les méthodes polarimétriques de détection de la neige sèche sont très satisfaisantes. L'utilisation exclusive de la bande C (cartographie en été et hiver) est prometteuse pour les applications au satellite polarimétrique RADARSAT-2 puisqu'elle devrait permettre de rendre mono-fréquentielles les procédures de cartographie de la neige sèche.

Néanmoins des limitations ont été notées : d'une part, les fortes contraintes géométriques dues aux effets de l'angle d'incidence, inhérents à l'imagerie RSO couplés à la topographie des milieux de haute montagne et, d'autre part, le nombre réduit de missions polarimétriques spatiales existantes pour tester et étendre l'application de cette nouvelle procédure. En effet, seule la mission polarimétrique SIR-C de 1994 était disponible, ancienne certes, mais de qualité et peu exploitée sur ce domaine de la neige sèche. Il faut noter que le recours à l'imagerie optique de Landsat est à ce jour nécessaire pour une comparaison fiable entre les premiers résultats polarimétriques proposés et la « réalité » optique des surfaces enneigées. Mais l'objectif à court terme, pour simplifier le protocole final, consiste à ne considérer que des jeux d'images RSO en été (référence) et hiver.

Remerciements

Cette étude a été financée par le CNRS et le Programme National de Télédétection Spatiale, France (PNTS-2003, #56). Nous sommes également très redevables auprès des équipes de terrain qui ont collecté les mesures de neige en haute altitude et fourni les données de validation (Météo-France, EDF). Nous remercions enfin les deux réviseurs anonymes de cet article ainsi que Monique Bernier de l'INRS-ETE (Québec) pour leur relecture et conseils avisés.

Références

Bernier, M. and Fortin, J.P. (1998) The potential of time series of C-band SAR data to monitor dry and shallow snow cover. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, no 1, p. 226-241.

Bernier, M., Fortin, J.P., Gauthier, Y., Fitzbach, J., Gendron, F., Royer, A., Gauthier, R., Dubé, L. and Vincent, P. (1998). EQEAU : an operational monitoring prototype for snow-water equivalent estimation from RADARSAT images. Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS'98), 4e Journées internationales de la polarimétrie radar, 13-17 juillet 1998, Nantes, France.

Boerner, W.M., Liu, C.L. and Zhang, X. (1993) Comparison of the optimization procedures for the 2 x 2 Sinclair and the 4 x 4 Mueller matrices in the coherent polarimetry application to radar target versus background clutter discrimination in microwave sensing and imaging. International Journal in Advances in Remote Sensing, vol. 2, p. 55-82.

Cloude, S.R. and Pottier, É. (1996) A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, no 2, p. 498-518.

Cloude, S.R. and Pottier, É. (1997) An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, no 1, p. 68-78.

Dedieu, J.P., Niang, M., Durand, Y., Guyomarc'h, G., Mérindol, L. et Sergent, C. (2005) Le potentiel des données ASAR-ENVISAT en bande C pour la détermination des caractéristiques de la neige humide en environnement alpin. Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection (SFPT), vol. 05-3, n° 179, p. 18-27.

Durden, S.L., Van Zyl, J.J. and Zebker, H.A. (1989) Modeling and observation of the radar polarization signatures of forested areas. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 27, no 33 : 290-301.

Ferro-Famil, L. (2000) Télédétection multi-fréquentielle et multitemporelle d'environnements naturels à partir de données SAR polarimétriques. Thèse, Université de Nantes, Nantes, France, 220 p.

Ferro-Famil, L., Pottier, É. and Lee, J.S. (2001) Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A/Alpha Wishart classifier. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, no 11, p. 2332-2342.

Ferro-Famil, L., Pottier, É. and Lee, J.S. (2003) Unsupervised classification of natural scenes from polarimetric interferometric SAR data. In « Frontiers of remote sensing information processing », C.H. Chen Chief Editor, Ed. World Scientific Publishing, July 2003, ISBN 981-238-344-1, p. 105-137.

Gailhard, J. (2005) Comparaison de différentes approches pour quantifier le couvert neigeux à l'échelle d'un bassin versant. Société Hydrotechnique de France, Paris, 16p.

Hallikainen, M., Pulliainen, J., Praks, J. and Arslan, A. (2002) Recent progress and challenges in radar remote sensing of snow. Proceedings of the 3rd International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters for SAR Data Land Applications, Sheffield, UK, 11-14 Sept. 2001, ESA SP-475, p. 185-192.

Ioannidis, G.A. and Hammers, D.E. (1979) Optimum antenna polarizations for target discrimination in clutter. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-27, p. 357-363.

Koskinen, J., Pulliainen, J. and Haillikainen, M. (1997) The use of ERS-1 SAR data in snow melt monitoring. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, nº 2, p. 601-610.

Lee, J.S., Grunes, M.R. and Pottier, É. (2001) Quantitative comparison of classification capability: fully polarimetric versus dual and single-polarization SAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, nº 11, p. 2343-2351.

Malnes, E. and Guneriussen, T. (2002) Mapping of snow covered area with RADARSAT in Norway. Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'02), 24-28 June 2002, Toronto, Canada, IEEE International, vol. 1.

Magagi, R. and Bernier, M. (2003) Optimal conditions for wet snow detection using RADARSAT SAR data. Remote Sensing of Environment, vol. 84, nº 2, p. 221-233.

Martini A. (2005) Télédétection d'un couvert neigeux en milieux alpins à partir de données SAR polarimétriques multi-fréquentielles et multi-temporelles. Thèse, Université de Rennes 1, Rennes, France, 186 p.

Martini, A., Ferro-Famil, L. and Pottier, É. (2004a) Snow Extent Discrimination in Alpine Areas from Polarimetric and Multi-Frequency SAR Data. Proceedings of EUSAR 2004, 24-27 May 2004, Ulm, Germany, p. 71-74.

Martini, A., Ferro-Famil, L. and Pottier, É. (2004b). Multy-frequency polarimetric snow discrimination in alpine areas. Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'04), Anchorage, Alaska, 20-24 Sept. 2004, vol. 6, p. 3684-3987.

Martini, A., Ferro-Famil, L., Pottier, É. and Dedieu, J.P. (2005) Dry snow mapping in mountainous regions from fully polarimetric SAR data. Proceedings of POLINSAR'05, Workshop on Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, ESA-ESRIN 17-21 January 2005, Frascatti, Italy.

Martini, A., Ferro-Famil, L., Pottier, É. and Dedieu, J.P. (2006) Dry snow discrimination in alpine areas from multi-frequency and multi-temporal SAR data. IEE Radar, Sonar and Navigation (sous presse).

Nagler, T. and Rott, H. (2005) Snow cover retrieval using Envisat ASAR. Proceedings of EARSeL'05, Land Ice and Snow-Special Interest Group Workshop, 21-23 February 2005, Bern, Switzerland.

Paquet, E. et Garçon, R. (2001) Caprices du climat et de l'hydrologie en haute montagne : nos prévisions d'apports plurimensuels sont-elles encore fiables ?. Société Hydrotechnique de France, Paris, 15 p.

Shi, J., Dozier, J. and Rott, H. (1993) Modeling and observation of polarimetric SAR response to dry snow. Proceedings of IGARSS'93, Tokyo, Japan. IEEE No. 93CH3294-6, vol. III, p. 1042-1045.

Storvold, R., Malnes, E. and Lauknes, I. (2005) Snow covered retrieval using Envisar ASAR in mountainous areas. Proceedings of EARSeL'05, Land Ice and Snow-Special Interest Group Workshop, 21-23 February 2005, Bern, Switzerland.

Ulaby, F.T., Moore, R. and Fung, A. K. (1986) Microwave Remote Sensing, vol. III, From Theory to Applications, Artech House, Inc., 1100 p.

Yang, J., Yamaguchi, Y, Boerner, W. M. and Lin, S. (2000) Numerical Methods for Solving the Optimal Problem of Contrast Enhancement. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, nº 2, p. 965-971.