Télédétection, 2006, vol. 6, n° 1, p. 31-43
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

DISCRIMINATION D'UN COUVERT DE NEIGE SÈCHE ET DE NEIGE HUMIDE SUR DES SITES DE FAIBLE VÉGÉTATION ET DE FORÊT DENSE DE CONIFÈRES À L'AIDE DE DONNÉES RADAR AÉROPORTÉES MULTIFRÉQUENCES ET MULTIPOLARISATIONS

Mélanie Trudel[1]*, Ramata Magagi[2] et Hardy B. Granberg[3]

[1] Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, 2500, Boulevard de l'Université, Sherbrooke (Québec), J1K 2R1, Canada.
Téléphone : 819-821-8000 poste 3175 ; télécopieur : 819-821-7944 ;
courriel : Melanie.Trudel@USherbrooke.ca.

[2] Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, 2500, Boulevard de l'Université, Sherbrooke (Québec), J1K 2R1, Canada.
Téléphone : 819-821-8000 poste 3281 ; télécopieur : 819-821-7944 ;
courriel : Ramata.Magagi@USherbrooke.ca.

[3] Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, 2500, Boulevard de l'Université, Sherbrooke (Québec), J1K 2R1, Canada.
Téléphone : 819-821-8000 poste 1007 ; télécopieur : 819-821-7944 ;
courriel : Hardy.Bengt.Granberg@USherbrooke.ca.

Soumis le 2 juillet 2005 ; révisé le 14 février 2006 ; accepté le 27 avril 2006

L'objectif de cette étude est de développer des outils basés sur les données radar multifréquences et multipolarisations pour discriminer la neige sèche de la neige humide sous différents couverts végétaux. Les données utilisées proviennent du projet CLPX (Cold - land Processes Field Experiments). Des données radar aéroportées multifréquences en bandes C (5,3 Hz), L (1,26 GHz) et P (0,43 GHz) et multipolarisations (HH, VV, HV) acquises à un angle d'incidence de 55 ° et des données de terrain sur les caractéristiques de la neige sont mesurées en février 2002, mars 2002 et mars 2003. Sur la zone d'étude située dans le nord du Colorado, deux types de sites sont identifiés : faible végétation et forêt dense de conifères (pin). Leurs coefficients de rétrodiffusion sont analysés afin de développer une méthode de discrimination entre les couverts de neige sèche et humide. Les résultats montrent que la bande C permet de discriminer l'état de la neige pour la région de faible végétation. Par contre des difficultés apparaissent pour la région de forêt dense de conifères. La bande L en polarisation HH et HV et la bande P en polarisation HH varient selon le couvert végétal, mais non selon l'état de la neige et permettent ainsi de corriger l'effet de la végétation sur le signal radar. Afin de discriminer la neige sèche de la neige humide en présence de végétation ou non, de nouveaux outils basés sur les rapports des données radar multifréquences et multipolarisations sont développés. Quel que soit le type de couvert végétal, un bon contraste est obtenu entre les deux types de neige en utilisant le rapport de $\sigma°_{HH}$ en bande L et C. Le rapport de $\sigma°_{HV}$ en bande L et C et le rapport de $\sigma°_{LHV}$ par $\sigma°_{CHH}$ permettent une bonne détection de la neige humide pour le site de forêt dense de conifères, mais présentent des erreurs dans la détection de la neige humide pour le site de faible végétation. Les rapports incluant la bande P sont moins efficaces pour discriminer les deux types de couvert de neige.

Mots clefs : Radar, Neige, Végétation, Multifréquences, Multipolarisations

DISCRIMINATION OF WET AND DRY SNOW COVERS OVER OPEN AREA AND DENSE CONIFEROUS FOREST FROM MULTIFREQUENCY AND MULTIPOLARIZATION AIRBORNE RADAR DATA

The aim of this study is to develop tools using radar data to discriminate wet and dry snow covers over vegetated areas. The data used are provided by the CLPX project (Cold - land Processes Field Experiments). Multifrequency [C (5.3 GHz), L (1.26 GHz) and P (0.43 GHz) bands] and multipolarization (HH, VV, and HV) airborne radar data acquired at 55 ° incidence angle and ground measurements of snow characteristics were acquired in February 2002, March 2002, and March 2003. Over the study area located in the Northern Colorado, two sites were identified: open area and dense coniferous forest. The backscattering coefficient measured over these sites were analyzed in order to develop methods for discriminating wet and dry snow covers. The results showed that the C-band measurements allow us to discriminate between wet and dry snow conditions over open area whereas, difficulties appear over dense coniferous forest. Since L band data in HH and HV polarization and P band data in HH polarization show a variation with the vegetation cover regardless of snow conditions (wet or dry), they can be used to correct the effect of vegetation. In order to discriminate wet and dry snow covers over dense coniferous forest or open areas, new tools were developed based on the ratios of multifrequency (C, L, and P bands) and multipolarization (HH, HV, VV) airborne radar data. Using the ratio of σ^0_{HH} in L and C bands, a good contrast is obtained between wet and dry snow covers, whatever the vegetation. The ratio σ^0_{HV} in L and C bands and the ratio σ^0_{LHV} by σ^0_{CHH}

provide good detection of wet snow over dense coniferous forest, but errors appear in the detection of wet snow over open area. The ratios involving the P-band are less suitable for the discrimination between wet and dry snow covers.

Keywords : Radar, Snow, Vegetation, Multifrequency, Multipolarization

1. INTRODUCTION

Connaître l'étendue de la couverture neigeuse aussi bien que son équivalent en eau (ÉEN) et son état (humide, sèche) s'avère important pour la compréhension des processus climatiques et pour la gestion de l'eau libérée lors de la fonte de ce couvert. L'utilité des données radar à synthèse d'ouverture (RSO) pour discriminer la neige sèche de la neige humide a été largement démontrée. Plusieurs algorithmes ont été développés afin de cartographier la neige humide en terrains montagneux (Rott and Nagler, 1995), en région agricole (Baghdadi *et al.*, 1997) et pour les régions caractérisées par de faibles couverts forestiers (Koskinen *et al.*, 1997). Ces algorithmes reposent sur des données RSO monofréquence (bande C) et monopolarisation (HH ou VV) mesurées par ERS-1 et RADARSAT-1. Ils sont basés sur la différence du coefficient de rétrodiffusion (σ° en dB) d'une image de neige humide et d'une image de neige sèche ou d'une image de neige humide et d'une image sans neige. Le coefficient de rétrodiffusion σ° de la neige humide en bande C est inférieur à celui de la majorité des autres surfaces naturelles, sauf pour les surfaces d'eau libre. Par contre, la présence d'une forêt dense augmente la valeur de σ° et par conséquent rend difficile la cartographie de la neige humide (Baghdadi *et al.*, 1997 ; Magagi *et al.*, 2002). L'objectif de cette étude est d'analyser les possibilités de discriminer la neige sèche de la neige humide pour une forêt dense de conifères à partir des données radar aéroportées du capteur AIRSAR-POLSAR multifréquences et multipolarisations. Des auteurs ont déjà démontré l'utilité des données radar polarimétrique dans l'analyse d'un couvert nival (Sokol *et al.*, 2003 ; Holden *et al.*, 1998 ; Praks *et al.*, 1998). Aussi, la végétation agit différemment sur le signal radar selon la fréquence et la polarisation (Fung *et al.*, 1994 ; Dobson *et al.*, 1992 ; Praks *et al.*, 2001 ; Boerner *et al.*, 1998). Une analyse multifréquences et multipolarisations des données radar apportera donc de l'information supplémentaire sur le couvert végétal. Ce genre de données radar acquises dans des conditions de neige et de végétation différentes et des informations sur les caractéristiques de la neige sont disponibles dans la banque de données du projet Cold-land Processes Field Experiments (CLPX) de la NASA (http://www.nohrsc.nws.gov/~cline/ ; http://nsidc.org/data/clpx/). Afin de discriminer la neige sèche de la neige humide en présence de végétation ou non, nous présentons de nouveaux outils développés à partir des données radar aéroportées multifréquences (bandes C, L et, P) et multipolarisations (HH, HV, VV).

2. SITE D'ÉTUDE ET DONNÉES EXPÉRIMENTALES

2.1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est le site expérimental de la campagne de mesures du projet CLPX. Elle est située dans le nord du Colorado et le sud du Wyoming (38,5 °- 42 °N, 104 °- 108,5 °W). Les données utilisées (radar aéroporté et données de terrain des caractéristiques de la neige) proviennent des sites d'étude Fraser-St-Louis Creek et Rabbit-Ears-Walton Creek couvrant chacun une superficie de 1 km x 1 km (figure 1). Ces deux sites d'étude présentent une faible dénivellation (moins de 5 °). Le site de Walton Creek (40,38 °N – 40,40 °N, 106,63 °W – 106,65 ° W) est pratiquement nu (faible végétation) et caractérisé par une épaisseur de neige variant de 90 à 240 cm. Quant au site de St-Louis Creek (39,91 °N – 39,93 °N, 105,85 °W – 105,87 °W), il est caractérisé par une végétation dense de conifères (pin) et une épaisseur de neige allant de 55 à 190 cm.

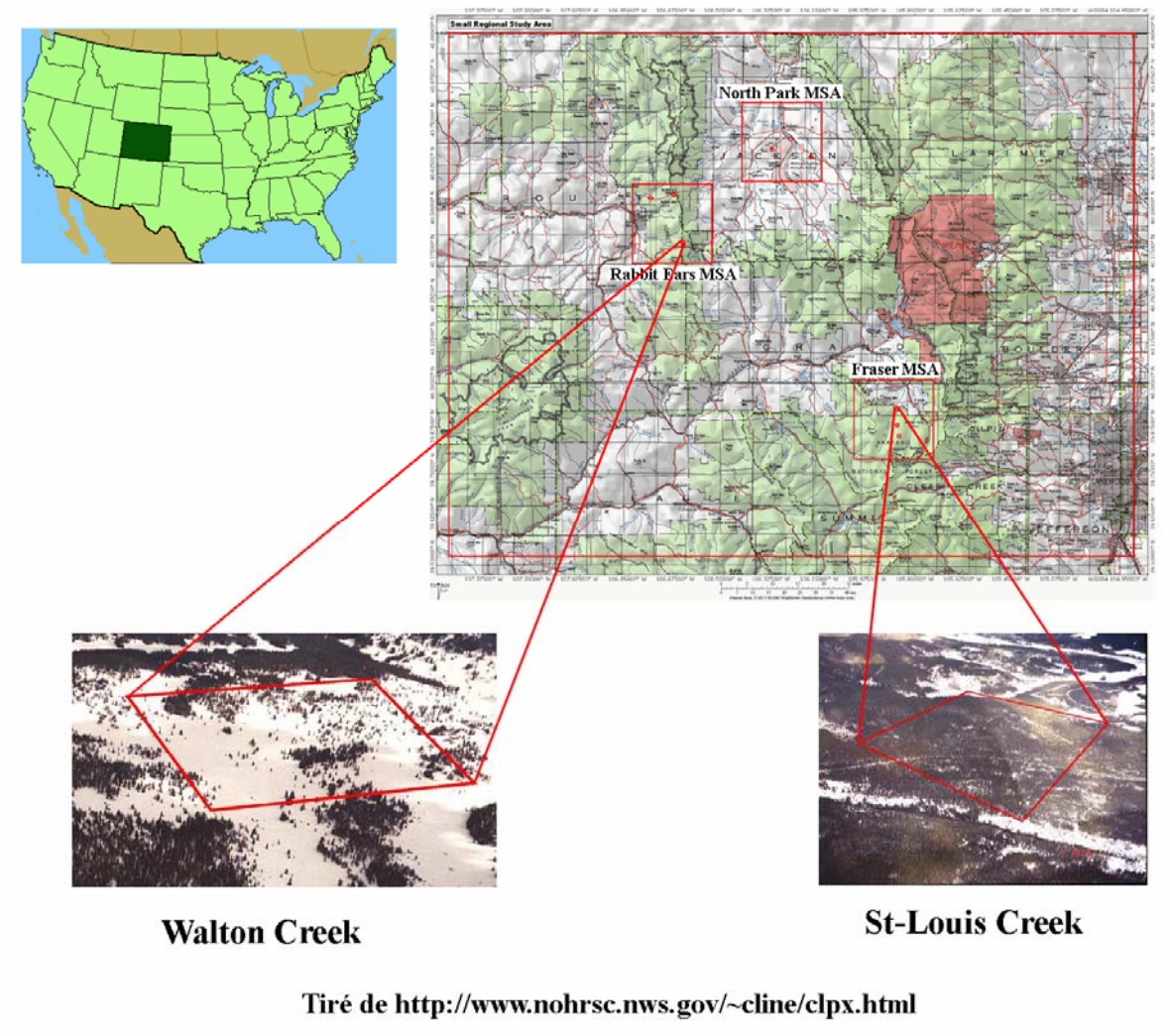


FIGURE 1 : Sites d'étude. *Study sites.*

2.2. Données radar aéroportées

Des mesures du coefficient de rétrodiffusion ont été acquises sur les deux sites d'étude sous différentes conditions de neige en février 2002, mars 2002 et mars 2003 à l'aide du capteur aéroporté AIRSAR-POLSAR. AIRSAR est un radar à synthèse d'ouverture construit par le Jet Propulsion Laboratory (JPL) et embarqué sur un DC - 8 de la NASA. Le système AIRSAR émet à trois fréquences : 0,43 GHz (bande P), 1,26 GHz (bande de L) et 5,31 GHz (bande C). Ce système entièrement polarimétrique peut collecter des mesures simultanées de σ^0 dans les trois bandes. L'angle de visée des images utilisées dans cette étude est de 55 ° et la résolution spatiale est d'environ 5 m. L'erreur absolue sur le coefficient de rétrodiffusion est de 3 dB. Le bruit du capteur est de –35 dB en bande C ; il est de –45 dB pour les bandes L et P. Le tableau 1 renseigne sur l'état de la neige lors de l'acquisition des images radar aéroportées.

TABLEAU 1 : État de la neige lors de l'acquisition des images radar aéroportées. *Snow conditions during the acquisition of airborne radar images*

Dates d'acquisition des images radar aéroportées sur les deux sites		État de la neige
Walton Creek	St-Louis Creek	
19 février 2002	19 février 2002	Neige sèche
25 mars 2002	23 février 2002	Neige sèche
30 mars 2003	30 mars 2003	Neige humide

2.3. Données terrain

Chaque site d'étude (Walton Creek ISA et St-Louis Creek ISA) dispose de seize puits à neige afin de connaître les caractéristiques du couvert nival (état de la neige, température de surface, épaisseur de neige, densité, équivalent en eau). Celles-ci sont mesurées sur le terrain au cours des 3 campagnes (février 2002, mars 2002 et mars 2003). Le tableau 2 renseigne sur le type de couvert végétal présent sur chaque site et sur les limites inférieures et supérieures des caractéristiques du couvert nival mesurées sur chacun des sites.

TABLEAU 2 : Caractéristiques terrain des deux sites d'étude. *Ground characteristics of the two study areas*

Site d'étude	Walton Creek	St-Louis Creek
Type de végétation	Large pré	Forêt dense de conifères
Épaisseur de neige (cm)	90 à 240	55 à 190
Densité de neige (kg / m^3)	250 à 370	180 à 350
Équivalent en eau (mm)	300 à 1000	100 à 650

3. MÉTHODES

3.1. Cadre théorique

La rétrodiffusion d'un couvert nival comprend des contributions de surface provenant des interfaces air / neige et neige / sol, de volume provenant de la couche de neige et, le terme d'interaction entre la rétrodiffusion de volume et les différentes couches de neige (Stiles and Ulaby, 1980). L'importance de ces contributions est déterminée par les caractéristiques du capteur (angle d'incidence, fréquence, polarisation) et les propriétés de la neige (teneur en eau, rugosité de surface, taille des grains de neige, etc.). La neige peut être considérée comme un mélange de glace, d'air et d'eau, de constante diélectrique (ε). Pour la détermination de ε, des modèles de mélange théoriques ont été développés (Ulaby *et al.*, 1986). Cependant, pour la neige humide, nous nous référons à l'expression simplifiée de ces modèles établie par Mätzler (1987) :

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \frac{23W}{1 - j\frac{f}{f_0}} \qquad (1)$$

où ε_s est la constante diélectrique de la neige sèche, W (<< 1) est la fraction volumique des inclusions d'eau, f est la fréquence en GHz et $f_0 = 10$ GHz est la fréquence de relaxation de la neige humide.

Un paramètre important qui gouverne les mécanismes de rétrodiffusion d'une onde dans un couvert nival est sa profondeur de pénétration δp. Elle est déduite des parties réelle (ε') et imaginaire (ε'') de la constante diélectrique (ε). δp représente la profondeur à laquelle l'énergie d'une onde se propageant dans un milieu décroît de 1/e (4.3 dB). Si le rapport ε" / ε' est très inférieur à 1, ce qui est le cas pour la neige, δp est donnée par l'équation 2 (Ulaby *et al.*, 1982)

$$\delta_p = \frac{\lambda}{2\pi}\frac{\sqrt{\varepsilon'}}{\varepsilon''} \qquad (2)$$

où λ est la longueur d'onde.

L'atténuation de l'onde dans le paquet de neige est introduite à travers δp. On définit le coefficient d'atténuation χ (dB / cm) par l'équation 3 (Ulaby *et al.*, 1982) :

$$\chi\,(dB/cm) = \frac{8.68}{2\delta p(cm)} \qquad (3)$$

Pour un couvert de neige de densité moyenne de 300 kg / m^3 à une température de – 5 °C, le comportement de χ en fonction de la teneur en eau de surface est représenté sur la figure 2 pour les fréquences 0,43 GHz, 1,2 GHz et 5,3 GHz.

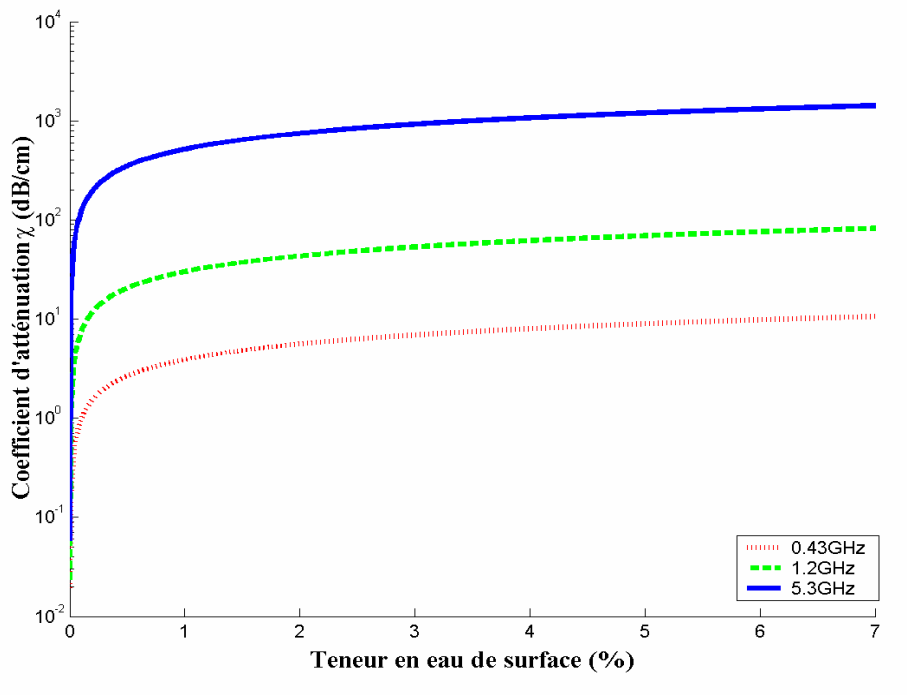


FIGURE 2 : Coefficient d'atténuation en fonction de la teneur en eau de surface pour les fréquences 5,3 GHz, 1,2 GHz et 0,43 GHz. *Field attenuation coefficient in relation to snow surface liquid water content for 5,3 GHz, 1,2 GHz and 0,43 GHz*

Comme le coefficient d'atténuation croît avec la fréquence et la teneur en eau de surface, la figure 2 montre que la bande C est mieux indiquée pour fournir un meilleur contraste neige sèche/neige humide.

À ces trois fréquences, la végétation agit différemment sur le signal (Fung *et al.*, 1994). Dans une forêt dense de conifères, le signal radar en bande C est sensible à la contribution de la végétation issue de la partie supérieure du couvert végétal. Le terme d'interaction végétation-sol est faible, mais affecte largement les processus de discrimination neige sèche/neige humide (Magagi *et al.*, 2002). En bandes L et P, les données radar incluent en grande partie une contribution de volume issue de la végétation et le terme d'interaction tronc-sol (Fung, 1994). Les mesures de σ° en bande L et P (longueurs d'ondes élevées) interagissent beaucoup plus avec la végétation (contribution volume, terme d'interaction) de sorte que la discrimination entre les deux types de couvert de neige est perturbée.

3.2 Traitement et organisation des données

Les images AIRSAR-POLSAR (cinq au total) sont étalonnées par le Jet Propulsion Laboratory de la NASA. Le coefficient de rétrodiffusion est ensuite extrait à l'aide du logiciel ENVI (http://www.rsinc.com/envi/index.asp). Les deux sites d'étude (faible végétation et forêt dense de conifères) et les puits à neige (18 x 18 pixels) où les mesures terrain des caractéristiques de neige ont été effectuées sont ensuite localisés sur les images avec une incertitude de 1 à 3 pixels. Un filtre de Lee de 5 x 5 est ensuite appliqué afin de réduire le chatoiement.

Différentes approches sont ensuite étudiées afin de discriminer la neige humide de la neige sèche. Pour chaque bande et chaque polarisation d'une image d'un site d'étude, la valeur moyenne de l'intensité est calculée puis convertie en décibel. Un masque est appliqué sur les seize puits à neige afin de les exclure dans le développement des méthodes de discrimination entre les couverts de neige sèche et humide. Les valeurs moyennes des seize puits à neige de chaque image seront utilisées par la suite pour évaluer, sur chacun des deux sites d'étude (faible végétation, forêt dense de conifère), la matrice de confusion de la détection de la neige humide. Celle-ci servira à la validation des différentes méthodes développées.

Une différence de σ° (dB) est effectuée en bande C, polarisations HH, VV et HV, entre les images d'hiver et une image de référence prise en condition de neige sèche le 19 février 2002. Conformément aux résultats de Rott et Nagler (1995), un seuil de –3 dB est appliqué à ces différences d'images afin de discriminer les couverts de neige sèche et humide.

De nouvelles méthodes de discrimination neige sèche/neige humide basées sur des rapports de bandes et de polarisations différentes sont aussi testées ($\sigma^0_{LHH} / \sigma^0_{CHH}$, $\sigma^0_{LHV} / \sigma^0_{CHV}$, $\sigma^0_{LHV} / \sigma^0_{CHH}$, etc.). Un seuil est établi à partir des statistiques obtenues sur les rapports d'images auxquels le masque est appliqué.

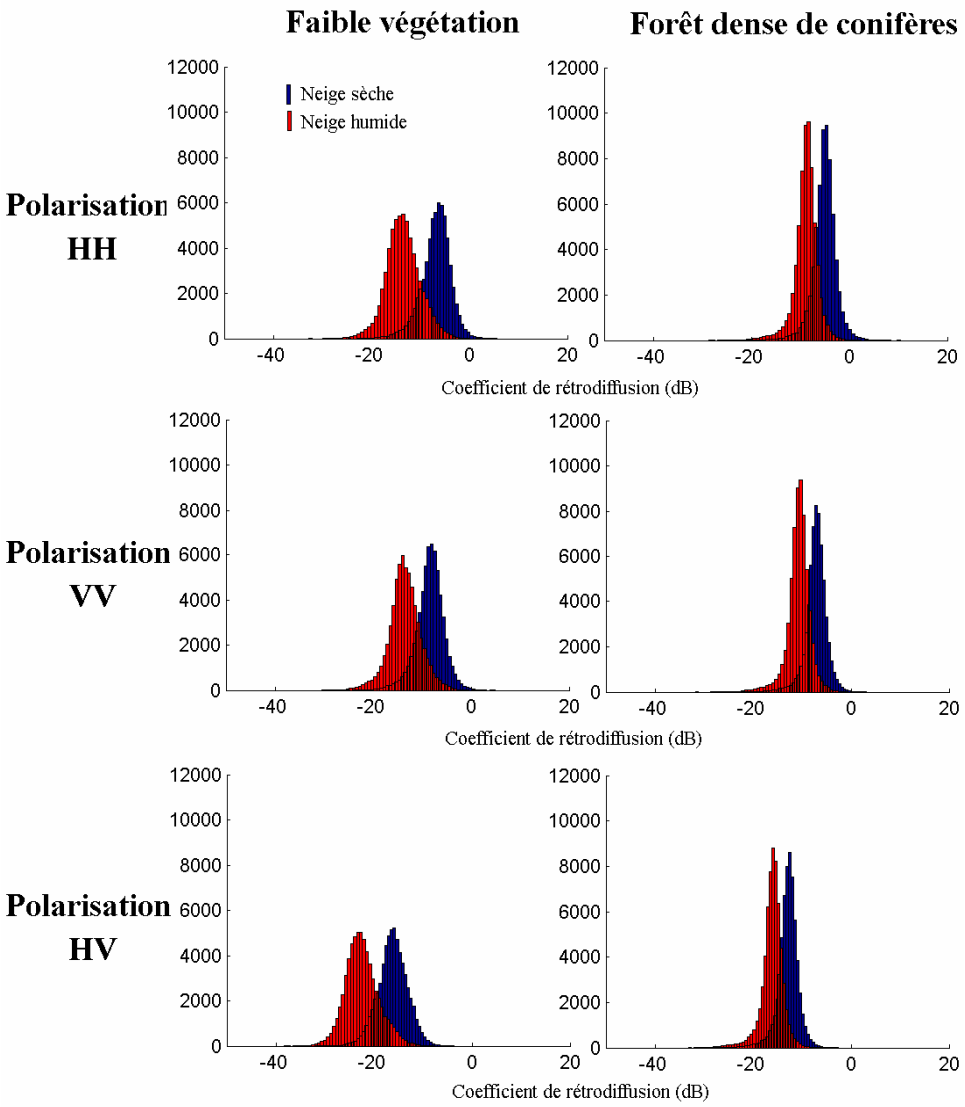


FIGURE 3 : Histogrammes des coefficients de rétrodiffusion en bande C. *Histograms of backscattering coefficients in C-band*

4. RÉSULTATS

La figure 3 montre un contraste entre les histogrammes des coefficients de rétrodiffusion en bande C acquis en conditions de neige sèche et de neige humide. Ce contraste diminue en présence de végétation. Sur la figure 4, un seuil de –3 dB est appliqué sur la différence entre les images d'hiver et une image de référence. Pour la région de faible végétation, une bonne discrimination est obtenue entre les deux couverts de neige (Rott and Nagler, 1995 ; Baghdadi *et al.*, 1997). Par contre, pour la région de forêt dense de conifères, cette méthode ne permet pas une bonne discrimination. Le tableau 3 présente la matrice de confusion de cette méthode de discrimination. Elle est générée à partir d'un seuillage à -3 dB appliqué sur la différence d'images des puits à neige localisés sur les sites de faible végétation et de forêt dense de conifères. Une erreur de 6 % au plus est obtenue sur la zone de faible végétation en condition de neige humide. Les pourcentages d'erreur sont de 25 % en polarisation HH, 13 % en polarisation VV et 32 % en polarisation HV pour la région de forêt dense de conifères. Ainsi, comme démontré par Baghdadi *et al.* (1997), il est difficile de détecter la neige humide sous un couvert forestier.

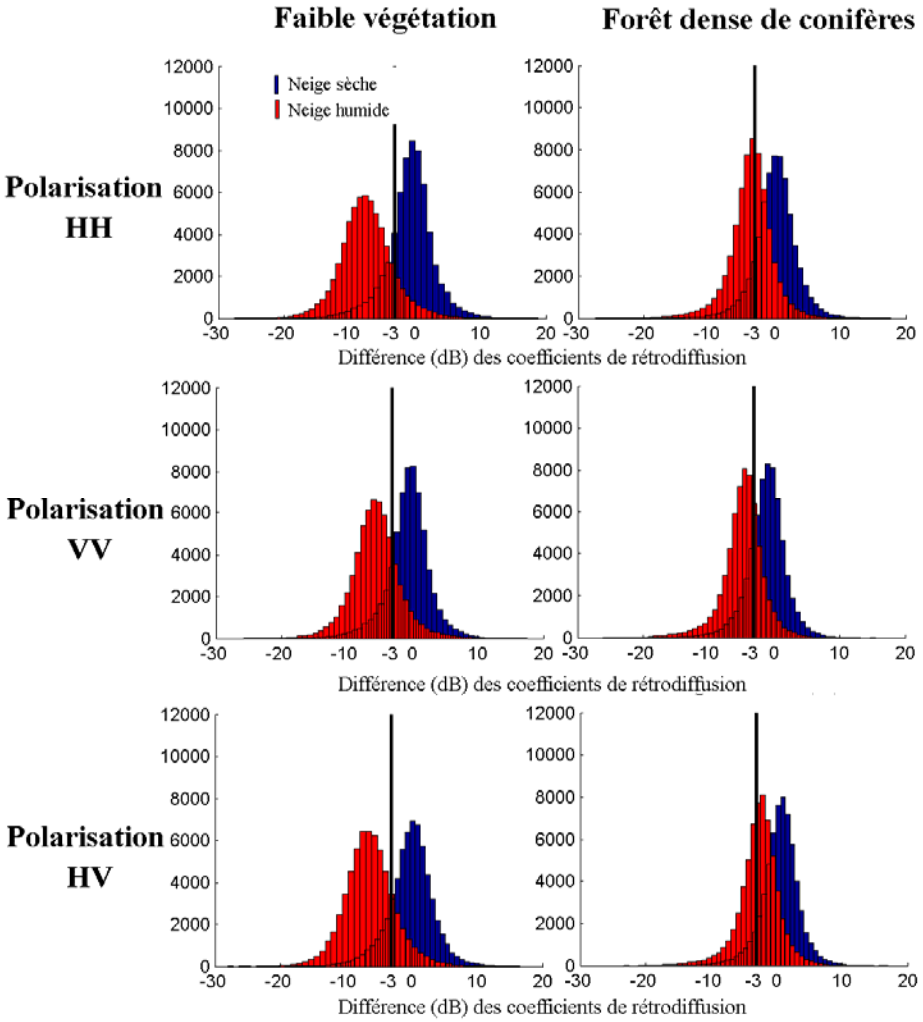


FIGURE 4 : Histogrammes des différences des coefficients de rétrodiffusion en bande C. *Histograms of subtractions of backscattering coefficient in C-band*

TABLEAU 3 : Matrice de confusion pour les puits à neige des deux sites d'étude obtenue à partir d'un seuillage à –3 dB de la différence entre une image d'hiver et une image de neige sèche. *Stamp confusion of snow wells of the two study sites obtained from a threshold of –3 dB of the difference between a winter image and a dry snow image*

Végétation		Polarisation HH		Polarisation VV		Polarisation HV	
	Neige	sèche	Humide	sèche	humide	sèche	humide
Faible végétation	sèche	100	0	100	0	100	0
	humide	0	100	6	94	0	100
Forêt dense de conifères	sèche	100	0	100	0	100	0
	humide	25	75	13	87	31	68

Pour des raisons énoncées dans la sous-section 3.1, la figure 5 indique que le coefficient de rétrodiffusion en bande L ne montre pas de différences significatives entre les mesures de neige sèche et celles de neige humide. Les histogrammes sont quasiment superposés aussi bien sur les sites de faible végétation que sur ceux de forêt dense de conifères. Par contre, le coefficient de rétrodiffusion σ° est supérieur et homogène sur le site de forêt dense de conifères par rapport au site de faible végétation.

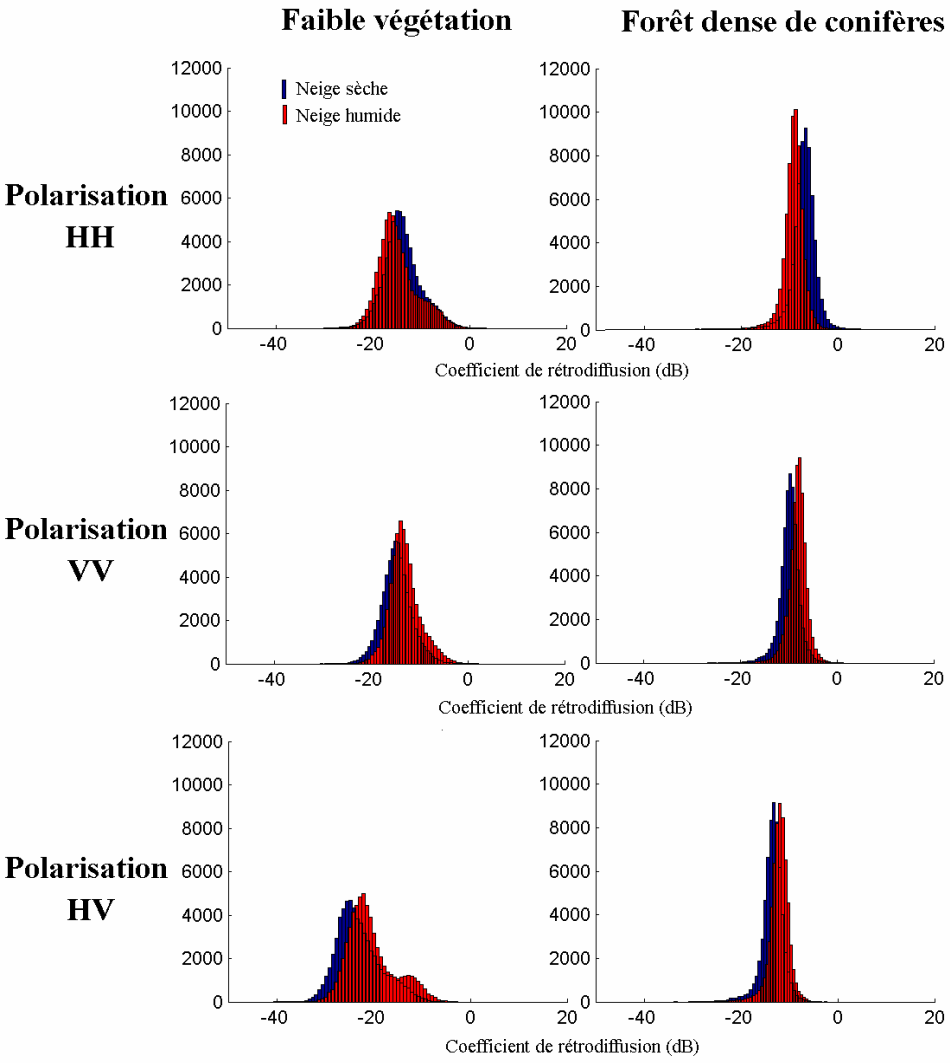


FIGURE 5 : Histogrammes des coefficients de rétrodiffusion en bande L
Histograms of backscattering coefficients in L-band

Tout comme la bande L, le coefficient de rétrodiffusion en bande P est très influencé par le terme d'interaction sol-végétation **(**Fung, 1994). En bande P et en polarisation HH, les histogrammes ne montrent aucune discrimination possible entre les couverts de neige sèche et humide (figure 6). Par contre, en polarisations VV et HV, les histogrammes des coefficients de rétrodiffusion montrent des possibilités de discriminer les couverts de neige sèche et de neige humide sur les sites de faible végétation et de forêt dense de conifères. Toutefois, en effectuant des différences d'image entre les images d'hiver et une image de référence prise en condition de neige sèche, il s'avère impossible d'établir un seuil commun permettant de discriminer la neige sèche de la neige humide, autant pour le site de faible végétation que pour le site de forêt dense de conifères.

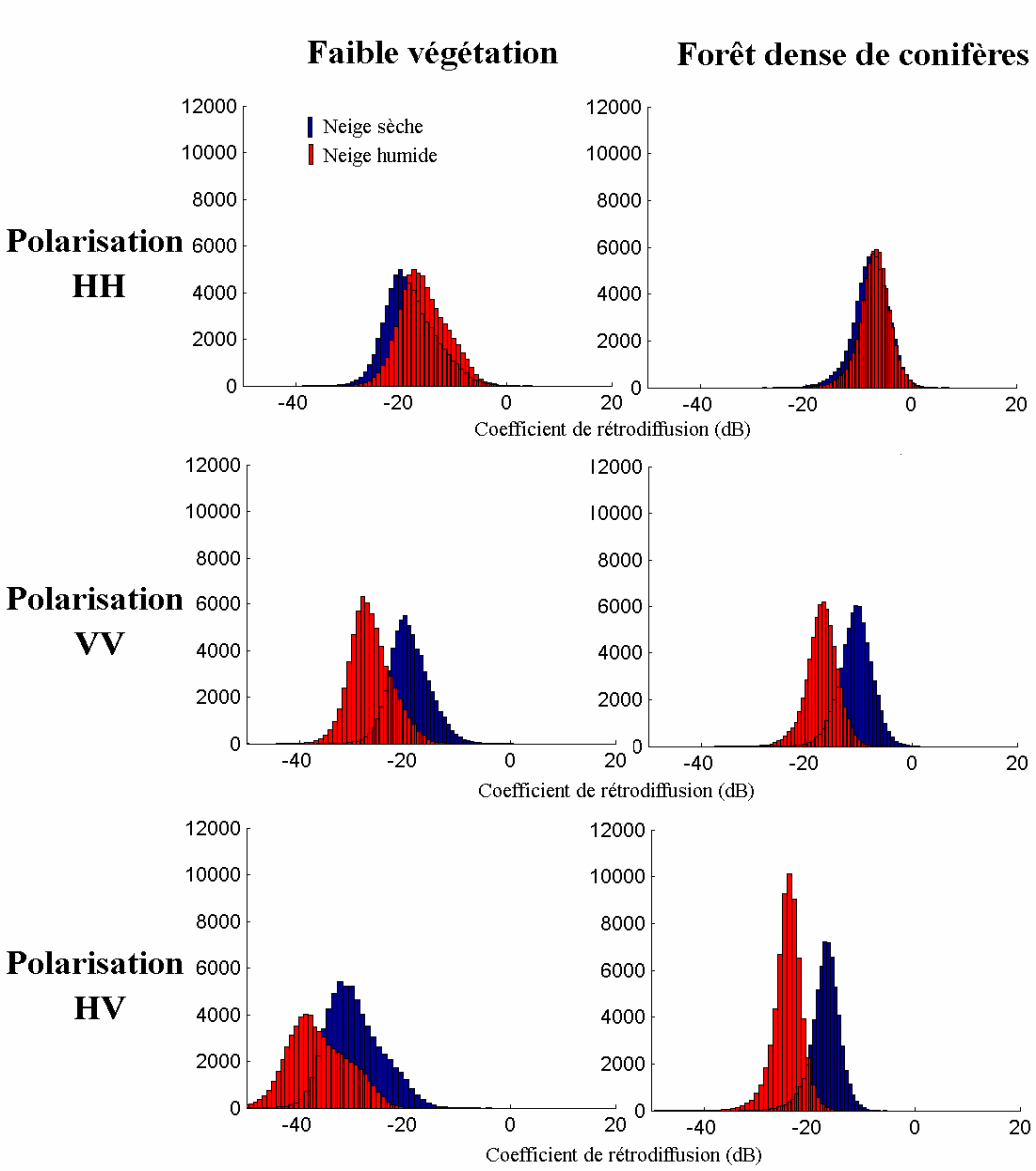


FIGURE 6 :. Histogrammes des coefficients de rétrodiffusion en bande P. *Histograms of backscattering coefficients in P-band*

Ainsi, le coefficient de rétrodiffusion en bande C est influencé par l'état de la neige et par la présence de végétation. Les figures 5 et 6 montrent que les signaux radar en bande L et en bande P, polarisation HH, sont influencés par la végétation mais pas par l'état de la neige. À partir de la combinaison de la bande C et de la bande L, ou de la bande C et de la bande P, polarisation HH, nous avons développé une nouvelle méthode de détermination de l'état de la neige (sèche ou humide), peu importe le couvert végétal. Les résultats des différentes combinaisons sont présentés ci-dessous :

a) La figure 7 montre les histogrammes du rapport $\sigma^0_{LHH} / \sigma^0_{CHH}$ pour le site de faible végétation (haut), le site de forêt dense de conifères (bas), en conditions de neige sèche (bleu) et de neige humide (rouge). Il ressort qu'à partir d'un certain seuil, le rapport $\sigma^0_{LHH} / \sigma^0_{CHH}$ permet de discriminer la neige humide de la neige sèche en présence de végétation ou non. L'analyse de nos histogrammes nous permet de fixer ce seuil à 1,3. Le tableau 4 présente la matrice de confusion de cette méthode de discrimination. Elle est générée à partir d'un seuillage à 1,3 du rapport L_{HH} / C_{HH} appliqué sur les puits à neige des deux sites d'étude. Une erreur maximale de 6 % est obtenue pour le site de forêt dense de conifères en condition de neige sèche.

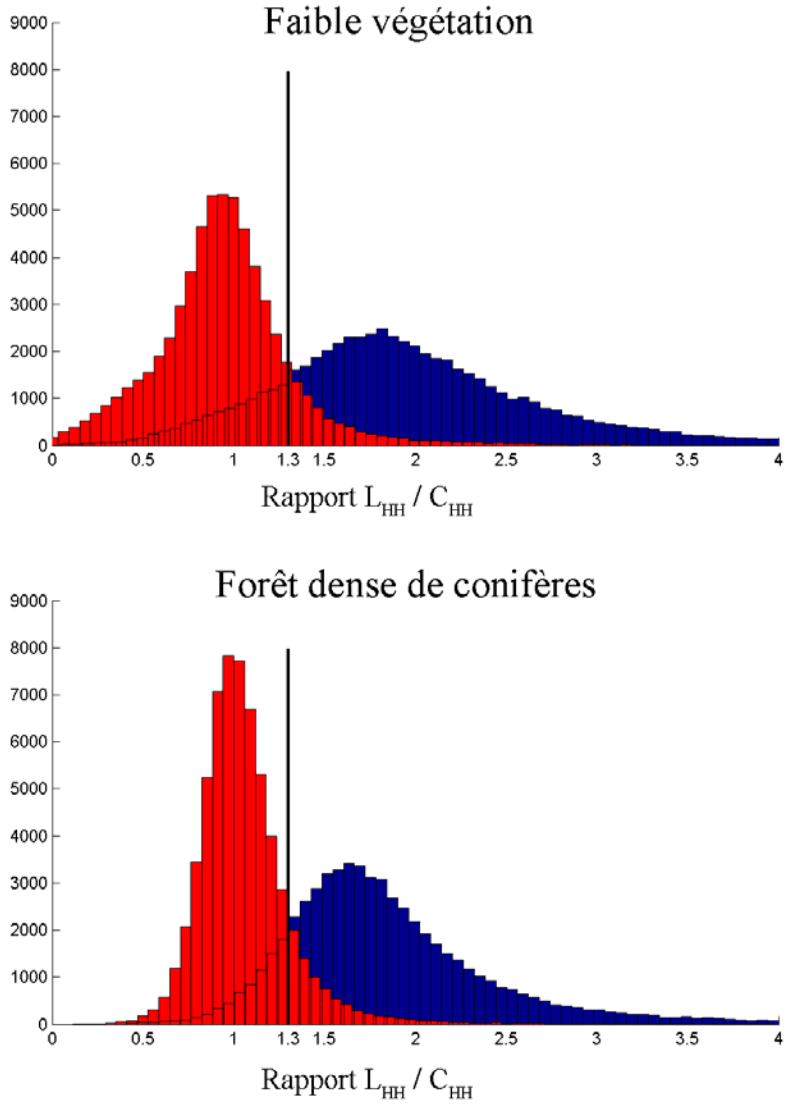


FIGURE 7 :
Rapport des coefficients de rétrodiffusion en bande L et C, polarisation HH.
Ratio of backscattering coefficients in L- and C-band, HH polarization

TABLEAU 4 : Matrice de confusion pour les puits à neige des deux sites d'étude obtenue à partir d'un seuillage à 1,3 du rapport LHH / CHH. *Stamp confusion of snow wells of the two studies sites, obtained from a threshold of 1.3 of LHH / CHH ratio*

Végétation		Rapport L_{HH} / C_{HH}	
	Neige	sèche	humide
Faible végétation	sèche	100	0
	humide	0	100
Forêt dense de conifères	sèche	94	6
	humide	0	100

b) Les histogrammes du rapport $\sigma^0_{LHV} / \sigma^0_{CHV}$ pour le site de faible végétation (haut) et pour le site de forêt dense de conifères (bas) sont montrés dans la figure 8. À partir d'un seuil de 1, il est possible de discriminer la neige humide de la neige sèche. Le tableau 5 présente la matrice de confusion obtenue à partir de ce seuil appliqué sur le rapport $\sigma^0_{LHV} / \sigma^0_{CHV}$ des puits à neige. Contrairement à la méthode des différences de σ^0 (tableau 3), on obtient une meilleure détection de la neige humide pour le site de forêt dense de conifères. Par contre, des erreurs (19 %) surviennent dans la détection de la neige humide pour le site de faible végétation.

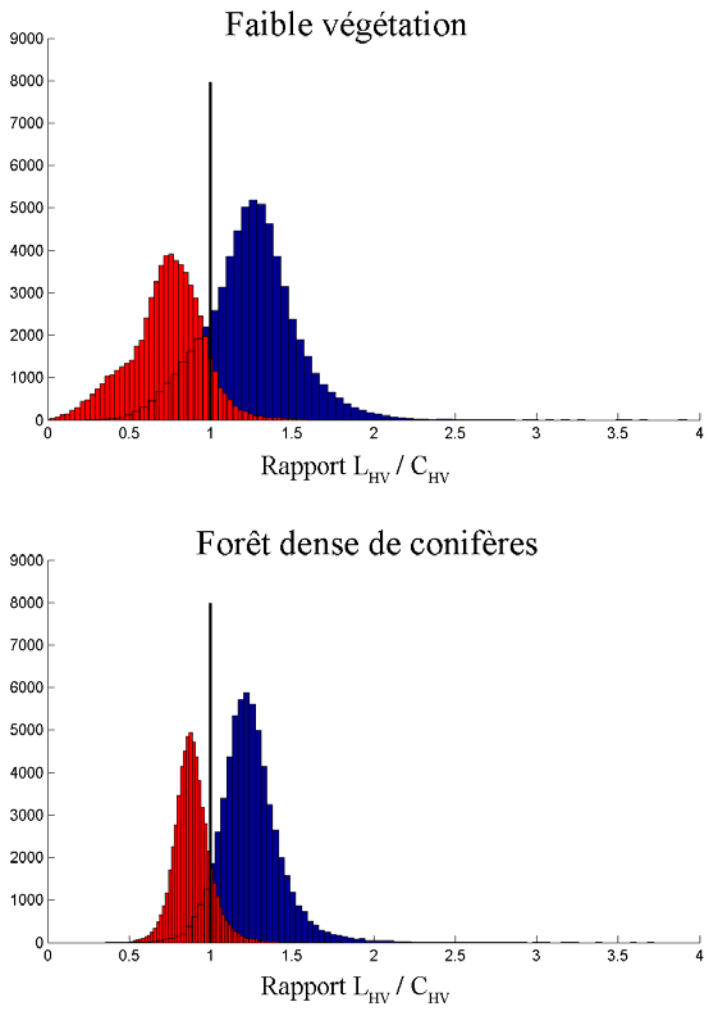


FIGURE 8 : Rapport des coefficients de rétrodiffusion en bande L et C, polarisation HV. *Ratio of backscattering coefficients in L- and C-band, HV polarization*

TABLEAU 5 : Matrice de confusion pour les puits à neige des deux sites d'étude obtenue à partir d'un seuillage à 1 du rapport LHV / CHV. *Stamp confusion of snow wells of the two study sites obtained from a threshold of 1of LHV / CHV ratio*

Végétation		Rapport L_{HH} / C_{HH}	
	Neige	sèche	humide
Faible végétation	sèche	100	0
	humide	19	81
Forêt dense de conifères	sèche	100	0
	humide	0	100

c) Les histogrammes du rapport σ^0_{LHV} / σ^0_{CHH} sont présentés sur la figure 9 pour le site de faible végétation (haut) et pour le site de forêt dense de conifères (bas). Leur analyse permet de fixer un seuil à 2,5 pour la discrimination des conditions de neige sèche (bleu) et de neige humide (rouge). La matrice de confusion de la méthode (tableau 6) générée en appliquant ce seuil au rapport σ^0_{LHV} / σ^0_{CHH} des puits à neige montre une bonne détection de la neige humide pour le site de forêt dense de conifères et des erreurs (13 %) dans la détection de la neige humide pour le site de faible végétation.

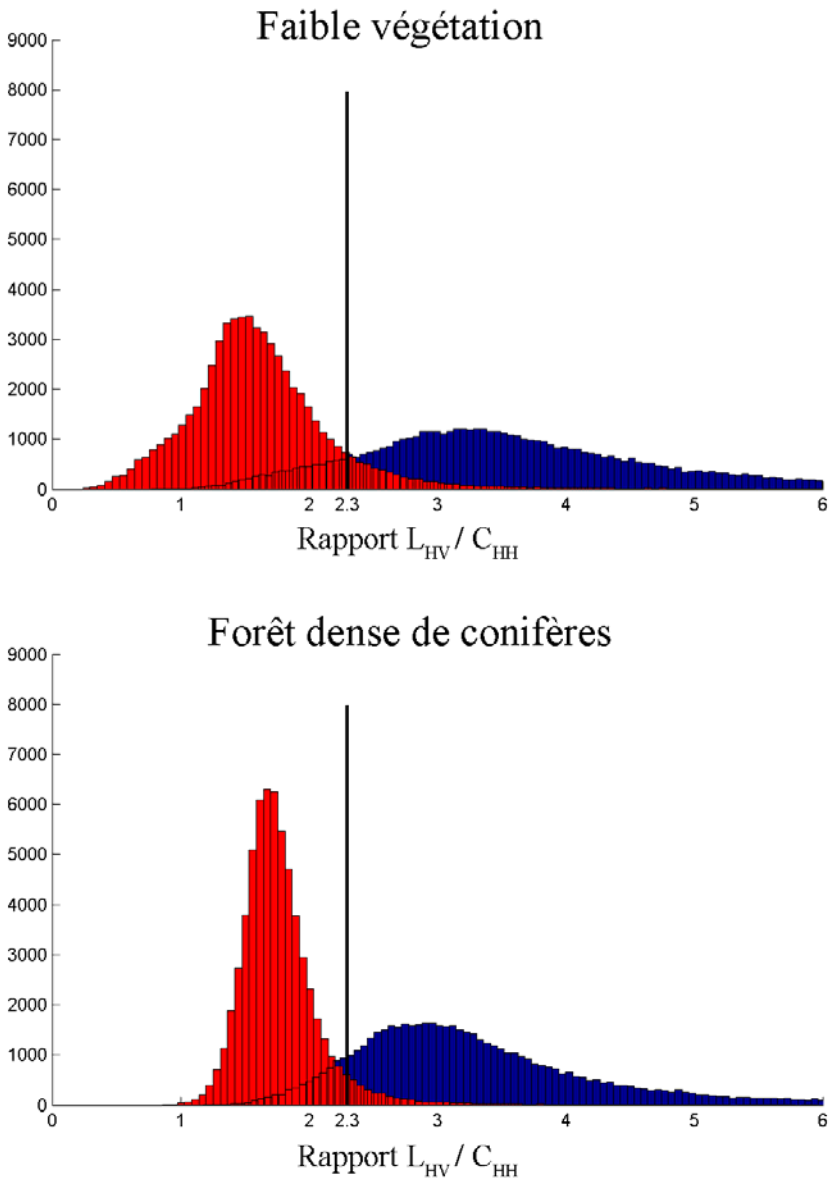


FIGURE 9 : Rapport des coefficients de rétrodiffusion en bande L, polarisation HV, et C, polarisation HH. *Ratio of backscattering coefficients in L-band, HV polarization, and C-band, HH polarization*

TABLEAU 6 : Matrice de confusion pour les puits à neige des deux sites d'étude obtenue à partir d'un seuillage à 2,5 du rapport LHV / CHH. *Stamp confusion of snow wells of the two study sites obtained from a threshold of 2.5 of LHV / CHH ratio*

Végétation		Rapport L_{HH} / C_{HH}	
	Neige	sèche	humide
Faible végétation	sèche	100	0
	humide	13	87
Forêt dense de conifères	sèche	100	0
	humide	0	100

Les rapports incluant la bande P et d'autres polarisations se sont avérés moins concluants pour la détermination de l'état de la neige.

5. DISCUSSION ET CONCLUSION

Les résultats de cette étude ont de nouveau montré le potentiel des données radar à synthèse d'ouverture en bande C pour la discrimination de la neige sèche et de la neige humide. En accord avec Rott et Nagler (1995) et Baghdadi *et al.* (1997), le coefficient de rétrodiffusion mesuré en bande C par le AIRSAR permet une bonne discrimination entre la neige sèche et la neige humide

sur les sites de faible végétation. Le site de forêt dense de conifères est très influencé par la présence de végétation si bien que la discrimination entre les deux types de neige est difficile.

Le rapport (σ^0_{LHH} / σ^0_{CHH}) permet une meilleure discrimination entre les types de neige que (σ^0_{LHV} / σ^0_{CHV}) et (σ^0_{LHV} / σ^0_{CHH}) et ce, indépendamment du taux de couvert végétal. L'intérêt majeur de notre approche multipolarisations utilisant les bandes L et C pour déterminer l'état de la neige est qu'elle sera facilement applicable aux capteurs spatiaux ALOS-PALSAR (bande L) et RADARSAT-2 (bande C) qui lui, sera normalement en orbite en 2006. Il est toutefois important de noter la compatibilité entre les caractéristiques de ces capteurs (tableau 7). À travers ces rapports, nous venons de développer des outils permettant de déterminer la présence de neige humide qui handicape fortement la détermination de l'équivalent en eau de la neige. D'autres indices polarimétriques et multifréquences sont en cours d'analyse pour l'estimation de ce paramètre important à partir des données radar.

TABLEAU 7 : Caractéristiques des capteurs ALOS-PALSAR et RADARSAT , *ALOS-PALSAR and RADARSAT-2 characteristics.*

Capteur	ALOS-PALSAR	RADARSAT-2
Fréquence	1,27 GHz (bande L)	5,3 GHz (bande C)
Polarisation	HH ou VV ou HH + HV ou VV + VH ou polarimétrique	HH ou VV ou HV ou VH ou HH + HV ou HH + HV ou polarimétrique
Angle d'incidence nominal (°)	8 - 60	10 - 60
Résolution nominale de la portée au sol (m)	10 – 100	3 - 100
Résolution azimutale nominale (m)	10 - 100	3 – 100
Largeur de fauchée (km)	20 - 350	10 - 500
Cycle orbital (jours)	46	24

(Tiré de http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/about/palsar.htm et de http://www.space.gc.ca/asc/fr/satellites/radarsat2/default.asp).
(From http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/about/palsar.htm and http://www.space.gc.ca/asc/fr/satellites/radarsat2/default.asp)

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la NASA pour la gratuité des données CLPX utilisées dans cette étude.

Références

Baghdadi, N., Gauthier, Y. and Bernier, M. (1997) Capability of multitemporal ERS-1 SAR data for wet snow mapping. Remote Sensing of Environment, vol. 60, n°2, p 174-186.

Boerner, W. M., Mott, H., Luneburg, E., Livingstone, C., Brisco, B., Brown, R. J. and Patterson, J. S. (1998) Polarimetry in radar remote sensing : basic and applied concepts, principles and applications of imaging radar. John Wiley and Sons, 866 p.

Dobson, C., Ulaby, F.T., LeToan, T., Beaudoin, A., Kasischke, E. and Christesen, N. (1992) Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, n° 2, p. 412-415.

Fung, A. K. (1994) Microwave Scattering and Emission Models and their Applications. Artech House, Norwood (MA).

Holden, M., Solberg, A.S., Solberg, R. (1998) Wet snow-cover mapping by C- and L-band polarimetric SAR. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'98 Proceedings. vol. 3, p. 1533 – 1537.

http://www.nohrsc.nws.gov/~cline/

http://nsidc.org/data/clpx/

http://www.rsinc.com/envi/index.asp

http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/about/palsar.htm

http://www.space.gc.ca/asc/fr/satellites/radarsat2/default.asp

Koskinen, J.T., Pulliainen, J.T. and Hallikainen, M.T. (1997) The use of ERS-1 SAR data in snow melt monitoring. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, p. 601-610.

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.

Magagi, R., Bernier, M. and Bouchard, M.-C. (2002) Use of Ground Observations to Simulate the Seasonal Changes in the Backscattering Coefficient of the Subarctic Forest. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, n° 2, p. 281-297.

Mätzler, C. (1987) Applications of the interaction of microwaves with the natural snow cover. Remote Sensing Reviews, vol. 2, p. 259-387.

Praks, J., Alasalmi, H. and Hallikainen, M. (2001) Polarimetric properties of boreal forest in L- and C-band SAR images. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'01 Proceedings, vol. 7, p. 3050 – 3052.

Praks, J., Koskinen, J., Arslan, A.N., Kruopis, N., Alasalmi, H. and Hallikainen, M. (1998) Cloud target decomposition theorems applied to EMISAR data acuired during EMAC'95 snow campaign. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'98 Proceedings, vol. 3, p. 1538 – 1540.

Rott, E. and Nagler, T. (1995) Monitoring temporal dynamics of snowmelt with ERS-1 SAR. Proceeding IGARSS'95, Firenze, Italie, 10-14 Juillet 1995, p. 1747-1749.

Sokol, J., Pultz, T. J. and Walker, A. E. (2003) Passive and active airborne microwave remote sensing of snow cover. International Journal of Remote Sensing, vol. 24, n°24, p. 5327-5344.

Stiles, W.H. and Ulaby, F.T (1980) The active and passive microwave response to snow parameter, I : wetness. Journal of Geophysical Research, vol. 85 n°C2, p. 1037-1044.

Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A. (1982) Microwave Remote Sensing Active and Passive; from Theory to Applications, Vol. 2 : Radar Remote Sensing and Surface Scattering Emission Theory. Addison-Wesley Publishing Compagny Inc., p. 457-1064.

Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A. (1986) Microwave Remote Sensing Active and Passive; from Theory to Applications. Vol. 3 : From Theory to Applications. Addison-Wesley Publishing Compagny Inc., p.1065 – 2162.