

G

GB
2401.72
R42T78
2006

**Département de géomatique appliquée
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke**

Analyse du couvert nival à l'aide de données radar polarimétriques multifréquences et des mesures terrain de la campagne CLPX (Cold-Land Processes Field Experiments)

Mélanie Trudel 1982-

**Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences géographiques (M.Sc.),
cheminement Télédétection**

Décembre 2006

© Mélanie Trudel, 2006

I- 2200

Composition du Jury

Analyse du couvert nival à l'aide de données radar polarimétriques multifréquences et des mesures terrain de la campagne CLPX (Cold-Land Processes Field Experiments)

Mélanie Trudel

Ce mémoire a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Directeur de recherche : Ramata Magagi
Codirecteur de recherche : Hardy Granberg

Membres du jury :
Kalifa Goïta (Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke)
François Charbonneau (Centre canadien de télédétection, Ressources naturelles Canada)

Résumé

Dans cette recherche, la caractérisation du couvert nival est effectuée à l'aide de certaines données du projet Cold-Land Processes Field Experiments de la NASA (CLPX) acquises en septembre, février et mars des années 2002 et 2003. Celles-ci comprennent des mesures des caractéristiques de la neige, du couvert forestier, des conditions météorologiques, un modèle numérique d'élévation et des données radar aéroporté polarimétriques multifréquences (bandes C, L et P) du capteur AIRSAR-POLSAR. Ces données seront utilisées pour analyser l'apport des techniques multifréquences polarimétriques pour la caractérisation du couvert nival en présence de couverts forestiers (faible végétation, forêt éparsée de conifères, forêt dense de conifères).

Différentes techniques ont été développées afin de détecter la neige humide sous différents couverts forestiers. La méthode de détection de la neige humide développée par Rott et Nagler (1995) présente des erreurs d'au mieux 13% pour le site de forêt éparsée de conifères et 25% pour le site de forêt dense de conifères, avec le signal rétrodiffusé en polarisation HH. L'utilisation des polarisations circulaires en bande C améliore les résultats, mais les erreurs restent élevées (22% pour le site de forêt éparsée de conifères et 13% pour le site de forêt dense de conifères). L'utilisation des rapports de bande en décibel $\sigma_{LHH}^0 / \sigma_{CHH}^0$, $\sigma_{LHV}^0 / \sigma_{CHH}^0$, $\sigma_{LHV}^0 / \sigma_{CHV}^0$ et $\sigma_{LVV}^0 / \sigma_{CHH}^0$ permet de détecter la neige humide (erreurs $\leq 13\%$) pour les sites de faible végétation et de forêt dense de conifères. Des erreurs élevées ($\geq 16\%$) sont obtenues avec cette technique sur le site de forêt éparsée de conifères. L'analyse des signatures polarimétriques dans les trois bandes montre que leur forme varie en fonction de l'état de la neige (humide ou sec) et de la densité du couvert forestier. L'analyse de la hauteur de socle des signatures polarimétriques permet d'établir un seuil discriminant l'état de la neige en bande P. La matrice d'erreur réalisée sur les puits à neige avec cette technique utilisant la hauteur de socle présente des erreurs inférieures à 6%. Pour la détermination de l'état de la neige, les techniques de décomposition de la cible présentent des résultats prometteurs. Les décompositions de Freeman-Durden et de Cloude-Pottier permettent d'identifier les principaux mécanismes de diffusion présents lors de la rétrodiffusion d'un couvert nival sous différents couverts forestiers pour les trois bandes. Il est également possible d'établir un seuil

discriminant l'état de la neige (sec, humide) à l'aide de la puissance de diffusion de volume issue de la décomposition de Freeman-Durden en bande C, ainsi qu'à l'aide du paramètre d'entropie et de l'angle α issue de la décomposition de Cloude-Pottier en bande P. La technique utilisant la puissance de la diffusion de volume présente des erreurs de détection de la neige humide d'au plus 16% pour le site de forêt éparses de conifères. La matrice d'erreur réalisée sur les puits à neige à partir des valeurs d'entropie ne présente pas d'erreur de classification.

L'analyse des coefficients de rétrodiffusion en fonction du couvert forestier montre que l'effet de la végétation sur le signal varie en fonction de la fréquence, la polarisation, la densité et la structure du couvert forestier ainsi que des conditions au sol (sol dégelé sans neige, neige sèche, neige humide). Trois indices de végétation radar (IVR, $IVRD_{HH}$ et $IVRD_{VV}$) sont analysés. L'indice IVR en bande C et L, ainsi que l'indice $IVRD_{VV}$ en bande L sont sensibles à la densité du couvert forestier. L'analyse de la puissance de diffusion de volume issue de la décomposition de Freeman-Durden permet également une caractérisation de la densité du couvert forestier en bande C, L et P.

Afin de corriger partiellement l'effet du couvert forestier sur la rétrodiffusion du couvert nival, une différence entre le coefficient de rétrodiffusion en bande C (polarisation HH) et la puissance de diffusion de volume en bande C en condition de neige humide est réalisée. La matrice d'erreur réalisée sur les puits à neige à partir d'un seuillage de 1.5 dB sur l'image de différence montre des erreurs d'au plus 6 %.

Les résultats obtenus dans nos travaux démontrent clairement l'utilité des données radar multifréquence, multipolarisation et polarimétrique pour la détection de la neige humide sous différents couverts forestier.

Mots clés : neige, couvert forestier, radar, polarimétrie, multifréquence

Abstract

In this research, the characterization of snow cover is made from data collected in September, February and March of 2002 and 2003, during Cold-land Processes Field Experiments project of the NASA. These data include snow and forests characteristic measurements, meteorological conditions, digital elevation model (DEM) and polarimetric multifrequency SAR data (C, L and P bands) acquired from AIRSAR-POLSAR airborne sensor. These data will be used to analyze multifrequency polarimetric techniques to characterize snow cover over forested areas (open area, sparse coniferous forest, and dense coniferous forest).

Different techniques have been developed to detect wet snow over different forested areas. The methodology of wet snow detection developed by Rott and Nagler (1995) is first analyzed. The best result is obtained in HH polarization (13% for the sparse coniferous forest site and 25 % for the dense coniferous forest site). C-band data in circular polarizations improves these results, but the errors remain high (22 % for the sparse coniferous forest site and 13 % for the dense coniferous forest site). The use of σ^0 ratio in dB $\sigma^0_{LHH} / \sigma^0_{CHH}$, $\sigma^0_{LHV} / \sigma^0_{CHH}$, $\sigma^0_{LHV} / \sigma^0_{CHV}$ and $\sigma^0_{LVV} / \sigma^0_{CHH}$ allows to detect wet snow ($\leq 13\%$ errors) for both the open area and the dense coniferous forest sites. However, with this technique, higher errors ($\geq 16\%$) are obtained for the sparse coniferous forest site. The analysis of polarimetric signatures in the three bands shows that their shapes vary according to snow conditions (wet or dry) and forest densities. The pedestal height of polarimetric signatures in P band allows to apply a thresholding approach to discriminate between snow conditions (wet or dry). The error matrix generated from polarimetric signature techniques applied to snow pit measurements shows error higher than 6%. For the characterization of snow condition, target decomposition theorems show promising results. For the three bands, the Freeman-Durden and Cloude-Pottier decompositions allow to understand scattering mechanisms of snow-covered-forested areas. Also, a thresholding approach applied to volume scattering power of the Freeman-Durden decomposition in C band as well as to entropy parameter together with angle α value of Cloude-Pottier decomposition shows abilities to detect wet snow over forested areas. The technique using the volume scattered power shows detection errors higher than 16%. No

classification error is obtained in the error matrix generated from entropy values over the snow pits.

The analysis of backscattering coefficients as a function of forest density (open area, sparse coniferous forest and dense coniferous forest) shows variations in the signal as a function of frequency, polarization, density and forest structures as well as with ground conditions (snow-free, dry snow, wet snow). Three radar vegetation indexes (IVR, $IVRD_{HH}$ and $IVRD_{VV}$) are analyzed. The IVR index in C and L bands, as well as the $IVRD_{VV}$ index in L band are sensitive to forest density. The volume scattered power of the Freeman-Durden decomposition also allows to characterize forest density in C, L and P bands.

In order to partially reduce the effect of forested area on the backscattering of a snow cover, image difference between the C-band backscattering coefficient (HH polarization) and the C-band volume scattered power in wet snow condition is performed. The error matrix generated over the snow pit shows that a threshold of 1.5 dB applied to the image difference leads to errors less than 6 %.

The obtained results clearly show the utility of multifrequency, multipolarisation and polarimetric SAR data for wet snow detection over different forested areas.

Key words: snow, forested area, SAR, multifrequency, polarimetric

Table des matières

Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux	vii
Liste des symboles.....	ix
Remerciements	xi
1. Introduction	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Objectifs.....	4
1.3 Hypothèses.....	5
2. Zone d'étude et données expérimentales.....	6
2.1 Présentation de la zone d'étude	6
2.2 Descriptions des données expérimentales	8
2.2.1 Données sur le couvert forestier	8
2.2.2 Données sur le couvert nival	11
2.2.3 Données radar aéroporté.....	11
2.2.4 Données météorologiques.....	12
2.2.5 Données auxiliaires.....	14
3. Théorie.....	15
3.1 Amplitude du signal radar	15
3.1.1 Rétrodiffusion d'un couvert nival.....	15
3.1.2 Rétrodiffusion d'un couvert forestier	18
3.2 Polarimétrie	21
3.2.1 Signature polarimétrique	24
3.2.2 Décomposition de Freeman-Durden.....	29
3.2.3 Décomposition de Cloude-Pottier	32

4.	Méthodologie.....	35
	4.1 Identification des sites d'études.....	38
	4.2 Développement de techniques radar multifréquence polarimétrique pour la détection de la neige humide	38
	4.3 Évaluation de l'effet d'un couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival	41
	4.4 Correction de l'effet d'un couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival	42
5.	Présentation des résultats.....	44
	5.1 Développement de techniques radar multifréquence polarimétrique pour la détection de la neige humide : résultats.....	44
	5.1.1 Coefficient de rétrodiffusion, bande C, L et P, simple polarisation	44
	5.1.2 Techniques multifréquence, multipolarisation	55
	5.1.3 Signature polarimétrique	58
	5.1.3 Décomposition de Freeman-Durden.....	70
	5.1.3 Décomposition de Cloude-Pottier	79
	5.2 Évaluation de l'effet d'un couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival : résultats.....	86
	5.2.1 Coefficient de rétrodiffusion, bande C, L et P, simple polarisation	86
	5.2.2 Indices de végétation radar multipolarisation.....	89
	5.2.3 Décomposition de Freeman-Durden.....	93
	5.2 Correction de l'effet d'un couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival : résultats.....	95
6.	Discussion et conclusion	98
7.	Références	108

Liste des figures

Figure 2.1 : Zone d'étude.....	6
Figure 2.2a : Site d'étude Rabbit Ears, Walton Creek	7
Figure 2.2b : Site d'étude Rabbit Ears, Buffalo Pass	7
Figure 2.4c : Site d'étude Fraser, St-Louis Creek.....	8
Figure 2.3 : Densité du couvert forestier pour la zone d'étude (USDA)	9
Figure 2.4 : Type de couvert forestier pour la zone d'étude (USDA)	10
Figure 2.5 : Structure du type de couverture forestière pour le site de forêt éparses de conifères (Buffalo Pass) et pour le site de forêt dense de conifères (St-Louis Creek)	10
Figure 2.6 : Conditions météorologiques sur le site Walton Creek.....	13
Figure 2.7 : Conditions météorologiques sur le site Buffalo Creek.....	13
Figure 2.8 : Conditions météorologiques sur le site St-Louis Creek.....	14
Figure 3.1 : Différentes contributions de la rétrodiffusion d'un couvert nival.....	15
Figure 3.2 : 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.....	17
Figure 3.3 : Différentes contributions de la rétrodiffusion d'un couvert forestier.....	18
Figure 3.4 : Rétrodiffusion d'un couvert forestier en fonction de la biomasse pour les bandes C, L et P, polarisation HH, VV et HV	19
Figure 3.5 : Rétrodiffusion relative des polarisations HH, VV et HV en fonction de l'orientation d'un cylindre (Boerner <i>et al.</i> , 1998).....	20
Figure 3.6 : Ellipse de polarisation, avec son angle d'orientation, ψ et son ellipticité, χ ..	23
Figure 3.7 : Signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'une surface Lisse, $k_s = 0$	25
Figure 3.8 : Signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'une surface rugueuse, $k_s = 0.8$	26
Figure 3.9 : Signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'une surface rugueuse, $k_s = 3$	26
Figure 3.10 : Signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'un réflecteur dièdre orienté horizontalement	27

Figure 3.11 : Signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'un dipôle orienté d'un angle de 0°	28
Figure 3.12 : Signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'un dipôle orienté d'un angle de 45°	28
Figure 3.13 : Signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'un dipôle orienté d'un angle de 90°	29
Figure 3.14 : Schéma d'inversion de la décomposition de Freeman-Durden.....	31
Figure 3.15 : Interprétation graphique des paramètres H et α de la décomposition de Cloude-Pottier	34
Figure 4.1 : Organigramme méthodologique.....	35
Figure 4.2 : Organigramme méthodologique : développement de techniques radar polarimétrique multifréquence	36
Figure 4.3 : Organigramme méthodologique : évaluation de l'effet d'un couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival.....	37
Figure 4.4 : Organigramme méthodologique : correction de l'effet d'un couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival.....	37
Figure 5.1 : Images radar en bande C polarisation HH et histogrammes des images pour des situations de neige sèche et de neige humide, site de faible végétation (Walton Creek).....	45
Figure 5.2 : Images radar en bande C polarisation HH et histogrammes des images pour des situations de neige sèche et de neige humide, sites de forêt éparses de conifères (Buffalo Pass).....	45
Figure 5.3 : Images radar en bande C polarisation HH et histogrammes des images pour des situations de neige sèche et de neige humide, sites de forêt dense de conifères (St-Louis Creek).....	46
Figure 5.4 : Histogrammes des différences de coefficients de rétrodiffusion, polarisation HH, bande C pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude	47
Figure 5.5 : Histogrammes des différences de coefficients de rétrodiffusion, polarisation VV, bande C pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude	48

Figure 5.6 : Histogrammes des différences de coefficients de rétrodiffusion, polarisation HV, bande C pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude	48
Figure 5.7 : Moyennes et écarts-type des coefficients de rétrodiffusion, polarisation linéaire, bande L	50
Figure 5.8 : Moyennes et écarts-type des coefficients de rétrodiffusion, polarisation linéaire, bande P	51
Figure 5.9 : Moyennes et écarts-type des coefficients de rétrodiffusion, polarisation circulaire, bande C	51
Figure 5.10 : Moyennes et écarts-type des coefficients de rétrodiffusion, polarisation circulaire, bande L	52
Figure 5.11 : Moyennes et écarts-type des coefficients de rétrodiffusion, polarisation circulaire, bande P	52
Figure 5.12 : Histogrammes des différences de coefficients de rétrodiffusion, polarisation DD, bande C pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude	53
Figure 5.13 : Histogrammes des différences de coefficients de rétrodiffusion, polarisation GG, bande C pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude	54
Figure 5.14 : Histogrammes des différences de coefficients de rétrodiffusion, polarisation DG, bande C pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude	54
Figure 5.15 : Signatures polarimétriques co-polarisée en bande C pour des conditions de neige sèche et humide.....	59
Figure 5.16 : Signatures polarimétriques ortho-polarisée en bande C pour des conditions de neige sèche et humide	60
Figure 5.17 : Signatures polarimétriques co-polarisée en bande L pour des conditions de neige sèche et humide.....	62
Figure 5.18 : Signatures polarimétriques ortho-polarisée en bande L pour des conditions de neige sèche et humide	64

Figure 5.19 : Signatures polarimétriques co-polarisée en bande P pour des conditions de neige sèche et humide.....	65
Figure 5.20 : Signatures polarimétriques ortho-polarisée en bande P pour des conditions de neige sèche et humide	67
Figure 5.21 : Composés couleur et histogrammes des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande C pour les trois sites d'étude en condition de neige sèche.....	71
Figure 5.22 : Composés couleur et histogrammes des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande C pour les trois sites d'étude en condition de neige humide.....	72
Figure 5.23 : Histogrammes des différences de puissance de diffusion de volume, bande C, pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude.....	73
Figure 5.24 : Histogrammes des différences de puissance de diffusion de surface, bande C, pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude.....	73
Figure 5.25 : Composés couleur et histogrammes des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande L pour les trois sites d'étude en condition de neige sèche.....	75
Figure 5.26 : Composés couleur et histogrammes des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande L pour les trois sites d'étude en condition de neige humide.....	76
Figure 5.27 : Composés couleur et histogrammes des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande P pour les trois sites d'étude en condition de neige sèche.....	77
Figure 5.28 : Composés couleur et histogrammes des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande P pour les trois sites d'étude en condition de neige humide.....	78
Figure 5.29 : Graphiques de l'angle α en fonction de l'entropie (H) pour les trois sites d'étude en bande C	81

Figure 5.30 : Graphiques de l'angle α en fonction de l'entropie (H) pour les trois sites d'étude en bande L	83
Figure 5.31 : Graphiques de l'angle α en fonction de l'entropie (H) pour les trois sites d'étude en bande P	85
Figure 5.32 : Coefficients de rétrodiffusion moyens en fonction du couvert forestier en bande C	87
Figure 5.33 : Coefficients de rétrodiffusion moyens en fonction du couvert forestier en bande L	88
Figure 5.34 : Coefficients de rétrodiffusion moyens en fonction du couvert forestier en bande P	89
Figure 5.35 : Indice de végétation radar (IVR) moyen en fonction du couvert forestier en bande C, L, P	90
Figure 5.36 : Images et histogrammes des indices de végétation radar (IVR) en bande C pour des conditions de neige humide	91
Figure 5.37 : Indice de végétation radar en double polarisation HH (IVRD _{HH}) moyen en fonction du couvert forestier en bande C, L, P	92
Figure 5.38 : Indice de végétation radar en double polarisation VV (IVRD _{VV}) moyen en fonction du couvert forestier en bande C, L, P	93
Figure 5.39 : Puissance de diffusion de volume moyenne (en dB) en fonction du couvert forestier en bandes C, L et P	94
Figure 5.40 : Histogrammes différences d'images entre la polarisation HH et la puissance de diffusion de volume en condition de neige humide; pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude.....	96

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Caractéristiques du couvert forestier pour les trois sites d'étude	9
Tableau 2.2 : Données sur le couvert nival des trois sites d'étude.....	11
Tableau 2.3 : Dates d'acquisition des images AIRSAR-POLSAR pour chaque site.....	12
Tableau 3.1 : Valeurs d'orientation (ψ) et d'ellipticité (χ) pour les polarisations linéaires et circulaires.....	23

Tableau 5.1 : Matrices d'erreurs (en %) pour les trois sites d'études, seuillage à -3 dB de la différence (en dB) en bande C entre une image d'hiver et une image en condition de neige sèche, polarisation linéaire	49
Tableau 5.2 : Matrice d'erreurs (en %) pour les trois sites d'études, seuillage de la différence (en dB) en bande C entre une image d'hiver et une image en condition de neige sèche, polarisation circulaire	55
Tableau 5.3 : Matrices d'erreurs (en %) pour les trois sites d'études, seuillage des rapports de bandes multipolarisations	57
Tableau 5.4 : Valeurs de la hauteur de socle pour les trois sites d'étude, en bande C, L et P	68
Tableau 5.5 : Matrices d'erreurs (%) pour les trois sites d'études, seuillage de la hauteur de socle en bande P.....	69
Tableau 5.6 : Matrices d'erreurs (%) pour les trois sites d'études, seuillage de la différence d'images (en dB) en bande C entre une image d'hiver et une image en condition de neige sèche, décomposition de Freeman-Durden....	74
Tableau 5.7 : Matrice d'erreurs (en %) pour les trois sites d'études, seuillage de la différence d'image (en dB) en bande C entre une image d'hiver (polarisation HH) et la puissance de diffusion de volume prise en condition de neige humide	97
Tableau 6.1 : Erreur maximale de détection de la neige humide , pour les différentes méthodes utilisées en fonction de la configuration du capteur et de la densité du couvert forestiers	99
Tableau 6.2 : Erreur minimale de détection de la neige humide , pour les différentes méthodes utilisées en fonction de la configuration du capteur et de la densité du couvert forestiers	100
Tableau 6.3 : Caractéristiques des capteurs ALOS-PALSAR, RADARSAT 2 et ASAR-ENVISAT	102
Tableau 6.4 : Comparaison de l'analyse des mécanismes de diffusion d'un couvert nival sous différents couverts forestiers à l'aide des techniques de décompositions de la cible.....	93

Liste des symboles

σ°_{pq}	coefficient de rétrodiffusion ou pq représente la polarisation
P_S	puissance de diffusion de surface de la décomposition de Freeman-Durden
P_V	puissance de diffusion de volume de la décomposition de Freeman-Durden
P_{DR}	puissance de diffusion de double réflexion de la décomposition de Freeman-Durden
H	entropie de la décomposition de Cloude-Pottier
A	anisotropie de la décomposition de Cloude-Pottier
α	angle α de la décomposition de Cloude-Pottier
ε	constante diélectrique
W	fraction volumique des inclusions d'eau
f	fréquence
δ_p	profondeur de pénétration
λ	longueur d'onde
X	coefficient d'atténuation (dB /cm)
[S]	matrice de diffusion
$[E^d]$	onde diffusée
$[E^i]$	onde incidente
[T]	matrice de cohérence
[C]	matrice de covariance
*	complexe conjugué
ψ	orientation (°)
χ	ellipticité (°)
b_1, b_2	demi-petit axe et demi-grand axe respectivement
ϕ	angle par rapport à l'horizontale
a	signal rétrodiffusion en polarisation HV
q	ratio d'ortho-polarisation de modèle de Oh
ks	hauteur rms normalisée à la longueur d'onde
R	coefficient de réflexion
$e^{2j\gamma}$	composante de phase
λ_i	valeurs propres

u_i vecteurs propres

SPAN puissance totale de rétrodiffusion

$\sigma^{\circ}_{\text{forêt}}$ rétrodiffusion du couvert forestier

$\sigma^{\circ}_{\text{neige}}$ rétrodiffusion du couvert de neige

$\sigma^{\circ}_{\text{int}}$ terme d'interaction entre le couvert nival et le couvert forestier

τ^2 transmissivité (aller-retour) de la canopée

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier ma directrice, la professeure Ramata Magagi, pour son support, ses conseils et ses remarques constructives. Je tiens également à remercier mon co-directeur, le professeur Hardy Granberg pour toutes les discussions qui m'ont permis de mieux comprendre le couvert nival.

J'aimerais aussi remercier le chercheur François Charbonneau du Centre canadien de télédétection avec qui j'ai eu la chance d'effectuer un stage de recherche et qui est devenu un ami. Je voudrais le remercier d'abord pour toutes les connaissances qu'il m'a transmises en polarimétrie radar, d'autre part pour m'avoir permis d'utiliser le logiciel PWS. Je voudrais aussi remercier mes collaborateurs du Centre canadien de télédétection, Sylvain Leblanc et Stéphane Chalifoux pour tout les dîners qu'on a passé ensemble à discuter.

Je tiens également à souligner l'apport financier du CRSNG (Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada). Également, je remercie les membres du projet CLPX (Cold-Land Processes Field Experiments), dont particulièrement mon co-directeur Hardy Granberg, pour rendre accessible toutes ces données sur le couvert nival.

Enfin, je remercie la patience de ma famille qui m'a épaulée tout au long de mes recherches.

1. Introduction

La neige, de par son rôle important en hydrologie et dans les autres sciences environnementales, est un paramètre clé pour l'étude des processus climatiques et pour la gestion de l'eau libérée lors de la fonte du couvert nival. Connaître les caractéristiques de la neige comme l'étendue de la couverture neigeuse, l'équivalent en eau de la neige (EEN) et l'état de la neige (humide, sèche) s'avère donc important pour bien définir les échanges entre la terre, les océans et l'atmosphère.

La caractérisation globale des étendues de neige par l'approche traditionnelle (la prise des données sur le terrain) est inadéquate puisque les stations d'observation sont souvent dispersées et distribuées inégalement sur les territoires. La télédétection permet une meilleure couverture spatiale et un meilleur suivi temporel des caractéristiques de la neige. Plusieurs études portant sur leurs estimations ont été réalisées à l'aide de différents capteurs opérant dans le visible, le proche infrarouge et en micro-ondes (passives et actives).

Les capteurs micro-onde ont l'avantage d'être indépendants de l'illumination solaire et aussi des paramètres météorologiques à des fréquences inférieures à 10 GHz, ce qui accroît les opportunités d'acquisition de mesures pour une étude exigeant de l'information multitemporelle. De plus, les capteurs radar (micro-ondes actives) offrent une meilleure résolution spatiale que les micro-ondes passives et pourraient ainsi permettre une caractérisation du couvert nival au niveau régional. Le projet Cold-Land Processes Field Experiments (CLPX) de la National Aeronautic and Space Administration (NASA) fournit une banque de données intéressante et variée sur la neige. Cette banque de données constituée de mesures de terrain et de données de télédétection est utilisée dans nos travaux pour le développement d'outils afin de mieux caractériser le couvert nival.

1.1 Problématique

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 des régions caractérisées par de faible couvert forestier (Koskinen *et al.*, 1997). Ces algorithmes reposent sur des données RSO mono-fréquence (bande C) et mono-polarisation (VV ou HH) mesurées par ERS-1, ERS-2 et RADARSAT-1. Ils sont basés sur la différence du coefficient de rétrodiffusion (σ^0 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 dont le sol est gelé. Le coefficient de rétrodiffusion 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 influence la valeur de σ^0 et par conséquent rend difficile la cartographie de la neige humide (Baghdadi *et al.*, 1997; Magagi *et al.*, 2002).

Des auteurs ont aussi montré que la rétrodiffusion totale d'un couvert forestier dépend de la fréquence et de la polarisation (Le Toan *et al.*, 1992; Fung, 1994). Dans une forêt 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). Les mesures de coefficient de rétrodiffusion en bande L et P (longueurs d'ondes élevées) interagissent différemment avec la végétation (contribution de volume, terme d'interaction). Plusieurs modèles permettent d'évaluer les différentes contributions de la rétrodiffusion d'un couvert végétal (Ulaby *et al.*, 1990; Chauhan *et al.*, 1991 ; Karam *et al.*, 1992, 1995). Ces modèles sont souvent difficiles à appliquer en raison de la complexité des caractéristiques du couvert végétal. Dobson *et al.* (1992) estiment que l'utilisation de la polarisation HV aux grandes longueurs d'onde permettra de caractériser plus efficacement la biomasse forestière. La combinaison de polarisations a également été utilisée afin d'établir des indices de végétation radar multipolarisés (Kim *and van Zyl*, 2004) sensible à la biomasse de la forêt. Les données totalement polarimétriques fournissent des informations supplémentaires sur le couvert forestier, notamment l'effet de l'architecture du couvert sur les mécanismes de rétrodiffusion. Durden *et al.* (1989) ont trouvé une bonne concordance entre des signatures polarimétriques en configuration co-polarisée et ortho-polarisée, une méthode graphique permettant de visualiser la réponse d'une cible comme une fonction des polarisations

incidentes et rétrodiffusées, obtenues expérimentalement et celles obtenues à l'aide d'un modèle de diffusion sur un couvert forestier. Des variations de température du sol et d'humidité du sol d'un couvert forestier occasionnent des variations de plusieurs dB des mesures de rétrodiffusion (Nyström *et al.*, 1994, Moghaddam *et al.*, 1993). La présence de neige ainsi que ses caractéristiques (humidité, épaisseur, densité, granulométrie, présence de glace) influencent aussi la rétrodiffusion du couvert forestier (Pulliainen *et al.*, 2001, Magagi *et al.*, 2002).

Les capteurs radar multifréquences et polarimétriques ont permis de développer de nouvelles techniques permettant de caractériser les surfaces terrestres. Des auteurs ont déjà démontré l'utilité de ces données radar dans l'analyse d'un couvert nival. Une analyse multipolarisation et multifréquence (bandes C et L) a été réalisée par Holden *et al.* (1998) afin de discriminer la neige humide de la neige sèche. Les informations utilisées dans chaque bande sont les quatre polarisations (HH, VV, HV, VH), le rapport de polarisation croisées (VH / VV , HV / HH), le rapport de co-polarisation (HH / VV) ainsi que des rapports de bandes (bande L par bande C) pour chaque polarisation. Sokol *et al.* (2003) ont analysé les signatures polarimétriques co-polarisées ainsi que la hauteur de socle co-polarisée en bande C afin de décrire les caractéristiques d'un couvert nival. Leur résultats montre que la forme générale des signatures polarimétriques ainsi que la hauteur de socle co-polarisées en bande C varie en fonction de l'état de la neige. Le potentiel des données RSO polarimétriques multifréquences (bandes C et L) à cartographier la neige sèche a également été étudié (Ferro-Famil *et al.*, 1999). Il est également possible d'exprimer la rétrodiffusion observée en fonction des contributions des différents types de diffuseurs avec l'approche par décomposition des cibles. Cette approche est utile pour l'interprétation des différents mécanismes de diffusion d'un couvert nival (Prask *et al.*, 1998). Les décompositions de Freeman-Durden et de Cloude-Pottier en bande C ont été utilisées pour étudier la cryosphère (Bernier *et al.*, 2005; Ferro-Famil *et al.*, 1999; Prask *et al.*, 1998). La décomposition de Freeman-Durden exprime la matrice de covariance à l'aide de trois paramètres décrivant la contribution en puissance de la diffusion surfacique (P_S), de la diffusion à double réflexion (P_D) et de la diffusion volumique (P_V) (Freeman *and* Durden, 1998). Quant à la décomposition de Cloude-Pottier, elle utilise les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice de cohérence pour calculer trois paramètres : l'entropie

polarimétrique (H), l'angle α et l'anisotropie polarimétrique (A). L'entropie polarimétrique mesure le caractère aléatoire de la diffusion (nombre de mécanisme de diffusion). L'angle α représente le mécanisme de diffusion moyen ou dominant. Enfin, l'anisotropie polarimétrique indique l'importance du 2^e mécanisme de rétrodiffusion par rapport au 3^e mécanisme de rétrodiffusion (Cloude *and* Pottier, 1997).

L'aspect innovateur de cette recherche, est l'utilisation de données multifréquences, multipolarisations et polarimétriques dans l'analyse d'un couvert nival sous différents couverts forestiers. Comme mentionné ci-haut, il est possible, à l'aide de données polarimétriques, d'identifier les principaux mécanismes de diffusion d'un couvert nival ainsi que d'un couvert forestier. L'importance de ces différents mécanismes de diffusion dépend de la fréquence, de l'état de la neige et des caractéristiques du couvert forestier.

1.2 Objectifs

L'objectif général des travaux de recherche est d'évaluer l'apport de la polarimétrie radar multifréquence pour l'analyse d'un couvert nival sous différents couverts forestiers. De cet objectif découle trois objectifs plus spécifiques :

1. Évaluer l'apport des techniques polarimétriques multifréquences pour discriminer la neige sèche de la neige humide pour trois densités de conifères (faible, éparse, dense)
2. Évaluer l'apport des techniques polarimétriques multifréquences pour évaluer l'effet du couvert forestier sur le signal radar des couverts nivaux
3. Apporter une correction de l'effet du couvert forestier sur le signal radar des couverts nivaux

1.3 Hypothèses

L'hypothèse générale sous-entend que les données RSO polarimétriques, multipolarisations et multifréquences permettront une meilleure caractérisation du couvert nival sous différents couverts forestiers.

1. La technique classique, développé par Rott et Nagler (1995), permet une bonne détection de la neige humide pour une région de faible végétation, mais présente des erreurs lorsqu'il y a présence d'un couvert forestier.
2. La forme des signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée en bande C, L et P varie en fonction de l'état de la neige et de la densité et du type de couvert forestier.
3. L'identification des mécanismes de diffusion présente lors de la rétrodiffusion d'un couvert nival et forestier à l'aide des techniques de décomposition de la cible permet de détecter la neige humide sous différents couverts forestiers.
4. L'effet du couvert forestier sur le signal du couvert nival pourra être évalué à l'aide d'indice radar multipolarisation, ainsi qu'avec le paramètre de diffusion de volume de la décomposition de Freeman-Durden.
5. En négligeant le terme d'interaction, une correction partielle de l'effet du couvert forestier peut être réalisée en effectuant une différence d'image (en dB) entre σ° et la puissance de diffusion de volume de la décomposition de Freeman-Durden.

2. Zone d'étude et données expérimentales

Les résultats de cette étude proviennent de l'analyse de données acquises en février, mars et septembre 2002 et mars 2003 lors des campagnes de mesure du projet CLPX. Nous disposons de mesures de rétrodiffusion acquises par le capteur aéroporté AIRSAR-POLSAR, des caractéristiques du couvert nival et du couvert forestier, des données décrivant les conditions météorologiques, un modèle numérique d'élévation ainsi qu'un atlas numérique.

2.1 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude correspond à celle définie dans le cadre du projet CLPX. Elle est située dans le nord du Colorado et le sud du Wyoming, plus précisément, entre les latitudes 39.5° et 41° nord et les longitudes 105° et 107.5° ouest (figure 2.1).

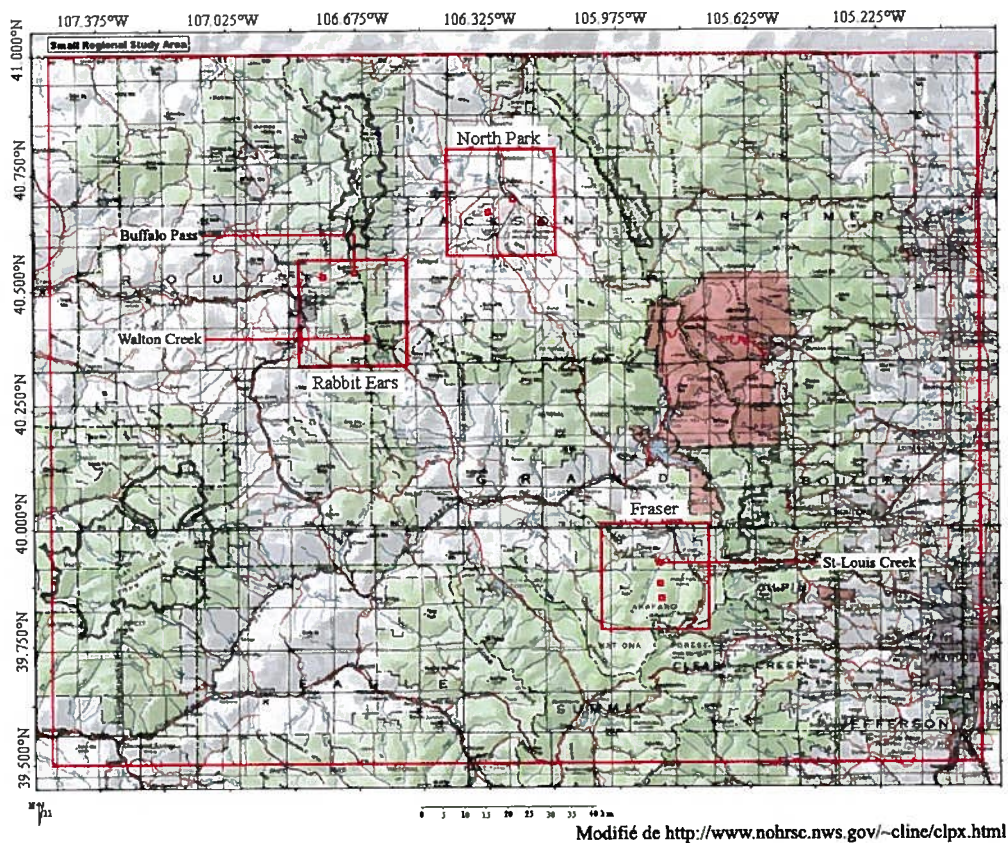


Figure 2.1 : Zone d'étude

Les données utilisées proviennent plus particulièrement, des sites d'étude *Rabbit Ears, Walton Creek* (figure 2.2a), *Rabbit Ears, Buffalo Pass* (figure 2.2b) et *Fraser, St-Louis Creek* (figure 2.2c). Ces trois sites d'études d'une superficie de 1 km x 1 km chacun, ont été choisis en fonction des caractéristiques du couvert nival et du couvert forestier.

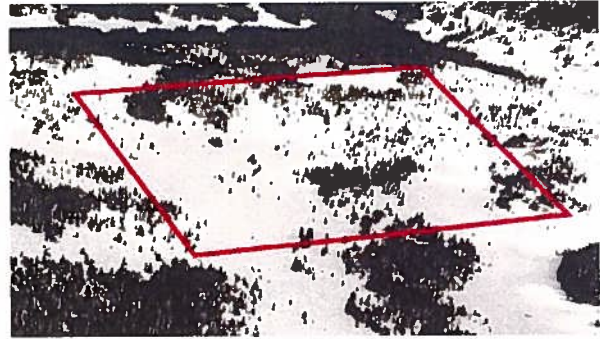
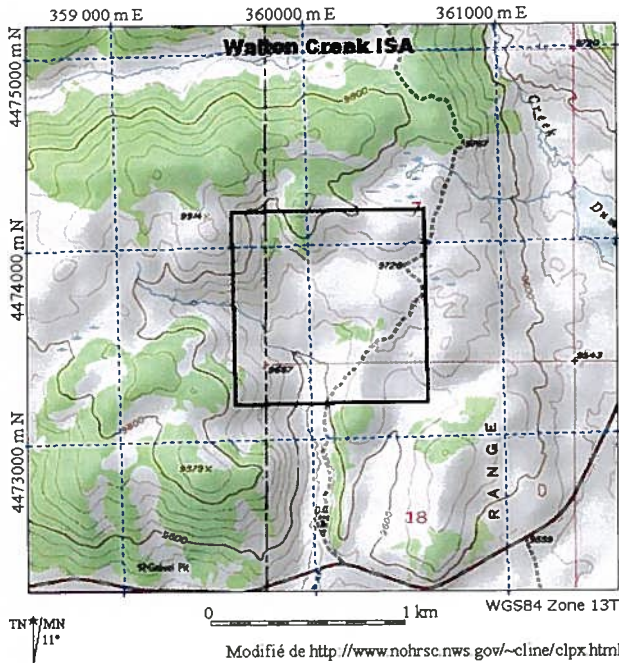


Figure 2.2a : Site d'étude Rabbit Ears, Walton Creek

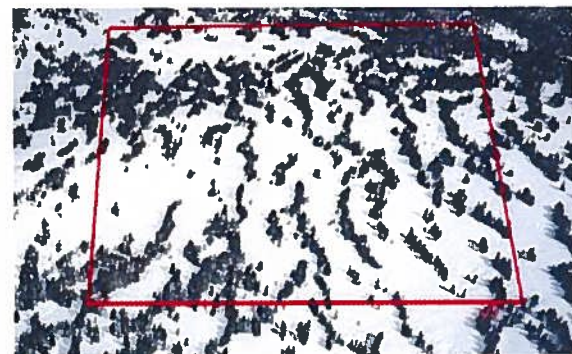
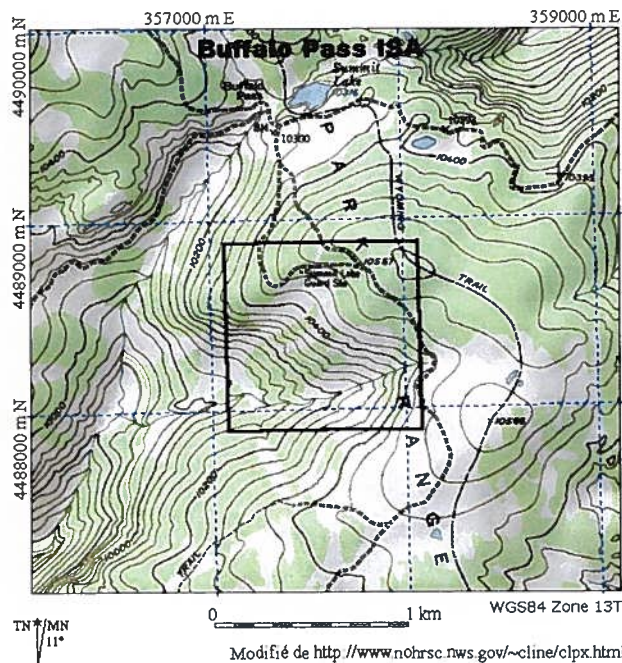


Figure 2.2b : Site d'étude Rabbit Ears, Buffalo Pass

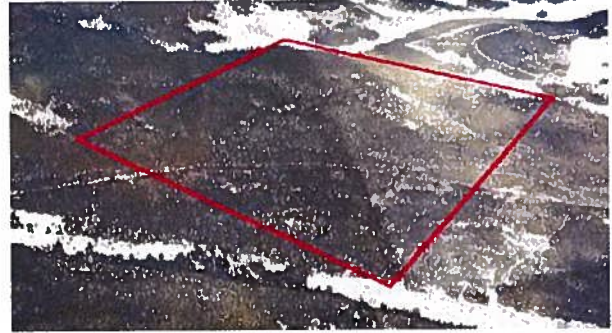
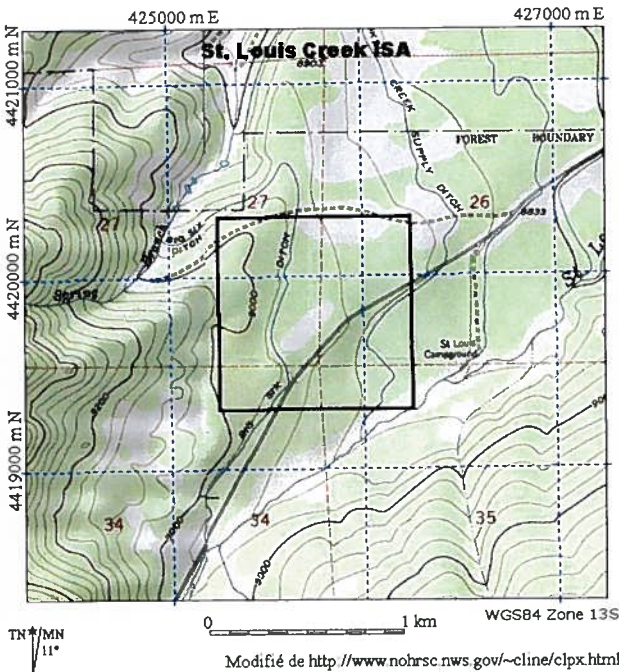


Figure 2.2c : Site d'étude Fraser, St-Louis Creek

2.2 Description des données expérimentales

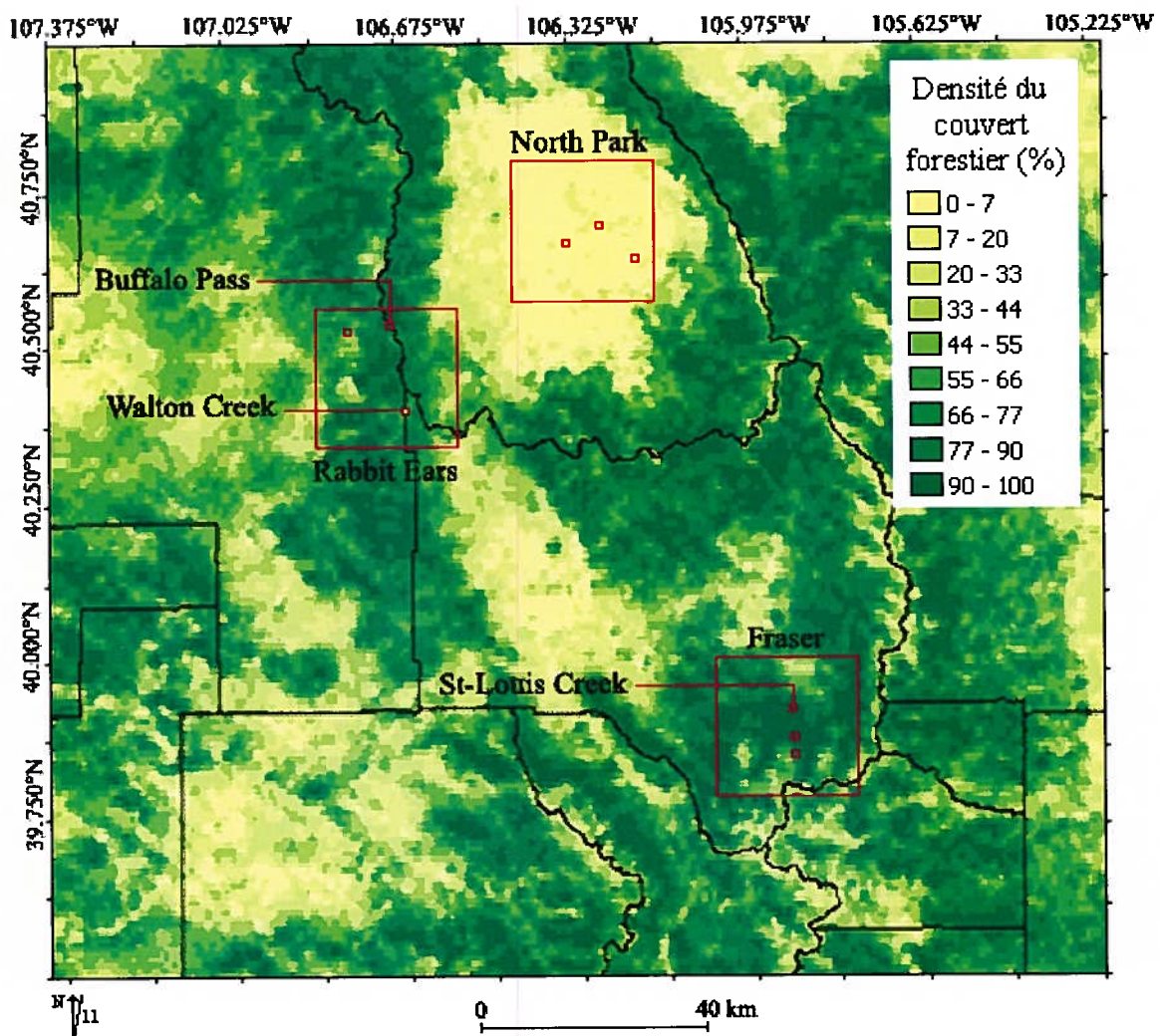
Elle porte sur les données de terrain relatives aux couverts nival et forestier ainsi que les données radar aéroporté qui ont été utilisées dans le cadre de cette étude.

2.2.1 Données sur le couvert forestier

Chacun des trois sites d'étude est caractérisé par un type de couvert forestier relativement homogène. Des données sur la densité et le type du couvert forestier acquises en 1993 sont disponibles par *United States Department of Agriculture (USDA)*. La figure 2.3 et la figure 2.4 présentent, respectivement, la densité et le type de couvert forestier pour l'ensemble de la zone d'étude CLPX. Le site d'étude *Walton Creek* est pratiquement nu (faible végétation), le site d'étude *Buffalo Pass* est caractérisé par une forêt épaisse de conifères et le site d'étude *St-Louis Creek* est caractérisé par une végétation dense de conifères. Le tableau 2.1 résume les caractéristiques du couvert forestier de ces trois sites d'étude. La figure 2.5 montre la structure du type de couvert forestier pour le sapin et l'épinette présents sur le site Buffalo Pass et pour le pin tordu latifolié présent sur le site St-Louis Creek.

Tableau 2.1 : Caractéristiques du couvert forestier pour les trois sites d'étude

Sites d'étude	Densité du couvert forestier (%)	Type de couvert forestier
Walton Creek	7 - 20	Tremble, bouleau, pignon, genévrier
Buffalo Pass	44 - 90	Sapin, épinette
St-Louis Creek	90 - 100	Pin tordu latifolié

**Figure 2.3 : Densité du couvert forestier pour la zone d'étude (USDA)**

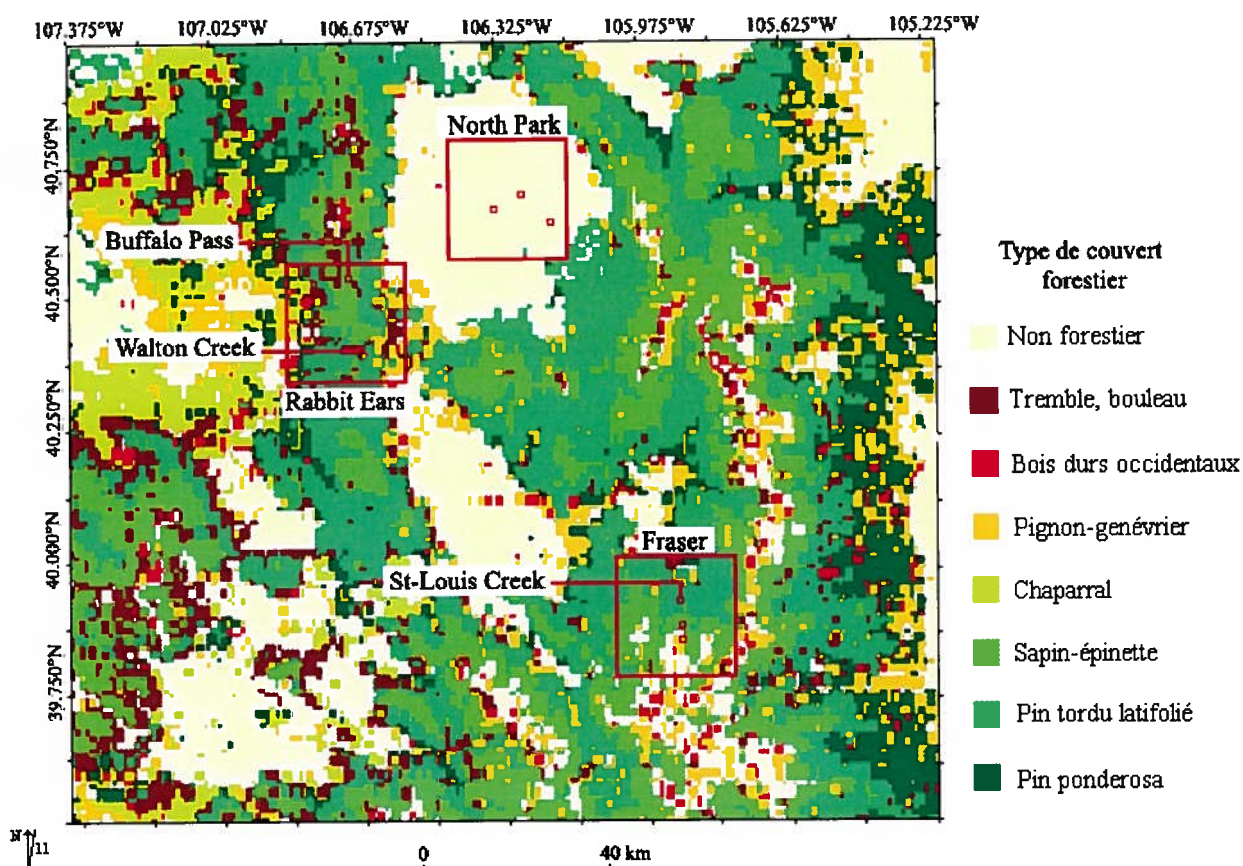
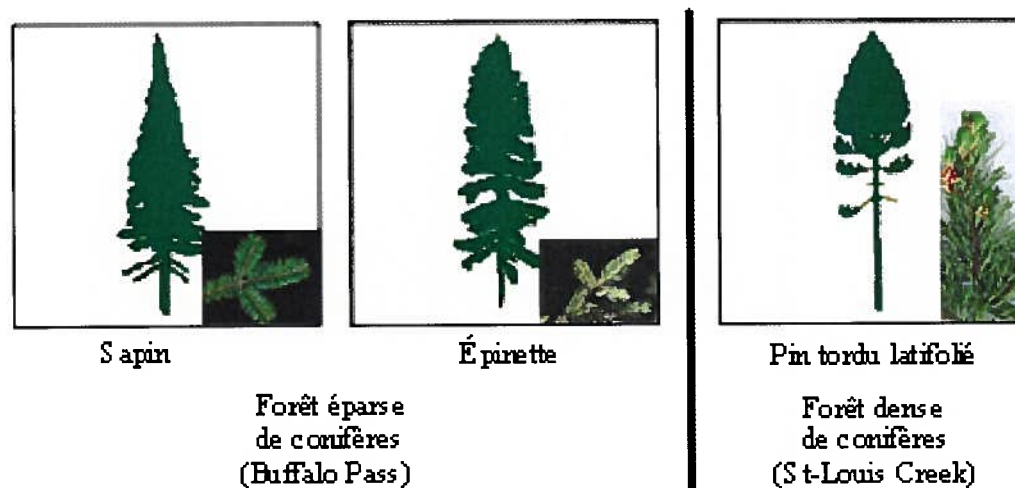


Figure 2.4 : Type de couvert forestier pour la zone d'étude (USDA)



Inspiré de <http://www.dorntar.com/arbre>

Figure 2.5 : Structure du type de couverture forestière pour le site de forêt épars e de conifères (Buffalo Pass) et pour le site de forêt dense de conifères (St-Louis Creek)

2.2.2 Données sur le couvert nival

Sur chacun des trois sites seize puits à neige ont été effectués afin de mesurer les caractéristiques du couvert nival à savoir l'épaisseur de neige, sa densité, son équivalent en eau et sa température. Ces mesures ont été faites durant les trois campagnes hivernales (février 2002, mars 2002 et mars 2003) dont les dates sont indiquées dans le tableau 2.2. Ainsi, les données de 32 puits à neige par campagne de mesures sont utilisées dans cette recherche. Le tableau 2.2 renseigne également sur les moyennes et les limites inférieures et supérieures (extremums) des caractéristiques du couvert nival mesurées sur chaque site. Les données de profil du couvert de neige (densité, température et taille des grains de neige) n'étaient pas disponibles au moment de la recherche.

Tableau 2.2 : Données sur le couvert nival des trois sites d'étude

Date	Épaisseur de neige (cm)		Densité (kg/m ³)		Équivalent en eau (mm)	
	Moyenne	Extremum	Moyenne	Extremum	Moyenne	Extremum
Walton Creek						
23-24 février 2002	140	104 à 181	296	269 à 332	411	296 à 528
30 mars 2002	149	94 à 219	344	308 à 374	515	296 à 820
30 mars 2003	200	119 à 274	329	293 à 367	662	376 à 994
Buffalo Pass						
24 février 2002	188	127 à 268	307	282 à 356	576	380 à 719
30 mars 2002	200	163 à 244	364	338 à 380	730	568 à 874
30 mars 2003	305	245 à 377	332	316 à 364	1037	849 à 1199
St-Louis Creek						
20 février 2002	68	56 à 85	187	179 à 258	126	101 à 167
26 mars 2003	105	89 à 134	285	264 à 316	297	243 à 414

2.2.3 Données radar aéroporté

Des mesures du coefficient de rétrodiffusion ont été acquises en février 2002, septembre 2002, février 2003 et mars 2003 à l'aide du capteur aéroporté AIRSAR-POLSAR. Le tableau 2.3 indique les dates d'acquisition des images pour chaque site.

Tableau 2.3 : Dates d'acquisition des images AIRSAR-POLSAR pour chaque site

Walton Creek	St-Louis Creek	Buffalo Pass
19 février 2002	19 février 2002	23 février 2002
17 septembre 2002	23 février 2002	17 septembre 2002
25 mars 2002	17 septembre 2002	25 mars 2002
30 mars 2003	30 mars 2003	25 mars 2003
		30 mars 2003

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-POLSAR émet à trois fréquences : 0,43 GHz (bande P), 1,26 GHz (bande L) et 5,31 GHz (bande C). Ce système totalement polarimétrique dans toutes les bandes peut collecter des mesures simultanées dans les trois fréquences. L'angle de visée des images utilisées, dans cette étude, est de 55° et la résolution en azimut est de 9.26 m et de 3.3 m en portée. Les images sont compressées dans une matrice de Stoke multi-visée de 9 visées. L'erreur absolue sur le coefficient de rétrodiffusion est de 3 dB. L'erreur relative entre les fréquences pour une même polarisation est de 1.5 dB et, de 0.5 dB entre les polarisations pour une même fréquence. L'erreur de la phase est de 10°. Le bruit du capteur est de -35 dB en bande C et de -45 dB pour les bandes L et P (National Snow and Ice Data Center, 2006). Les images en bande L du 19 février semblent présenter des erreurs dans la phase. Ces images ne seront donc pas utilisées lorsque la phase interviendra dans la méthodologie. Des images du capteur AIRSAR-TOPSAR géoréférencées acquises en même temps que les images AIRSAR-POLSAR sont également utilisées pour identifier les sites d'études sur les images AIRSAR-POLSAR.

2.2.4 Données météorologiques

Des données météorologiques de température, précipitation et radiation solaire sont disponibles pour la campagne de terrain effectuée en mars 2003. Le modèle météorologique NASA Land Data Assimilation Systems (LDAS) est utilisé afin d'obtenir ces informations pour les campagnes de février et mars 2002. Les précipitations et la radiation solaire sont basées sur des observations alors que la température est dérivée du National Centers for

Environmental Prediction's (NCEP) Eta Data Assimilation System (EDAS). Les données LDAS sont distribuées selon une grille de $1/8^\circ$ en latitude et en longitude et sont disponibles pour chaque heure de janvier 2001 à juin 2003. Elles seront utilisées conjointement aux données météorologiques de terrain effectuées en mars 2003 pour évaluer les conditions météorologiques au moment de l'acquisition. Les figures 2.6, 2.7 et 2.8 montrent les variations de température, de précipitation et de radiation solaire pour chaque site et chaque campagne. Les points rouges représentent les acquisitions des images AIRSAR-POLSAR et les lignes bleues représentent la période de prise de mesures sur le terrain.

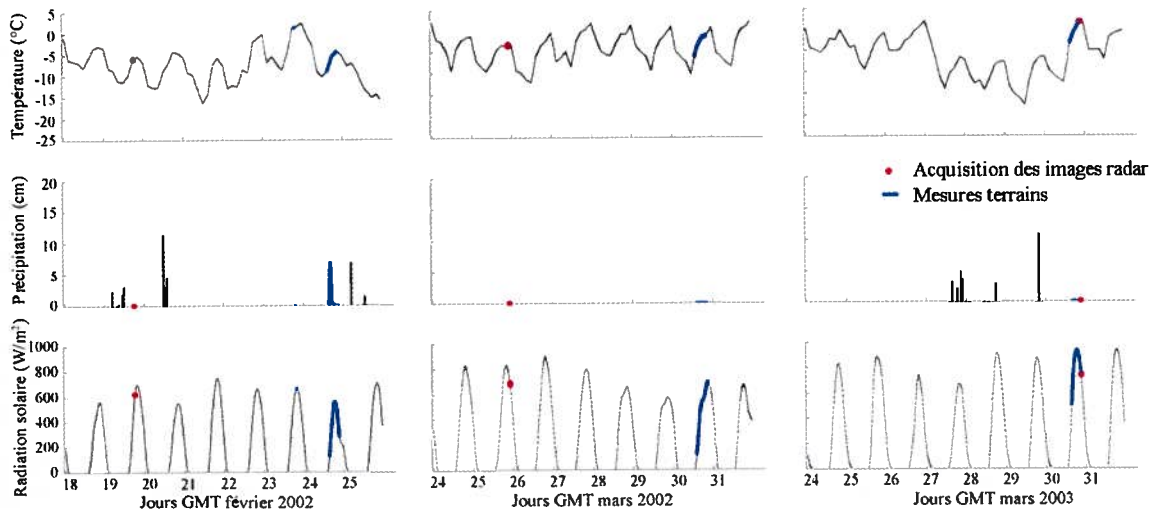


Figure 2.6: Conditions météorologiques sur le site Walton Creek

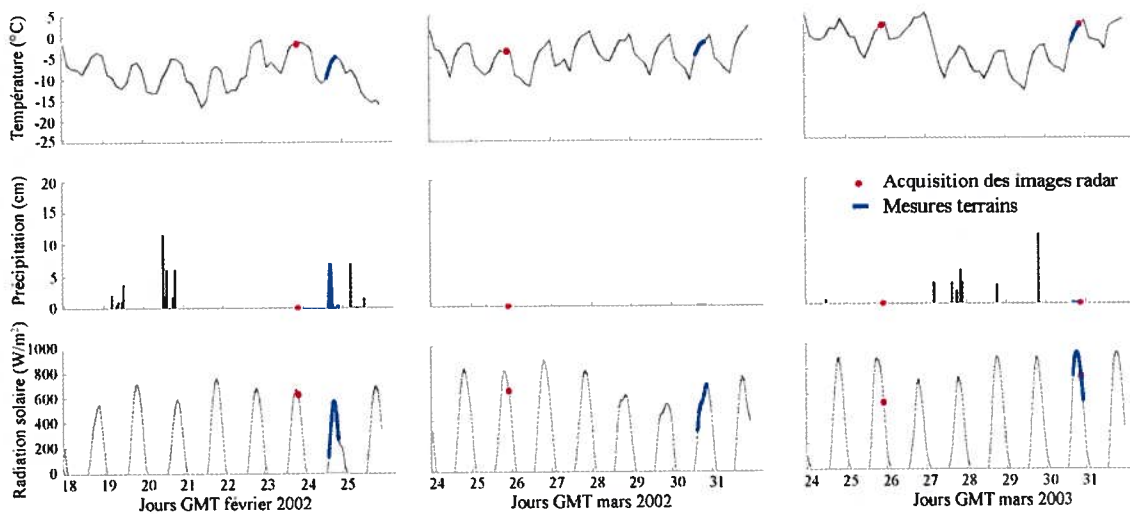


Figure 2.7 : Conditions météorologiques sur le site Buffalo Creek

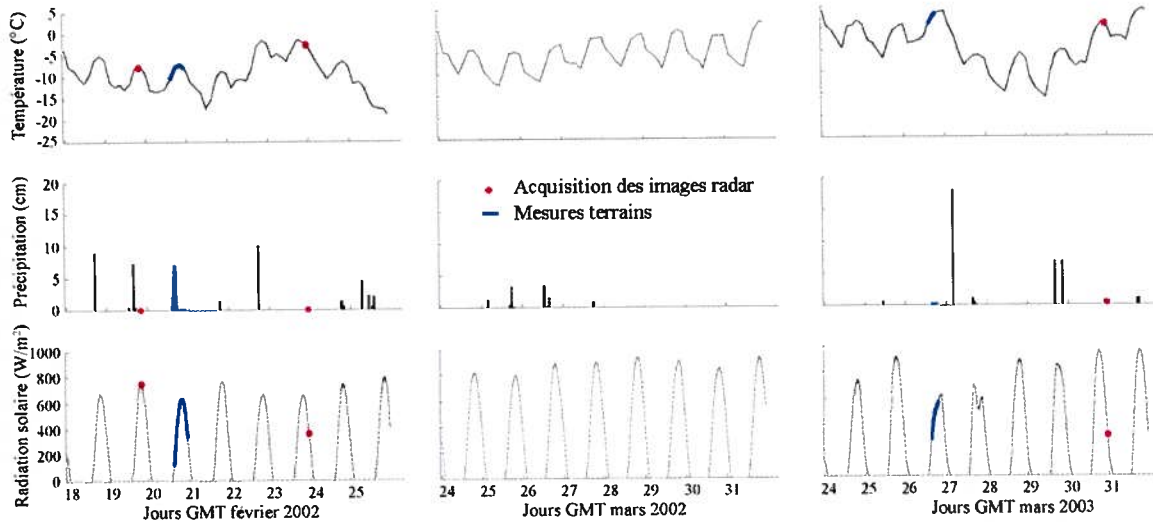


Figure 2.8 : Conditions météorologiques sur le site St-Louis Creek

2.2.5 Données auxiliaires

Le projet CLPX comprend un Atlas numérique sous forme d'un système d'information géographique. Les données de l'atlas numérique utilisées sont les suivantes :

- modèle numérique d'élévation (USGS) ;
- utilisation du sol (USGS, EPA);
- routes (Colorado DOT) ;
- villes;
- frontières;
- hydrographie (Rivières et lacs) (USGS) ;
- puits à neige.

Le modèle numérique d'élévation permet de calculer la dénivellation de chaque site d'étude. Cette dénivellation est inférieure à 5° pour chacun des sites d'étude. Les données d'utilisation du sol, de route, villes, frontières et hydrographie sont utilisées pour aider à l'identification des sites d'études sur les images radar. Les données sous forme de système d'information géographique des puits à neige permettent de les localiser sur les images radar.

3. Théorie

3.1 Amplitude du signal radar

3.1.1. Rétrodiffusion d'un couvert nival

La rétrodiffusion d'un couvert nival comprend des contributions (figure 3.1).

- 1) de la diffusion de surface provenant de l'interface air-neige
- 2) de la diffusion de surface provenant de l'interface neige-sol,
- 3) de la diffusion de volume provenant de la couche de neige
- 4) du terme d'interaction entre la diffusion de volume et les différentes couches de neige

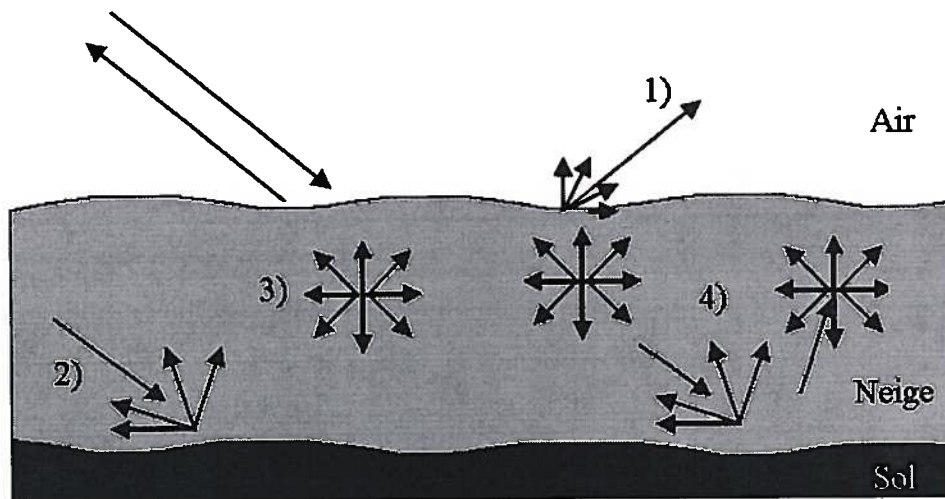


Figure 3.1 : Différentes contributions de la rétrodiffusion d'un couvert nival

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, stratigraphie, etc.) (Ulaby *et al.*, 1986).

La neige est considérée comme un mélange de glace, d'air et d'eau, de constante diélectrique (ϵ). Pour la détermination de ϵ , des modèles de mélange théorique ont été développés (Ulaby *et al.*, 1986). Cependant, pour la neige humide, nous nous référons à l'expression simplifiée de ces modèles de la constante diélectrique établie par Mätzler (1987):

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \frac{23W}{1 - j\frac{f}{f_0}} \quad (\text{équation 3.1})$$

où ε_s est la constante diélectrique de la neige sèche, W ($\ll 1$) 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 δ_p . Elle est déduite à partir de la partie réelle (ε') et de la partie imaginaire (ε'') de la constante diélectrique complexe (ε). δ_p représente la profondeur à laquelle l'énergie d'une onde se propageant dans un milieu est atténuée d'un facteur $1/e$ (4.3 dB). Si le rapport $\varepsilon'' / \varepsilon'$ est très inférieur à 1, ce qui est le cas pour la neige, δ_p est donnée par l'équation 3.2 (Ulaby *et al.*, 1982)

$$\delta_p \approx \frac{\lambda \sqrt{\varepsilon'}}{2\pi \varepsilon''} \quad (\text{équation 3.2})$$

où λ est la longueur d'onde.

L'atténuation de l'onde dans le couvert de neige est introduite à travers δ_p . On définit le coefficient d'atténuation X (dB / cm) par l'équation 3.3 (Ulaby *et al.*, 1982):

$$X \text{ (dB/cm)} = \frac{8.68}{2\delta_p} \quad (\text{équation 3.3})$$

Pour un couvert de neige de densité moyenne de 300 kg / m^3 à une température de $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, le comportement de χ en fonction de la teneur en eau de surface est représenté sur la figure 3.2 pour les fréquences 0.43 GHz (bande P), 1.2 GHz (bande L) et, 5.3 GHz (bande C), fréquences utilisées dans cette recherche.

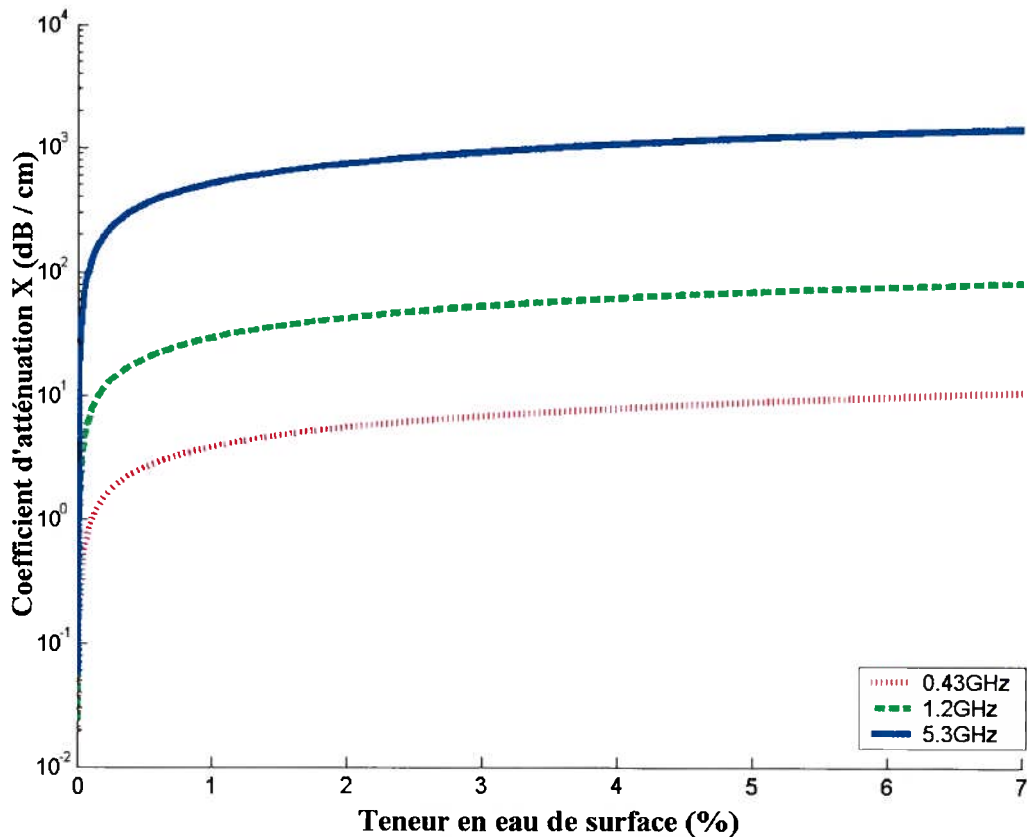


Figure 3.2 : Coefficient d'atténuation en fonction de la teneur en eau de surface pour les fréquences 5,3 GHz, 1,2 GHz et 0,43 GHz

Ainsi, pour un couvert nival sec, les micro-ondes pénètrent facilement la couche de neige peu importe la fréquence. La rétrodiffusion est alors principalement fonction de la rétrodiffusion de surface du sol sous-jacent et de la diffusion de volume de la couche de neige (Ulaby *et al.*, 1982).

Pour un couvert nival humide, la situation n'est pas la même selon la fréquence et le taux d'humidité puisque la profondeur de pénétration du signal radar dépend de ces deux paramètres (Mätzler, 1987). Pour une fréquence de 5.3 GHz (bande C), le signal ne pénètre pas la couche de neige et se résume principalement à de la rétrodiffusion de surface air-neige. Le signal ne dépendra ainsi que de la rugosité et du taux d'humidité de cette interface air-neige (Ulaby *et al.*, 1982). Lorsque la fréquence diminue, la pénétration du signal dans la couche de

neige augmente (Ulaby *et al.*, 1982). Pour une fréquence de 1.2 GHz (bande L) ou de 0.43 GHz (bande P), on obtient une contribution de la rétrodiffusion de surface air-neige ainsi qu'une contribution du volume de neige et possiblement une contribution de la surface neige-sol pour les couverts de neige de faible épaisseur. Ainsi, la bande C fournit un meilleur contraste entre la neige sèche et la neige humide.

3.1.2 Rétrodiffusion d'un couvert forestier

La rétrodiffusion d'un couvert forestier comprend des contributions (figure 3.3) :

- 1) de la diffusion de volume (rétrodiffusion directe des branches et des troncs),
- 2) de la diffusion de surface (rétrodiffusion directe du sol)
- 3) de la diffusion de double réflexion (interactions entre les branches et les troncs, les branches et le sol, et entre les troncs et le sol).

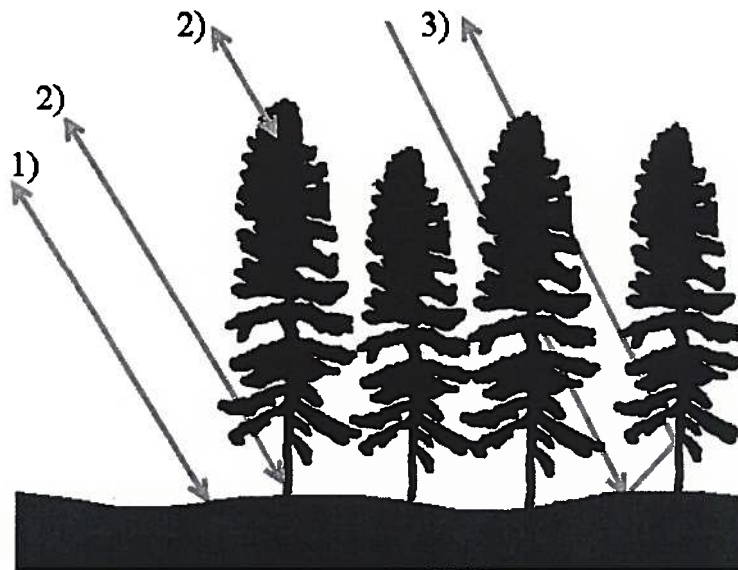
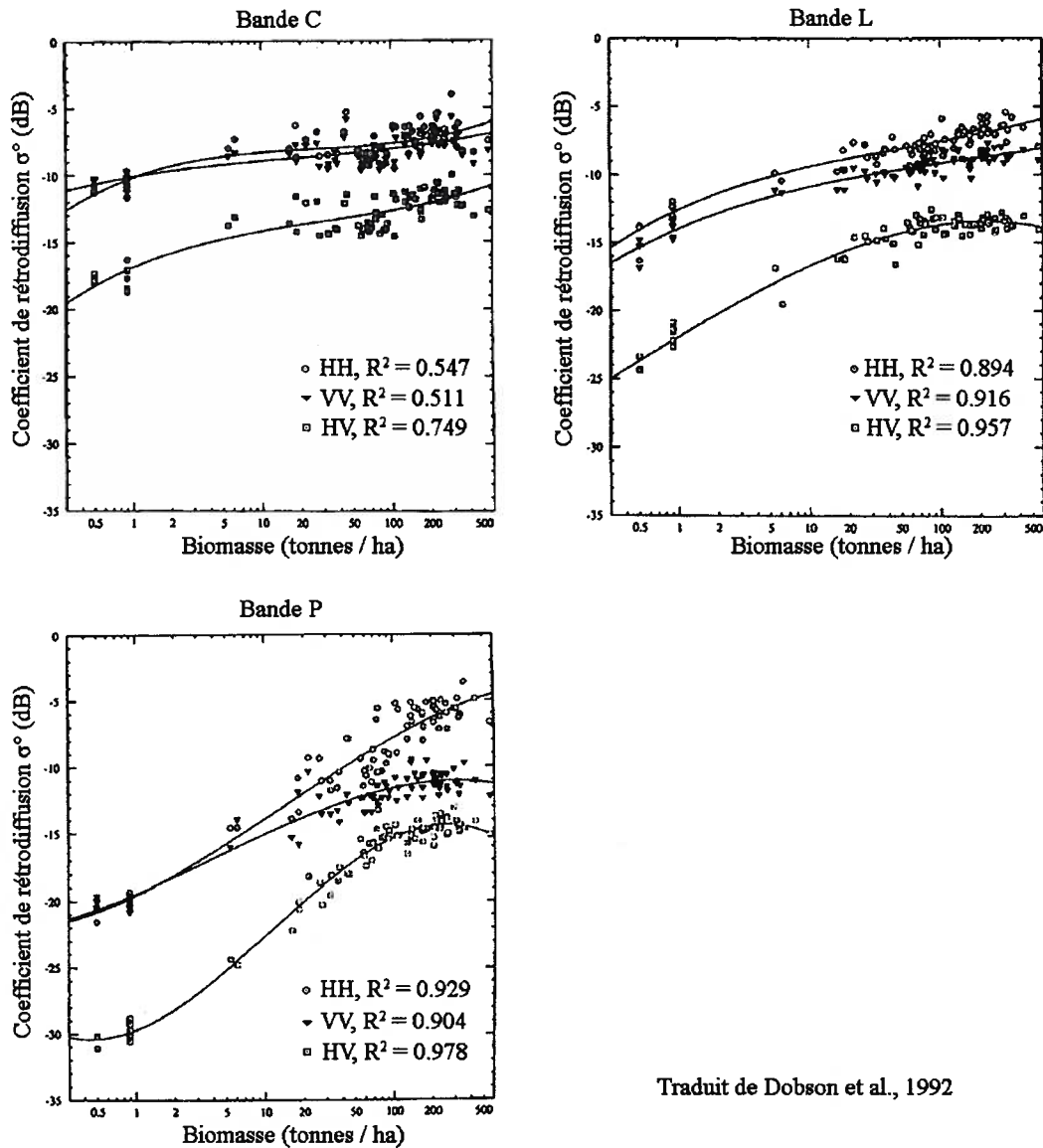


Figure 3.3 : Différentes contributions de la rétrodiffusion d'un couvert forestier

L'importance de ces contributions dépend de la nature du couvert forestier (espèce forestière, densité, etc.) et des paramètres du capteur (angle d'incidence, fréquence, polarisation) (Fung, 1994).

Le signal radar en bande C interagit surtout avec la partie supérieure du couvert forestier. Les micro-ondes à basses fréquences, comme la bande P et L pénètrent mieux le couvert forestier

et interagissent davantage avec ces éléments (branches, troncs) et le sol (Fung, 1994). Le Toan *et al.* (1992) et Dobson *et al.* (1992) ont étudié la rétrodiffusion d'un couvert forestier de conifères en fonction de sa biomasse pour différentes fréquences et polarisations. La figure 3.4 présente des mesures de coefficients de rétrodiffusion en fonction de la biomasse pour les bandes C, L et P polarisations HH, VV et HV effectuées par Dobson *et al.* (1992) pour des angles d'incidences entre 40° et 50° .



Traduit de Dobson *et al.*, 1992

Figure 3.4 : Rétrodiffusion d'un couvert forestier en fonction de la biomasse pour les bandes C, L et P, polarisation HH, VV et HV, $40^\circ < \theta < 50^\circ$

On observe une saturation du signal avec l'augmentation de la biomasse pour la bande C. Les bandes L et P présentent plus de variations en fonction de la biomasse et sont donc plus appropriées pour caractériser le couvert forestier.

La grandeur, la forme et l'orientation des différents éléments du couvert forestier (branches, troncs, feuilles, aiguilles) affectent la rétrodiffusion en fonction de la polarisation (Boerner *et al.*, 1998). Plusieurs éléments d'un couvert forestier peuvent être modélisés comme un cylindre (branches, troncs, aiguilles). La figure 3.5 montre quelques exemples simplifiés de la rétrodiffusion relative des polarisations HH, VV et HV en fonction de l'orientation d'un cylindre.

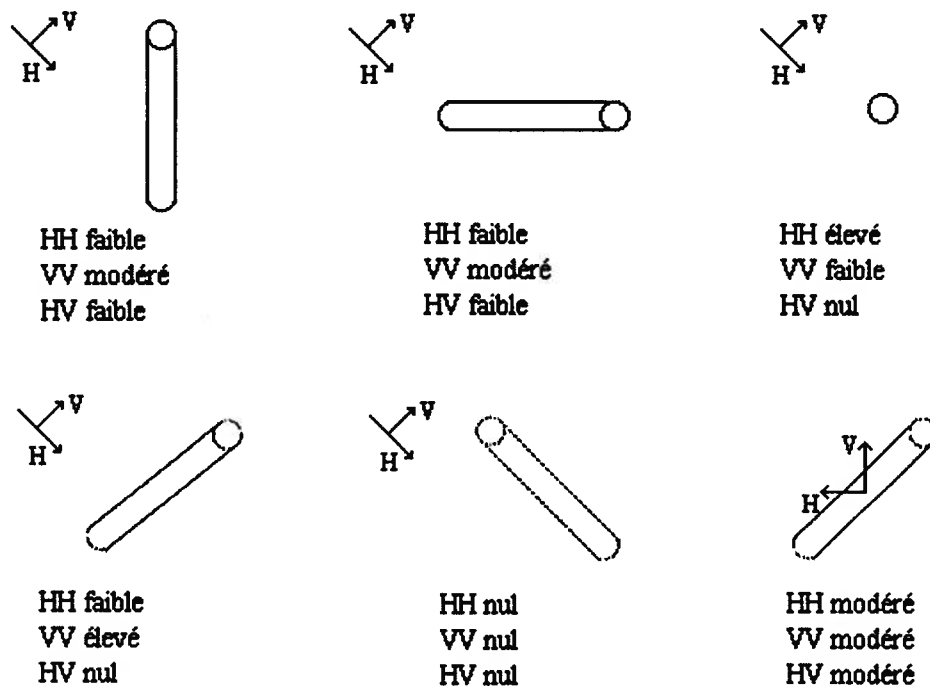


Figure 3.5 : Rétrodiffusion relative des polarisations HH, VV et HV en fonction de l'orientation d'un cylindre (Boerner *et al.*, 1998)

Ainsi, dépendamment de l'architecture du couvert, le signal rétrodiffusé dépendra de la polarisation. L'écart de rétrodiffusion en polarisation HH et VV causé par l'architecture du couvert forestier est aussi fonction de l'angle d'incidence du capteur. Par ailleurs, plus l'architecture du couvert forestier est aléatoire et dense, plus la rétrodiffusion en polarisation HH et VV sera similaire.

3.2 Polarimétrie

Un système d'imagerie radar fonctionnant avec une simple, et seule, polarisation autant pour la transmission que pour la réception du signal micro-onde perd une partie de l'information. Dans cette configuration, un seul coefficient de rétrodiffusion est mesuré. Ainsi, l'onde rétrodiffusée, une quantité vectorielle, est mesurée comme une quantité scalaire et toutes les informations supplémentaires sur la surface contenue dans les propriétés polarimétriques du signal réfléchi sont perdues. Pour s'assurer que toute l'information des ondes incidente et rétrodiffusée sont retenues, la polarisation de l'onde rétrodiffusée doit être mesurée dans un processus vectoriel (Zekber *et al.*, 1987; van Zyl *et al.*, 1987; Evans *et al.*, 1988).

La signature polarimétrique d'un diffuseur peut être calculée si on mesure directement toute sa matrice de diffusion. Cette matrice de diffusion $[S]$ relie les composantes transversales du champ électrique de l'onde diffusée $[E^d]$ aux composantes transversales de l'onde incidente $[E^i]$.

$$\begin{bmatrix} E_H^d \\ E_V^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^i \\ E_V^i \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.4})$$

L'application de la matrice de diffusion à une antenne a été introduite par Sinclair (1950) dans ses travaux sur la réception et la transmission des ondes polarisées elliptiquement. Par la suite, Kennaugh (1951) a relié la matrice de diffusion à la télédétection radar en étudiant les caractéristiques des échos radar polarisés. Si la matrice de diffusion est connue, on peut calculer la réponse de la cible à n'importe quelle combinaison de polarisation du signal émis et reçu; c'est ce que l'on appelle la synthèse de polarisation.

La matrice de diffusion peut être convertie sous différentes représentations. Dans le domaine des puissances, nous citerons la matrice de covariance et la matrice de cohérence décrites ci-dessous.

Si l'on pose l'hypothèse de réciprocité, $S_{HV} = S_{VH}$, la matrice de covariance $[C]$ est donnée par :

$$[C] = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2 \rangle & \langle \sqrt{2}S_{HH}S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle \\ \langle \sqrt{2}S_{HV}S_{HH}^* \rangle & \langle 2|S_{HV}|^2 \rangle & \langle \sqrt{2}S_{HV}S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV}S_{HH}^* \rangle & \langle \sqrt{2}S_{VV}S_{HV}^* \rangle & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.5})$$

3.5)

où «*» dénote le nombre complexe conjugué. La matrice de covariance est symétrique conjuguée.

Quant à la matrice de cohérence [T], formé à partir du vecteur de spin de Pauli, elle est donnée par :

$$[T] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2 + 2\Re(S_{HH}S_{VV}^*) + |S_{VV}|^2 \rangle & \langle |S_{HH}|^2 - 2j\Im(S_{HH}S_{VV}^*) - |S_{VV}|^2 \rangle & \langle 2S_{HH}S_{HV}^* + 2S_{VV}S_{HV}^* \rangle \\ \langle |S_{HH}|^2 + 2j\Im(S_{HH}S_{VV}^*) - |S_{VV}|^2 \rangle & \langle |S_{HH}|^2 - 2\Re(S_{HH}S_{VV}^*) + |S_{VV}|^2 \rangle & \langle 2S_{HH}S_{HV}^* - 2S_{VV}S_{HV}^* \rangle \\ \langle 2S_{HV}S_{HH}^* + 2S_{HV}S_{VV}^* \rangle & \langle 2S_{HV}S_{HH}^* - 2S_{HV}S_{VV}^* \rangle & \langle 4|S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.6})$$

où « \Im » dénote la partie imaginaire et « \Re » la partie réelle du nombre complexe.

Les matrices de covariance et de cohérence ont les mêmes valeurs propres, réelles. La somme des éléments diagonaux des deux matrices, qui représente la puissance totale, est également identique. Ces deux matrices sont utilisées pour la décomposition de Freeman-Durden et la décomposition de Cloude-Pottier respectivement.

La polarisation d'une onde peut être décrite à l'aide de l'orientation (ψ) et de l'ellipticité (χ). En observant l'onde polarisée dans la direction de sa propagation, l'extrémité du vecteur du champ électrique trace une courbe dont la forme est une ellipse (figure 3.6).

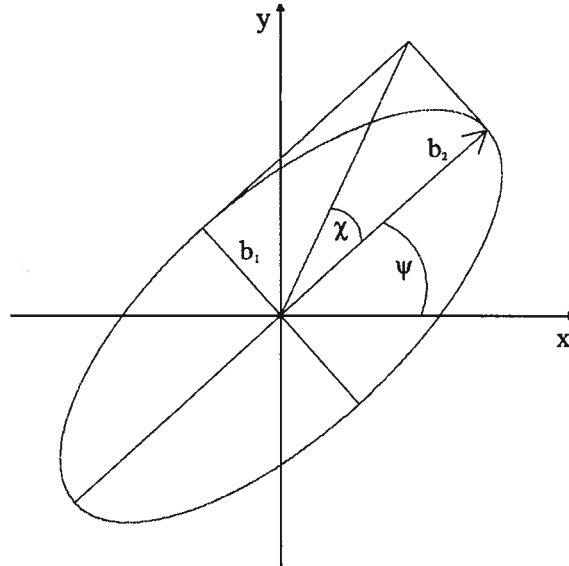


Figure 3.6 : Ellipse de polarisation, avec son angle d'orientation, ψ et son ellipticité, χ

L'angle entre l'axe des x et le demi-grand axe (b_2) est l'orientation (ψ) de l'onde électromagnétique. Sa valeur se situe entre 0° et 180° . L'aplatissement de l'ellipse est décrit par l'ellipticité (χ) et est défini par l'équation 3.7 :

$$\tan \chi = \frac{b_1}{b_2} \quad (\text{équation 3.7})$$

Sa valeur se situe entre -45° et $+45^\circ$.

Le tableau 3.1 montre les valeurs d'orientation et d'ellipticité pour les polarisations linéaires et circulaires.

Tableau 3.1 : Valeurs d'orientation (ψ) et d'ellipticité (χ) pour les polarisations linéaires et circulaires

Polarisation	Orientation, ψ ($^\circ$)	Ellipticité, χ ($^\circ$)
Linéaire horizontale	0 ou 180	0
Linéaire verticale	90	0
Circulaire droite	0 à 180	-45
Circulaire gauche	0 à 180	+45

3.2.1 Signature polarimétrique

La signature polarimétrique est une méthode graphique permettant de visualiser la réponse d'une cible comme une fonction des polarisations incidentes et rétrodiffusées. Quatre variables de polarisation permettent de définir le comportement diffusant d'une cible : l'orientation et l'ellipticité de l'onde incidente et l'orientation et l'ellipticité de l'onde réfléchi. Pour simplifier la visualisation, on se limite aux ondes rétrodiffusées polarisées parallèlement (signature co-polarisée) ou orthogonalement (signature ortho-polarisée) à l'onde incidente. On peut donc tracer la réponse observée comme une surface fonction de l'orientation (ψ) et de l'ellipticité (χ). Les signatures polarimétriques montrent des pics aux polarisations pour lesquelles la puissance reçue est maximale et des creux correspondant à une puissance minimale reçue. La réponse des signatures polarimétriques est normalisée à un. La hauteur de socle est l'intensité minimale de la signature polarimétrique, une fois la réponse maximale normalisée à un. Elle est fonction de l'hétérogénéité de la cible, du degré de dépolarisation du signal et du bruit technique de l'antenne. On peut relier qualitativement la hauteur de socle au taux de diffusion de volume.

Les signatures polarimétriques de cibles élémentaires possèdent des formes caractéristiques. Il est possible de rapprocher la signature polarimétrique d'une image aux signatures polarimétriques de cibles élémentaires et déduire le type de diffusion présent. Quatre cas simples de signatures polarimétriques sont présentés ici : la diffusion d'une surface lisse, la diffusion d'une surface rugueuse, la diffusion d'un réflecteur dièdre et la diffusion d'un dipôle orienté d'un angle ϕ par rapport à l'horizontale. Les matrices de diffusion $[S]$ présentées dans les équations 3.8 à 3.13 correspondent à des cibles élémentaires dont la constante diélectrique tend vers l'infini, c'est-à-dire des conducteurs parfaits.

La matrice de diffusion d'une surface lisse est

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.8})$$

Les signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'une surface lisse sont montrées à la figure 3.7.

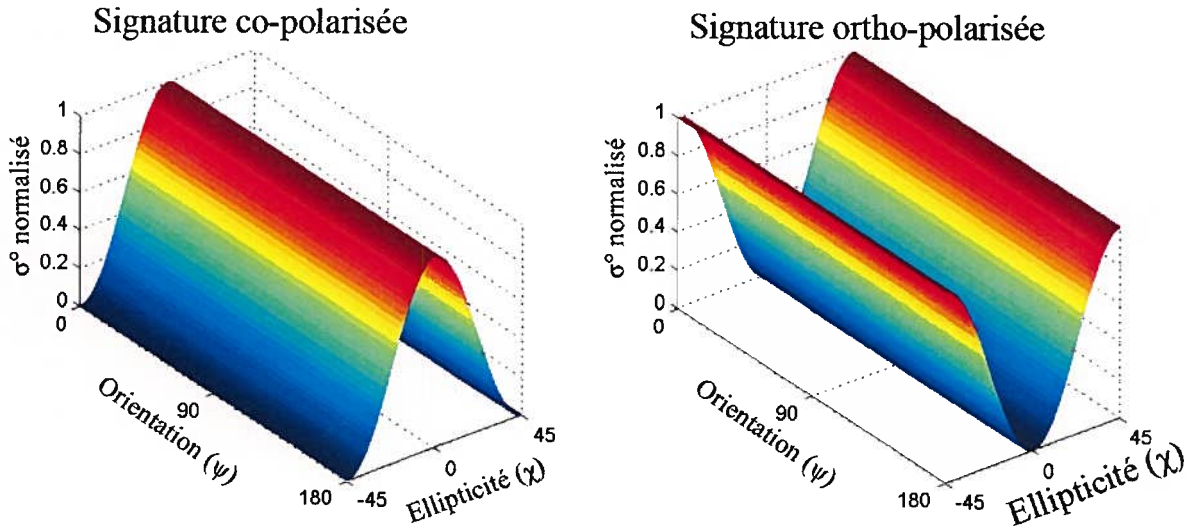


Figure 3.7 : Signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'une surface lisse, $ks = 0$

La matrice de diffusion d'une surface rugueuse est

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & a \\ a & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.9})$$

Le paramètre a correspond au signal rétrodiffusé d'un conducteur parfait en polarisation HV et dépend de la rugosité. Il est simulé ici à l'aide du rapport d'ortho-polarisation q donné par Oh *et al.* (1992).

$$q = \frac{\sigma_{HV}^{\circ}}{\sigma_{VV}^{\circ}} = 0.23 \left| \frac{1 - \sqrt{\varepsilon}}{1 + \sqrt{\varepsilon}} \right| (1 - e^{-ks}) \quad (\text{équation 3.10})$$

où ε est la constante diélectrique et ks est la hauteur RMS normalisée à la longueur d'onde (λ),

$$0.1 \leq ks \leq 6 \text{ et } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

En posant $\sigma_{VV}^{\circ} = 1$ (équation 3.9), et pour un conducteur parfait, on obtient,

$$q = \sigma_{HV}^{\circ} = a = 0.23 (1 - e^{-ks}) \quad (\text{équation 3.11})$$

Les signatures polarimétriques sont simulées pour deux surfaces de rugosité différentes, soit $ks = 0.8$ et $ks = 3$.

Pour $k_s = 0.8$, $a = 0.13$. La figure 3.8 présente les signatures polarimétriques de cette situation.

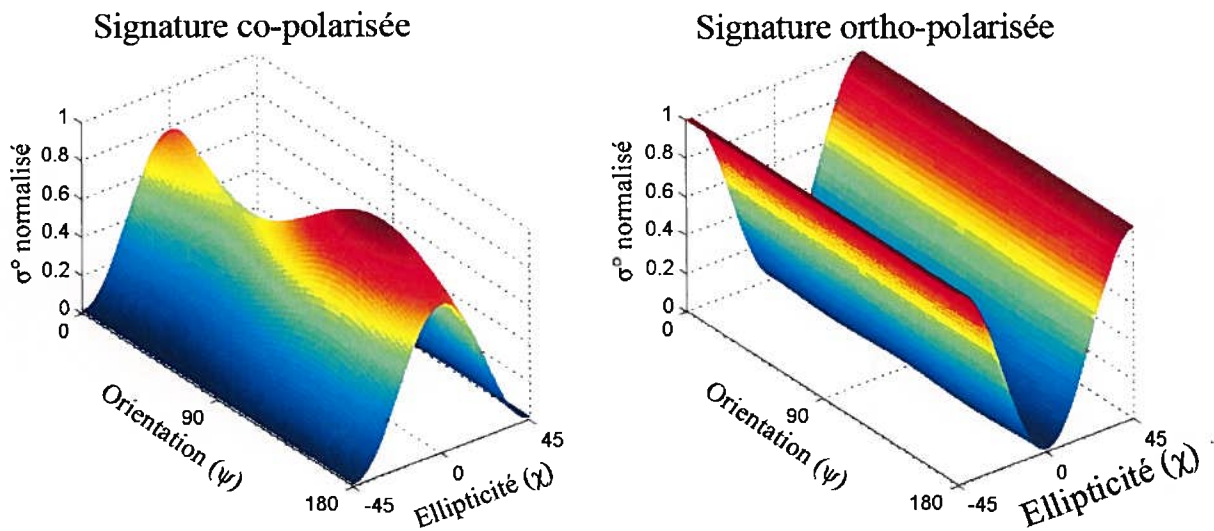


Figure 3.8 : Signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'une surface rugueuse, $k_s = 0.8$

Pour une surface plus rugueuse correspondant à $k_s = 3$, $a = 0.22$. La figure 3.9 présente les signatures polarimétriques de cette situation.

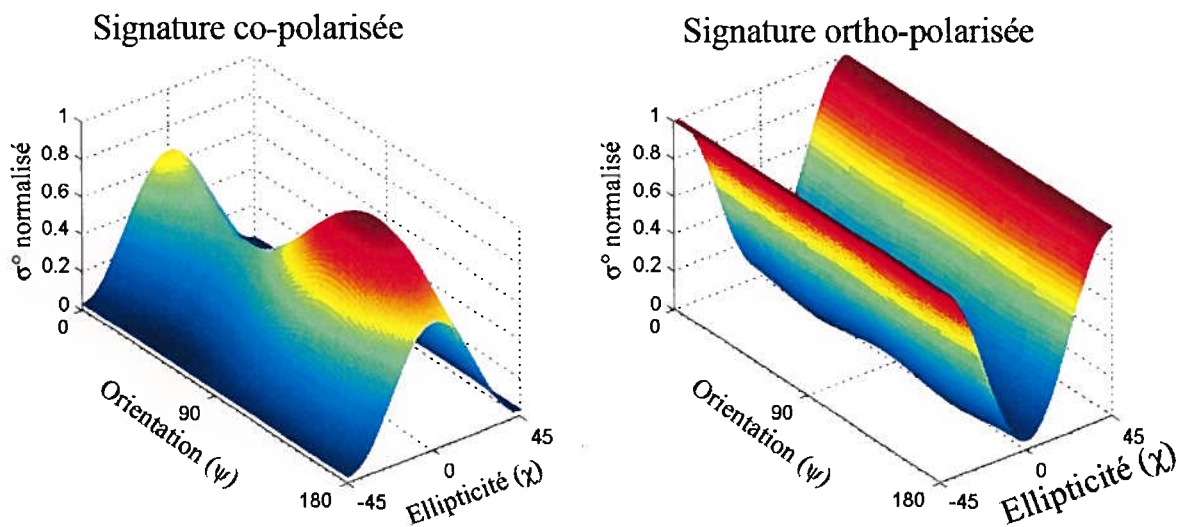


Figure 3.9 : Signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'une surface rugueuse, $k_s = 3$

La matrice de diffusion d'un réflecteur dièdre orienté horizontalement dont les deux cotés ont les mêmes coefficients de réflexion est :

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.12})$$

Les signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'un dièdre orienté horizontalement sont présentées à la figure 3.10.

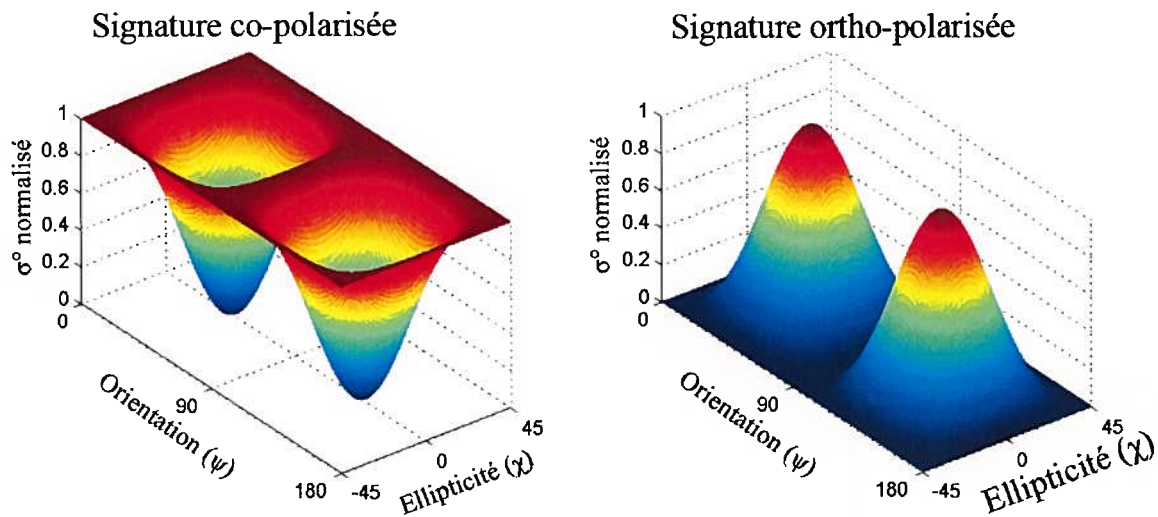


Figure 3.10 : Signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'un réflecteur dièdre orienté horizontalement

La matrice de diffusion d'un dipôle orienté d'un angle ϕ par rapport à l'horizontale est :

$$[S] = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi & \frac{1}{2} \sin 2\phi \\ \frac{1}{2} \sin 2\phi & \sin^2 \phi \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.13})$$

Les signatures polarimétriques d'un dipôle orienté d'un angle 0° , 45° et 90° sont montrées aux figures 3.11, 3.12 et, 3.13 respectivement.

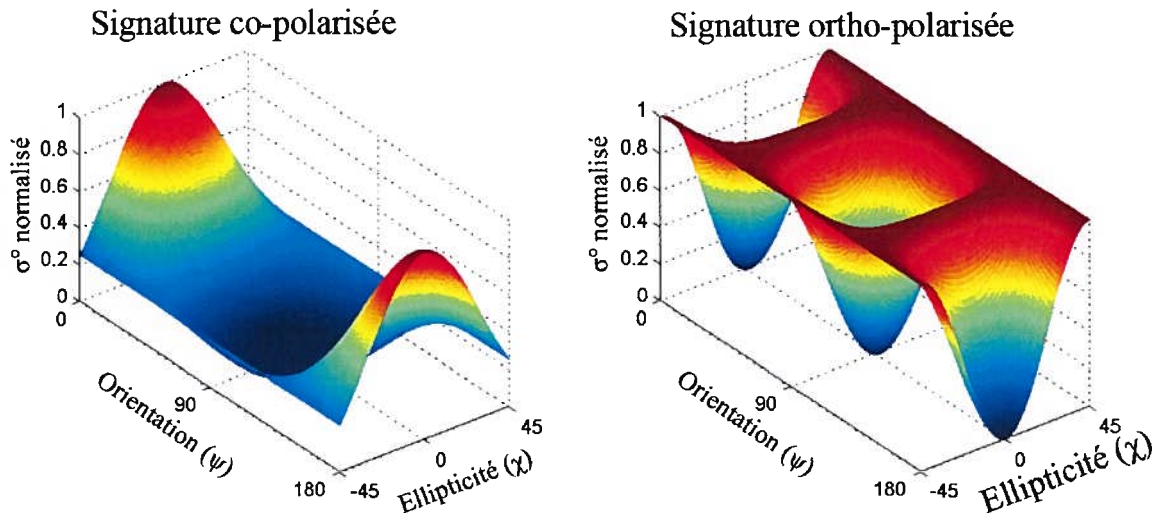


Figure 3.11 : Signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'un dipôle orienté d'un angle de 0°

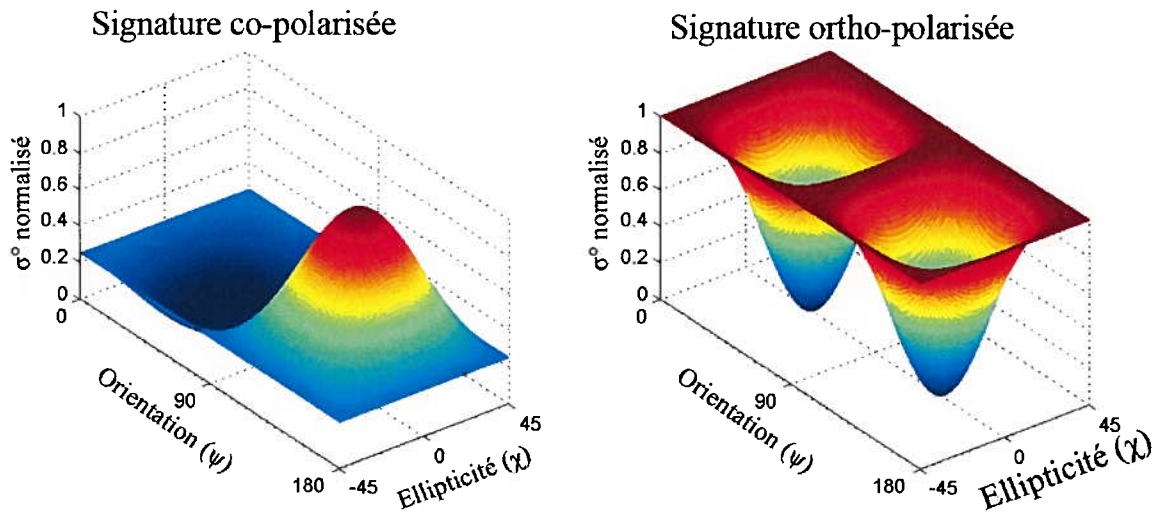


Figure 3.12 : Signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'un dipôle orienté d'un angle de 45°

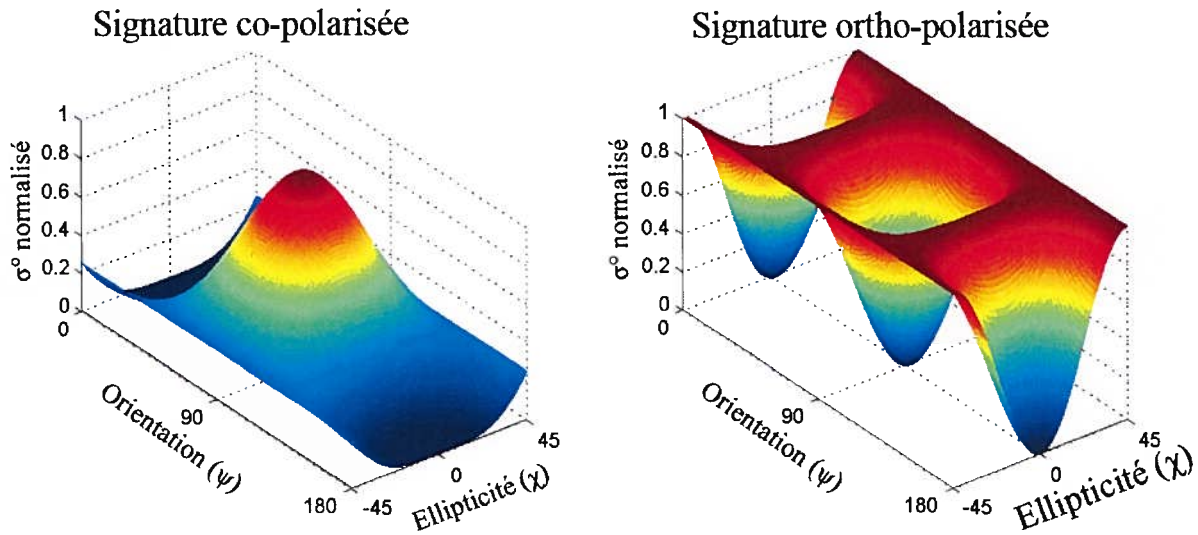


Figure 3.13 : Signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée d'un dipôle orienté d'un angle de 90°

3.2.2 Décomposition de Freeman-Durden

La décomposition de Freeman-Durden (Freeman *and* Durden, 1998) calcule les contributions respectives des mécanismes de diffusion de volume, de surface et de double réflexion à partir de la matrice de covariance.

La diffusion de volume est modélisée comme un ensemble de dipôles orientés aléatoirement. Pour un dipôle orienté horizontalement, la matrice de diffusion d'un élément de dipôle exprimée par l'équation 3.13 devient :

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.14})$$

La diffusion de volume ne peut être caractérisé par une seule matrice de diffusion d'une cible pure. Si nous considérons un ensemble de dipôles orientés aléatoirement, la matrice de covariance (équation 3.5) s'écrit :

$$\langle [C_3] \rangle_V = f_V \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/3 \\ 0 & 2/3 & 0 \\ 1/3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.15})$$

où f_V correspond à la diffusion de volume de la composante $|S_{VV}|^2$, et $|S_{VV}|^2 = |S_{HH}|^2$.

La diffusion de double réflexion est modélisée par un réflecteur en coin dièdre. Nous considérons que la surface verticale a un coefficient de réflexion R_{tH} et R_{tV} pour la polarisation horizontale et verticale respectivement. La surface horizontale a un coefficient de réflexion de R_{gH} et R_{gV} pour la polarisation horizontale et verticale respectivement. Deux composantes de phases pour la polarisation horizontale et verticale sont considérées : $e^{j2\gamma_H}$ et $e^{j2\gamma_V}$ respectivement. La matrice de diffusion d'un dièdre est donc :

$$[S] = \begin{bmatrix} e^{j2\gamma_H} R_{gH} R_{tH} & 0 \\ 0 & e^{j2\gamma_V} R_{gV} R_{tV} \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.16})$$

Après avoir normalisé par la composante S_{VV} , la matrice de covariance (équation 3.5) s'écrit :

$$[C_3]_{DR} = f_{DR} \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha^* & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.17})$$

$$\text{où } \alpha = e^{j2(\gamma_H - \gamma_V)} \frac{R_{gH} R_{tH}}{R_{gV} R_{tV}} \quad (\text{équation 3.18})$$

et f_{DR} correspond à la diffusion de double réflexion de la composante $|S_{VV}|^2$, et $|S_{VV}|^2 = |S_{HH}|^2$.

$$f_{DR} = |R_{gV} R_{tV}|^2 \quad (\text{équation 3.19})$$

La diffusion de surface est modélisée par le premier ordre de la diffusion de surface de Bragg.

La matrice de covariance (équation 3.5) correspondant à ces composantes est :

$$[C_3]_S = f_S \begin{bmatrix} |\beta|^2 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 0 \\ \beta^* & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.20})$$

où f_S correspond à la contribution de diffusion de surface de la composante $|S_{VV}|^2$, et $|S_{VV}|^2 = |S_{HH}|^2$.

$$f_S = |R_V|^2 \quad (\text{équation 3.21})$$

$$\text{et } \beta = \frac{R_H}{R_V} \quad (\text{équation 3.22})$$

La décomposition de Freeman-Durden exprime la matrice de covariance $[C_3]$ comme suit :

$$[C_3] = \langle [C_3] \rangle_V + [C_3]_{DR} + [C_3]_S \quad (\text{équation 3.23})$$

Ainsi, la puissance de la diffusion de volume est exprimée par :

$$P_V = \frac{8f_V}{3} \quad (\text{équation 3.24})$$

Ainsi, la puissance de la diffusion de double réflexion est exprimée par :

$$P_{DR} = f_{DR} (1 + |\alpha|^2) \quad (\text{équation 3.25})$$

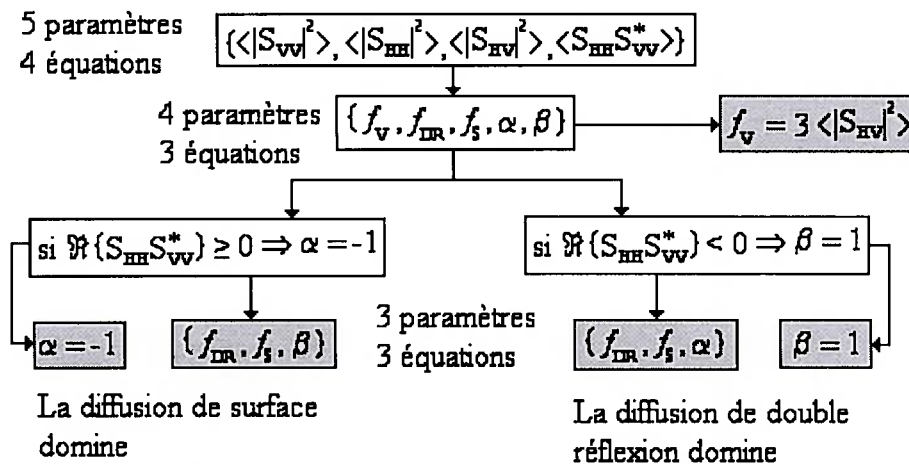
Ainsi, la puissance de la diffusion de surface est exprimée par :

$$P_S = f_S (1 + |\beta|^2) \quad (\text{équation 3.26})$$

La puissance totale (SPAN) peut être écrite comme :

$$\text{SPAN} = |S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2 + 2|S_{HV}|^2 = P_V + P_{DR} + P_S \quad (\text{équation 3.27})$$

La décomposition de Freeman-Durden contient 5 paramètres indépendants (f_V, f_{DR}, f_S, α et β) à déterminer et repose seulement sur 4 équations. Ainsi, quelques hypothèses doivent être faites afin d'évaluer par inversion les paramètres f_V, f_{DR}, f_S, α et β . La figure 3.14 montre le schéma de la méthode inverse utilisée dans la décomposition de Freeman-Durden.



Traduit de López-Martínez *et al.* (2005)

Figure 3.14 : Schéma d'inversion de la décomposition de Freeman-Durden

3.2.3 Décomposition de Cloude-Pottier

La décomposition de Cloude-Pottier (Cloude *and* Pottier, 1997) est basée sur les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice de cohérence $\langle [T_3] \rangle$ (équation 3.6). On peut décomposer la matrice de cohérence comme suit :

$$\langle [T_3] \rangle = [U_3] [\Sigma_3] [U_3]^{-1} \quad (\text{équation 3.28})$$

La matrice réelle et diagonale $[\Sigma_3]$, contient les valeurs propres de la matrice $\langle [T_3] \rangle$.

$$[\Sigma_3] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.29})$$

où $\infty > \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > 0$

La matrice unitaire $[U_3]$ contient les vecteurs propres de la matrice $\langle [T_3] \rangle$.

$$[U_3] = [\underline{u}_1 \quad \underline{u}_2 \quad \underline{u}_3] \quad (\text{équation 3.30})$$

Les vecteurs propres peuvent être formulés comme suit :

$$\underline{u}_i = [\cos \alpha_i \quad \sin \alpha_i \cos \beta_i e^{j\delta_i} \quad \sin \alpha_i \cos \beta_i e^{j\gamma_i}]^T \quad (\text{équation 3.31})$$

La décomposition de Cloude-Pottier de l'équation 3.28 s'écrit donc

$$\langle [T_3] \rangle = \sum_{j=1}^3 \lambda_j \underline{u}_j \underline{u}_j^* \quad (\text{équation 3.32})$$

Les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice de cohérence sont considérés comme les paramètres primaires de la décomposition de Cloude-Pottier. Pour simplifier l'analyse de l'information apportée par la décomposition, trois paramètres secondaires sont définis : l'entropie, l'anisotropie et l'angle α .

L'entropie (H) est définie comme suit :

$$H = - \sum_{i=1}^3 p_i \log_3(p_i) \quad (\text{équation 3.33})$$

$$\text{où } p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^3 \lambda_k} \quad (\text{équation 3.34})$$

L'entropie mesure le caractère aléatoire de la diffusion.

Si $H \rightarrow 0$, $\lambda_1 = \text{SPAN}$, et $\lambda_2 = \lambda_3 = 0$, ce qui correspond à un signal rétrodiffusé complètement polarisé.

Si $H \rightarrow 1$, $\lambda_1 = \text{SPAN} / 3$, et $\lambda_2 = \text{SPAN} / 3$ et $\lambda_3 = \text{SPAN} / 3$, ce qui correspond à un signal complètement dépolarisé, donc aucun mécanisme de diffusion domine.

Si $0 < H < 1$, la diffusion résulte d'un signal partiellement dépolarisé.

L'anisotropie (A) est définie par :

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (\text{équation 3.35})$$

L'anisotropie mesure l'importance relative du deuxième et du troisième vecteur propres de la décomposition. D'un point de vue pratique, l'anisotropie peut être utilisée comme discriminateur seulement lorsque $H > 0.7$, car pour de faibles entropies, les deuxième et troisième vecteurs propres sont fortement bruités.

L'angle α est défini par :

$$\underline{\alpha} = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i \quad (\text{équation 3.36})$$

L'angle α représente le mécanisme de diffusion moyen ou dominant.

Si $\alpha \rightarrow 0$ et $H \rightarrow 0$, le mécanisme dominant correspond à la diffusion de surface.

Si $\alpha \rightarrow \pi / 4$, le mécanisme dominant correspond à la diffusion de volume.

Si $\alpha \rightarrow \pi / 2$ et $H \rightarrow 0$, le mécanisme dominant correspond à la diffusion de double réflexion.

Il est possible de classer les différents mécanismes de diffusion à l'aide d'un graphe de l'angle α en fonction de l'entropie (figure 3.15) ou d'un graphe de l'anisotropie en fonction de l'entropie (Lee *and* Pottier, 2000). Sur la figure 3.15, la partie ombragée est mathématiquement impossible. En prenant la moyenne de différents mécanismes de diffusion (moyenne des vecteurs propres), l'intervalle des valeurs de l'angle α est limité à mesure que

l'entropie augmente. La partie ombragée représente cette limite. Ainsi, une entropie élevée restreint la capacité de classifier les mécanismes de diffusion, le signal rétrodiffusé étant dépolarisé.

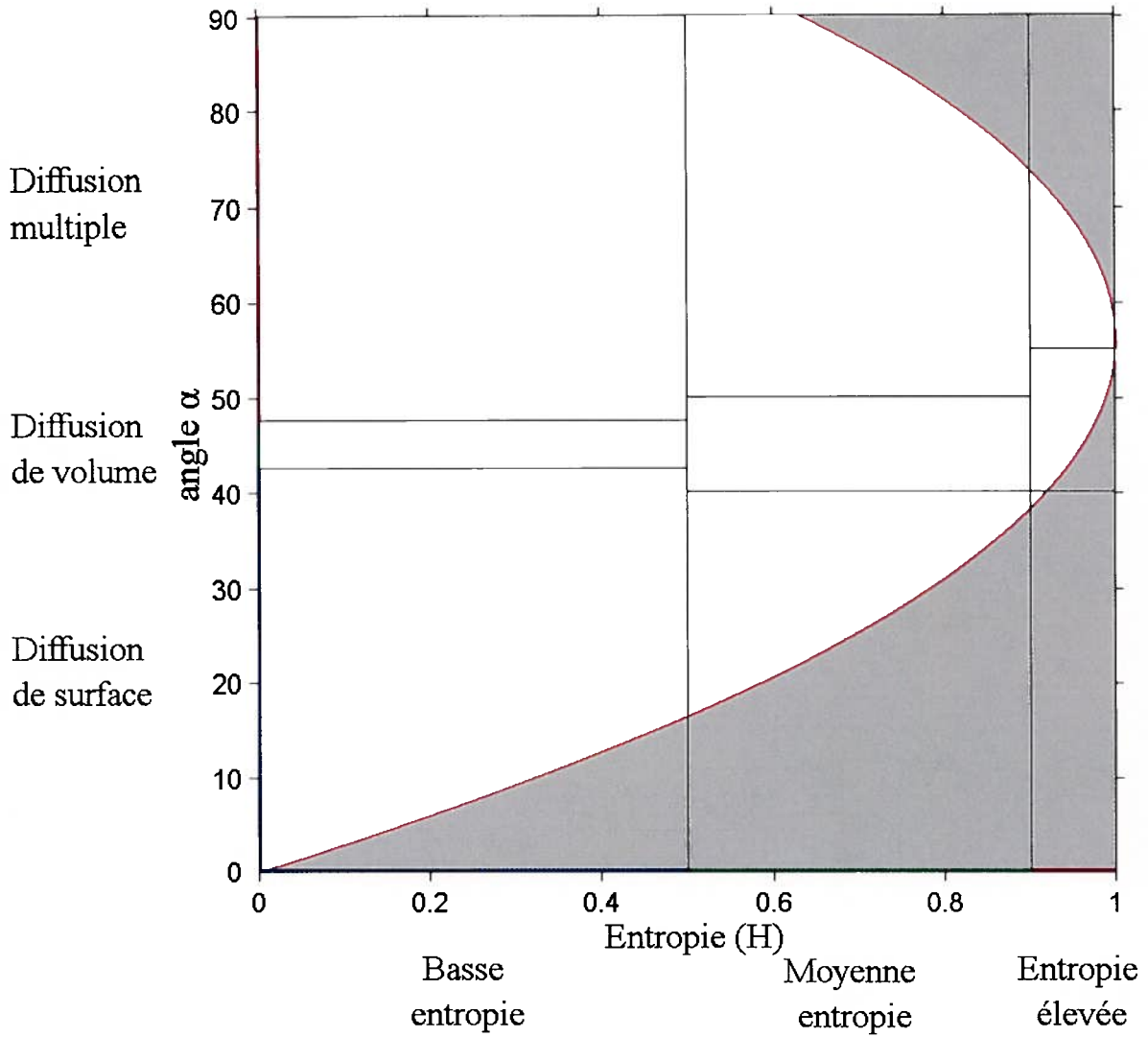


Figure 3.15: Interprétation graphique des paramètres H et α de la décomposition de Cloude-Pottier

4. Méthodologie

Le projet se déroule en trois grandes étapes comme décrit dans l'organigramme présenté à la figure 4.1. La partie portant sur le développement de techniques radar polarimétrique multifréquence est présentée dans l'organigramme de la figure 4.2. L'organigramme de la figure 4.3 montre la partie sur l'évaluation de l'effet d'un couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival. Enfin, les étapes de la correction du couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival sont présentées dans l'organigramme de la figure 4.4. Les différentes étapes méthodologiques sont décrites en détails dans les sous chapitres suivants.

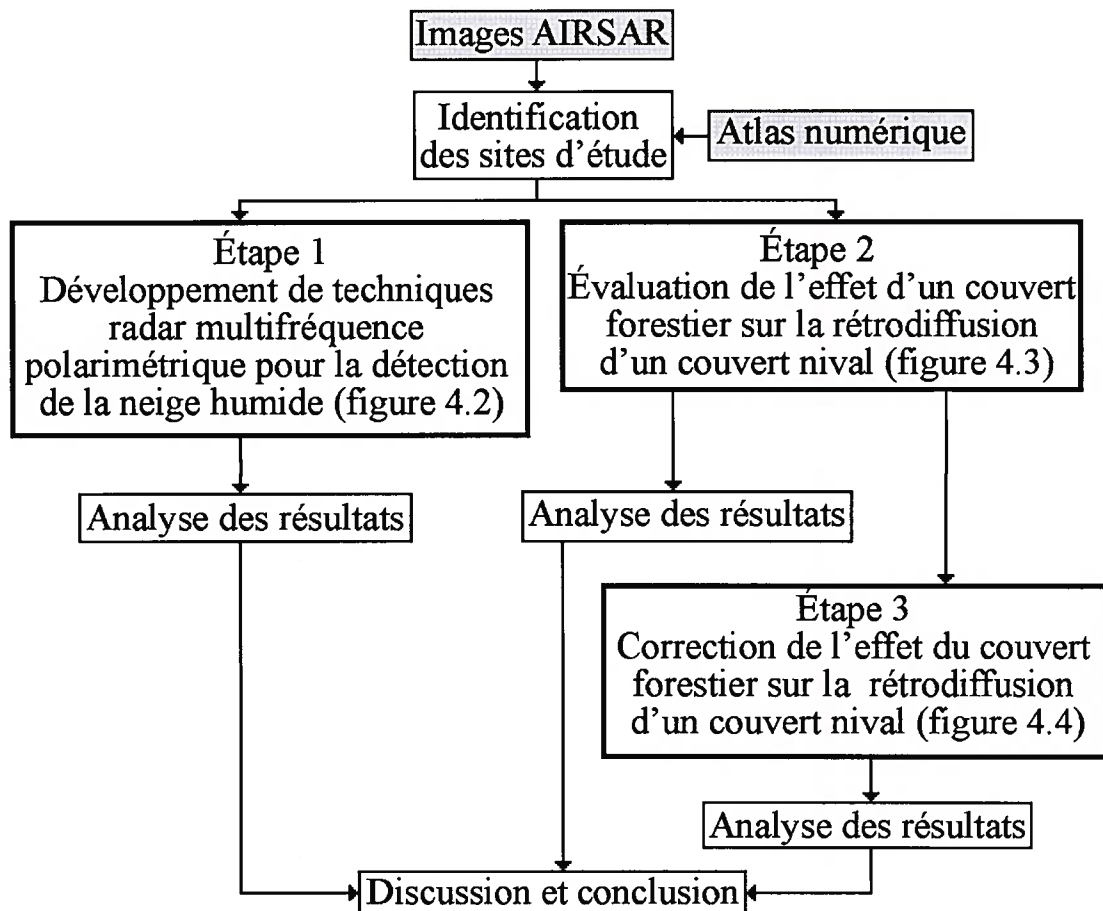


Figure 4.1 : Organigramme méthodologique

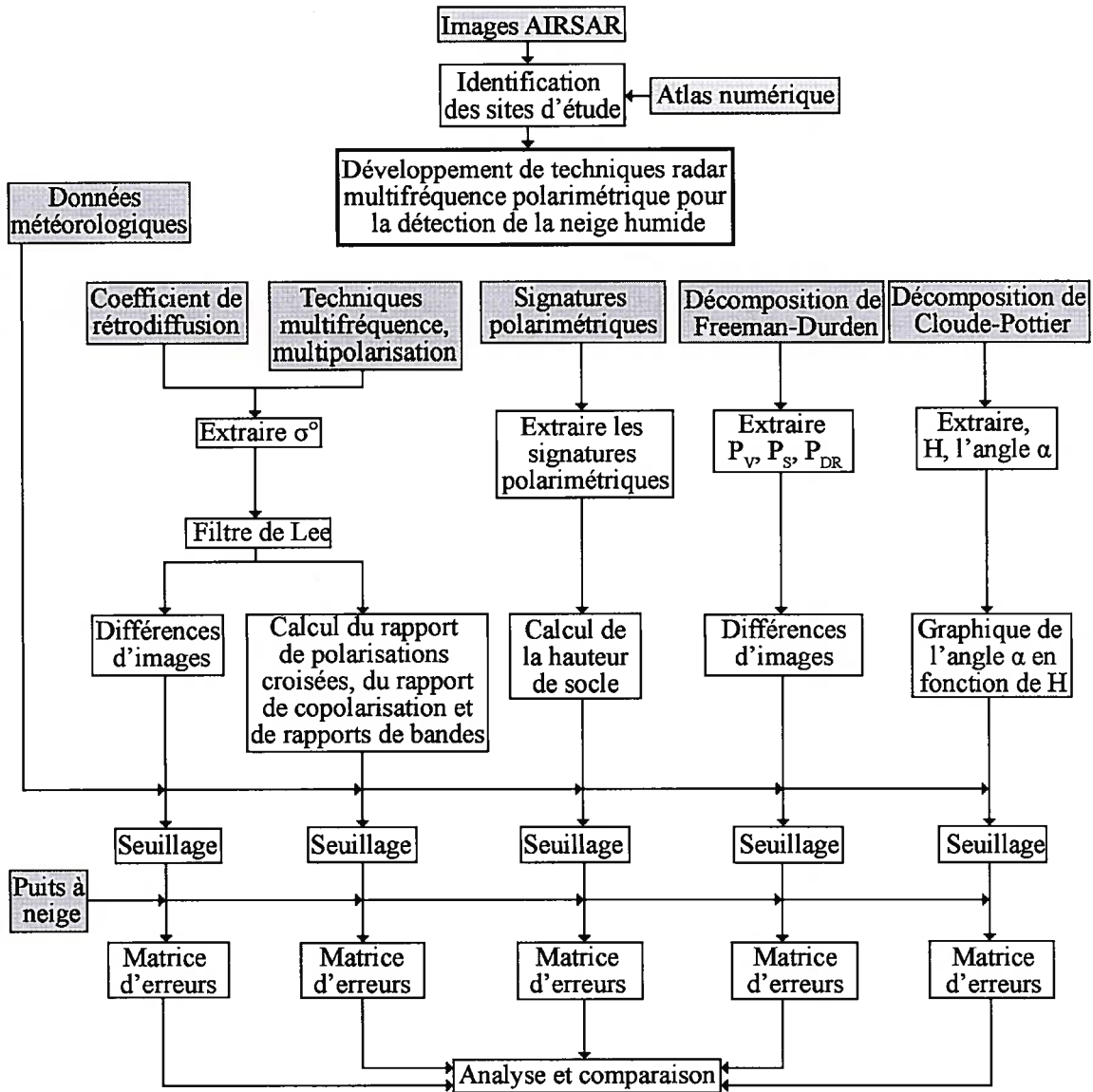


Figure 4.2 : Organigramme méthodologique : développement de techniques radar polarimétrique multifréquence

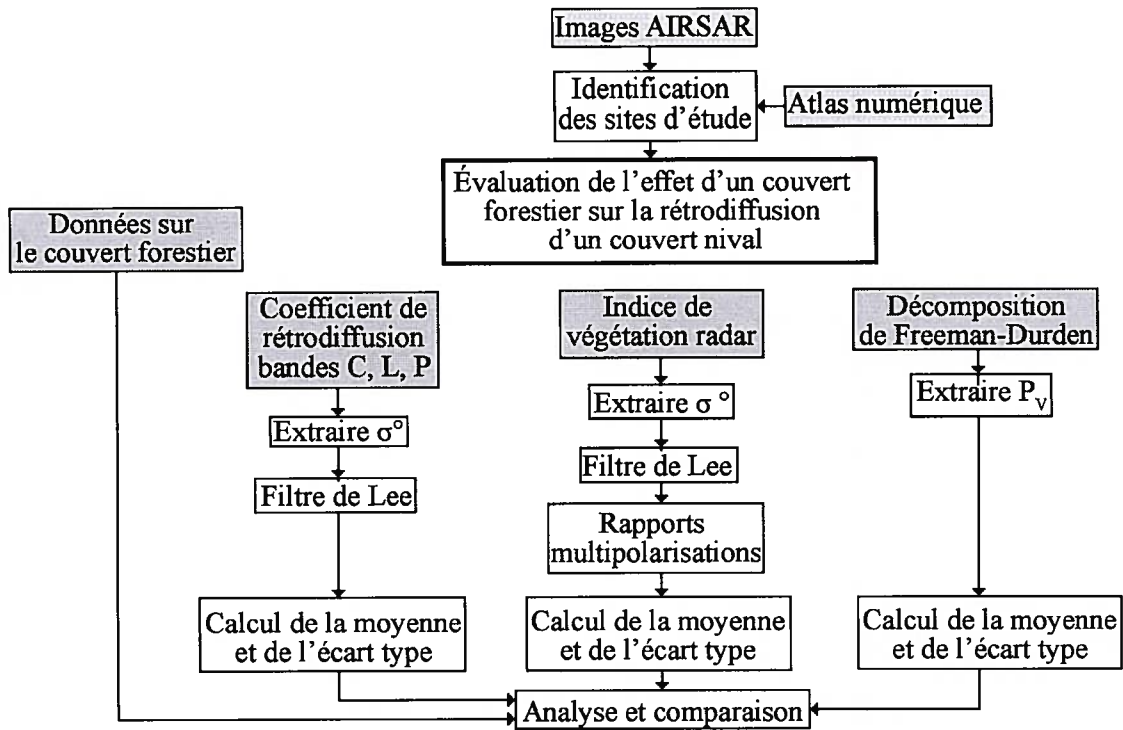


Figure 4.3 : Organigramme méthodologique : évaluation de l'effet d'un couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival

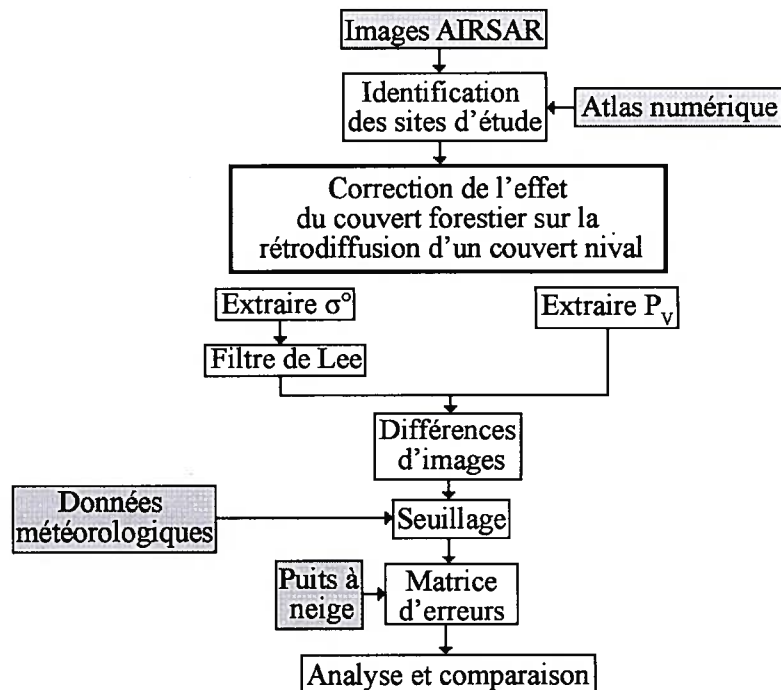


Figure 4.4 : Organigramme méthodologique : correction de l'effet d'un couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival

4.1 Identification de sites d'études

Les données AIRSAR-POLSAR sont compressées dans une matrice de diffusion de Stoke. Afin de conserver l'intégralité des données polarimétriques, il est préférable que la matrice de diffusion ne soit pas géoréférencée. Ainsi, plutôt que de géoréférencer chaque produit extrait de la matrice de diffusion, les coordonnées des sites d'étude sont identifiées sur les images d'origine. Le coefficient de rétrodiffusion (σ°) en bande C, polarisation HH est extrait des images AIRSAR-POLSAR à l'aide du logiciel ENVI (ITT Industries Inc, 2006). Une image AIRSAR-TOPSAR en bande C, polarisation HH, géoréférencée est utilisée afin d'identifier, sur l'image AIRSAR-POLSAR, les coordonnées (x et y) des trois sites d'études et des seize puits à neige où des mesures de terrain ont été effectuées. Ces coordonnées seront utilisées par la suite pour identifier les sites d'études sur chaque produit extrait de la matrice de diffusion.

4.2 Développement de techniques radar multifréquence polarimétrique pour la détection de la neige humide

La détection de la neige humide est effectuée à partir de cinq méthodes : le coefficient de rétrodiffusion (σ°), différents paramètres multifréquence et multipolarisation, les signatures polarimétriques, la décomposition de Freeman-Durden et, la décomposition de Cloude-Pottier. La synthèse de polarisation, nécessaire pour ces cinq méthodes, est effectuée avec le logiciel Polarimetric Work Station (PWS) du Centre Canadien de Télédétection (Touzi *and* Charbonneau, 2004). Les données météorologiques sont utilisées afin de déterminer l'état de la neige lors de l'acquisition des images radar. La neige est supposée humide lorsque la température de l'air est supérieure ou égale à 0°C et est supposée sèche lorsque la température de l'air est inférieure à 0°C. Il s'agit d'une approximation puis qu'il arrive que la température de la neige soit inférieur à 0°C même lorsque la température de l'air est au dessus de 0°C, surtout lorsqu'il y a présence d'un couvert végétal.

Pour la première méthode, le coefficient de rétrodiffusion en bande C, L et P polarisation HH, VV et HV est extrait puis filtré avec un filtre de Lee amélioré (Lee, 1980) de 5×5 appliqué sur les images d'intensité afin de réduire le chatoiement. La méthode développée par Rott et Nagler (1995) consiste à faire la différence, en bande C, entre les images d'hiver et une image de référence prise en condition de neige sèche. Un seuil de -3 dB est appliqué sur les images, à faible taux de couvert végétal, afin de détecter la neige humide.

Les seize puits à neige sont utilisés afin de déterminer la matrice d'erreurs pour chacun des trois sites d'étude (faible végétation, forêt éparse de conifères, forêt dense de conifères). Un masque est ensuite appliqué sur les seize puits à neige de chaque image afin de les exclure du développement des cinq méthodes de détection de la neige humide. Les valeurs moyennes des seize puits à neige de chaque image seront utilisées par la suite afin d'évaluer la matrice d'erreurs de toutes les nouvelles techniques développées à travers nos travaux. Les moyennes et écarts types du coefficient de rétrodiffusion en bandes L et P sont ensuite calculés afin d'évaluer le potentiel de ces deux bandes à détecter la neige humide.

Les coefficients de rétrodiffusion en polarisation circulaire (DD, GG, DG), en bandes C, L, P sont également extraits. Les moyennes et écarts types des coefficients de rétrodiffusion sont calculés. Une différence d'image entre les images d'hiver et une image de référence prise en condition de neige sèche est effectuée. Un histogramme est réalisé afin de déterminer un seuil permettant de discriminer l'état de la neige. La matrice d'erreurs est ensuite calculée sur les seize puits à neige afin d'évaluer le potentiel de cette nouvelle technique.

Différents paramètres multipolarisation et multifréquence sont calculés et ensuite analysés: le rapport de polarisations croisées (VH / VV, HV / HH), le rapport de co-polarisation (HH / VV) ainsi que des rapports de bandes pour chaque polarisation (Holden *et al.*, 1998). Les histogrammes en condition de neige sèche et de neige humide permettent d'établir un seuil discriminant les deux états de la neige en fonction des statistiques des images masquées. Le résultat est évalué à l'aide des matrices d'erreurs des seize puits à neige.

La troisième méthode consiste à analyser visuellement la forme des signatures polarimétriques en fonction des conditions de neige. La hauteur de socle est ensuite calculée sur les images masquées. Les valeurs de hauteur de socle sont utilisées afin de déterminer un seuil de détection de la neige humide. Puis, pour chacun des seize puits à neige de chaque image, la hauteur de socle est calculée afin de générer la matrice d'erreurs qui servira à l'évaluation de cette méthode.

Pour la quatrième méthode, une décomposition de Freeman-Durden (Freeman *and* Durden, 1998), avec une fenêtre de 11 x 11 appliqué sur des images non filtrées et sous la matrice de covariance, est d'abord réalisée sur les données. Les puissances de la diffusion de surface (P_S), de volume (P_V) et de double réflexion (P_{DR}) sont ainsi calculées pour les bandes C, L et P. Une différence entre les images d'hiver et une image de référence prise en condition de neige sèche est effectuée. Puis les statistiques appliquées sur les différences d'images masquées sont utilisées afin de déterminer des seuils permettant de détecter la neige humide. Les seize puits à neige sont utilisés afin de déterminer les matrices d'erreurs, nécessaires à l'évaluation de cette méthode sur chacun de trois sites d'étude.

Le même principe est appliqué à notre dernière méthode basée sur la décomposition de Cloude-Pottier (Cloude *and* Pottier, 1997). La décomposition de Cloude-Pottier est effectuée avec une fenêtre de 11 x 11 appliqué sur des images non filtrées de la matrice de cohérence. La capacité des paramètres entropie (H), anisotropie (A) et l'angle α à détecter la neige humide est ainsi analysée.

Enfin, les différentes matrices d'erreurs obtenues sont analysées et inter comparées afin d'évaluer l'aptitude de chacune des cinq méthodes développées.

4.3 Évaluation de l'effet d'un couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival

L'influence du couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival est évaluée à l'aide de trois méthodes : le coefficient de rétrodiffusion en bandes C, L et P, simple polarisation, des indices de végétation radar multipolarisation et, la puissance de la diffusion de volume issue de la décomposition de Freeman-Durden. Pour ces trois méthodes, une synthèse de polarisation est effectuée avec le logiciel PWS (Touzi *and* Charbonneau, 2004).

Les coefficients de rétrodiffusion en bandes C, L, P, polarisations HH, VV et HV sont extraits pour les deux premières méthodes. Un filtre de Lee amélioré (Lee, 1980) de 11 x 11 est ensuite appliqué sur les coefficients de rétrodiffusion (en intensité) afin de réduire le chatolement.

La première méthode consiste à calculer la moyenne et l'écart type du coefficient de rétrodiffusion (en dB) pour chacune des trois bandes, chacune des trois polarisations et ce, pour chaque site d'étude (faible végétation, forêt éparse et forêt dense) d'une superficie de 1 km².

La deuxième méthode consiste à effectuer des rapports de polarisation (en intensité) permettant de caractériser la végétation (Kim *and* van Zyl, 2004; Charbonneau *and* Trudel, 2005). Nous en citerons trois. Le premier rapport, le IVR (indice de végétation radar) (équation 4.1), a été élaboré par Kim et van Zyl (2004) pour évaluer la biomasse.

$$\text{IVR} = \frac{8\sigma_{HV}^0}{\sigma_{HH}^0 + \sigma_{VV}^0 + 2\sigma_{HV}^0} \quad (\text{équation 4.1})$$

Ce rapport nécessite la connaissance des trois polarisations. Deux autres rapports, IVRD_{HH} (indice de végétation radar en double polarisation HH) et IVRD_{VV} (indice de végétation radar en double polarisation VV), générés à partir de deux polarisations, au lieu de trois, ont été utilisés pour évaluer le couvert végétal (Charbonneau *et al.*, 2005).

$$\text{IVRD}_{\text{HH}} = \frac{\sigma_{\text{HV}}^0}{\sigma_{\text{HH}}^0 + \sigma_{\text{HV}}^0} \quad (\text{équation 4.2})$$

$$\text{IVRD}_{\text{VV}} = \frac{\sigma_{\text{VH}}^0}{\sigma_{\text{VV}}^0 + \sigma_{\text{VH}}^0} \quad (\text{équation 4.3})$$

Ces trois rapports sont calculés pour les trois bandes ainsi que leurs moyennes et leurs écarts types sur chacun des trois sites d'étude.

La troisième méthode consiste d'abord à faire la décomposition de Freeman-Durden (Freeman *and* Durden, 1998) avec une fenêtre de 11 x 11 appliqué sur des images non filtrées et sous la matrice de covariance. La moyenne et l'écart type de la puissance de la diffusion de volume (P_V) en décibel pour les trois bandes est calculée sur les trois sites d'études.

Pour chacune des trois méthodes décrites, les moyennes et écarts types (σ^0 , indices de végétation radar et P_V) sont calculés sur une image d'automne, une image prise en condition de neige sèche et une image prise en condition de neige humide. Les résultats obtenus à travers ces trois méthodes sont analysés et comparés en fonction des conditions de neige et du couvert forestier.

4.4 Correction de l'effet d'un couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival

La rétrodiffusion totale provenant d'un couvert nival sous un couvert forestier dense peut être divisée en trois contributions (Ulaby *et al.*, 1986) données dans l'équation 4.4.

$$\sigma_{\text{Total}}^0 = \sigma_{\text{forêt}}^0 + \tau^2 \sigma_{\text{neige}}^0 + \sigma_{\text{int}}^0 \quad (\text{équation 4.4})$$

où

$\sigma_{\text{forêt}}^0$ est la rétrodiffusion du couvert forestier

σ_{neige}^0 est la rétrodiffusion du couvert de neige

σ_{int}^0 est le terme d'interaction entre le couvert nival et le couvert forestier

τ^2 est la transmissivité (aller-retour) de la canopée

Ainsi, une connaissance des caractéristiques du couvert forestier est nécessaire afin d'extraire la portion du signal qui provient du couvert forestier de celle qui provient du couvert nival. Plusieurs modèles empiriques et semi-empiriques existent (Ulaby *et al.*, 1990; Chauhan *et al.*, 1991 ; Karam *et al.*, 1992, 1995), mais ils nécessitent la connaissance de plusieurs paramètres du couvert forestier. Les indices de végétation radar peuvent être reliés à certains de ces paramètres et permettre une caractérisation du couvert forestier sans aller sur le terrain. Par contre, la précision des données CLPX et leur disponibilité ne permettent pas d'établir ces relations.

Une méthode simple pour corriger partiellement l'effet du couvert forestier consiste à soustraire la diffusion de volume du signal total. En condition de neige sèche, la puissance de diffusion de volume provient principalement du couvert forestier, mais également du couvert de neige. En condition de neige humide, il n'y a plus de diffusion de volume provenant du couvert nival (Ulaby *et al.*, 1986). Ainsi, la différence (en dB) entre une image d'hiver et la puissance de diffusion de volume prise en condition de neige humide est effectuée afin de corriger partiellement l'effet du couvert forestier. Cette méthode est appliquée à chaque image acquise en bande C, L et P. Un masque est ensuite appliqué sur les seize puits à neige. Des calculs statistiques et des histogrammes sont réalisés à partir de ces images afin de déterminer s'il est possible d'établir un seuil permettant de détecter la neige humide. Puis, les puits à neige seront utilisés pour générer une matrice d'erreurs qui servira à évaluer cette technique.

5. Présentation des résultats

Les résultats sont présentés en trois sections. D'abord, les résultats concernant le développement de techniques radar multifréquence polarimétrique afin de discriminer la neige humide de la neige sèche. Ensuite, les résultats portant sur l'évaluation de l'effet du couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert de neige. Enfin, les résultats portant sur la correction de l'effet du couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival.

5.1 Développement de techniques radar multifréquence polarimétrique pour la détection de la neige humide : résultats

Les résultats des différentes techniques radar multifréquence polarimétrique pour la détection de la neige humide sont décrits dans les sections suivantes. Les résultats utilisant le coefficient de rétrodiffusion en bande C, L et P, simple polarisation sont d'abord présentés. Ensuite, différentes techniques multifréquence et multipolarisation sont analysées. L'analyse visuelle des signatures polarimétriques ainsi que l'analyse quantitative de la hauteur de socle sont ensuite présentées. Enfin, les deux techniques de décomposition de la cible, la décomposition de Freeman-Durden et la décomposition de Cloude-Pottier sont analysées.

5.1.1 Coefficient de rétrodiffusion, bande C, L et P, simple polarisation

Les figures 5.1, 5.2 et 5.3 présentent une image radar du coefficient de rétrodiffusion en bande C, polarisation HH ainsi que leur histogrammes pour des situations de neige sèche (bleu) et de neige humide (rouge) pour les sites de faible végétation (*Walton Creek*), forêt éparse de conifères (*Buffalo Pass*) et forêt dense de conifères (*St-Louis Creek*), respectivement.

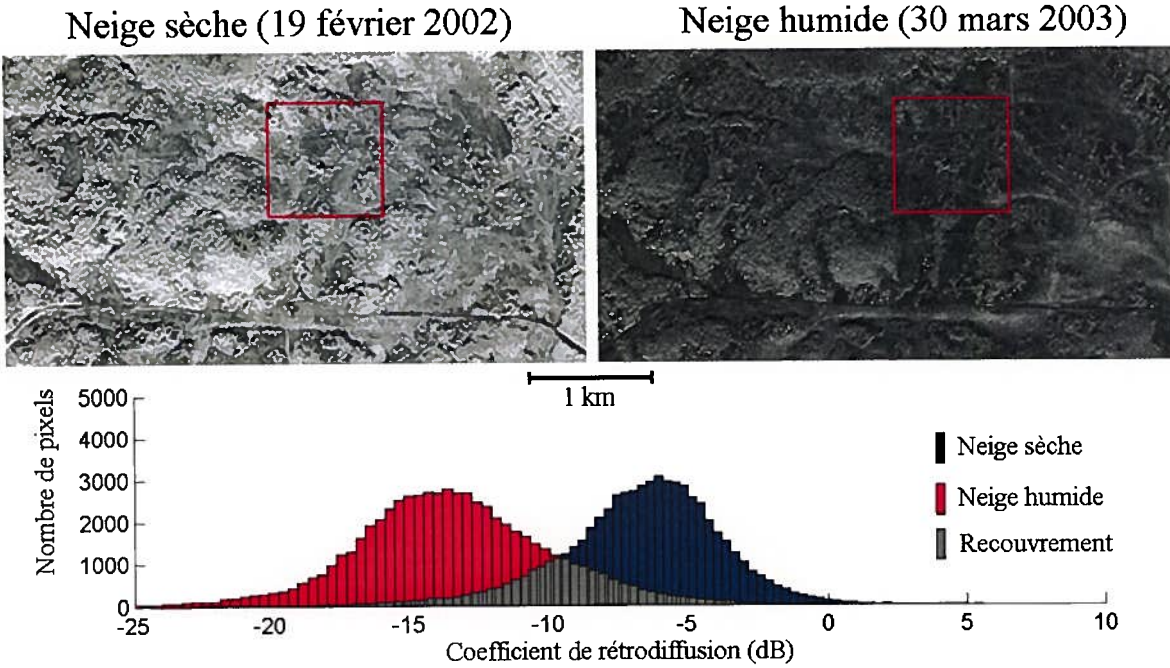


Figure 5.1 : Images radar en bande C polarisation HH et histogrammes des images pour des situations de neige sèche et de neige humide, site de faible végétation (Walton Creek)

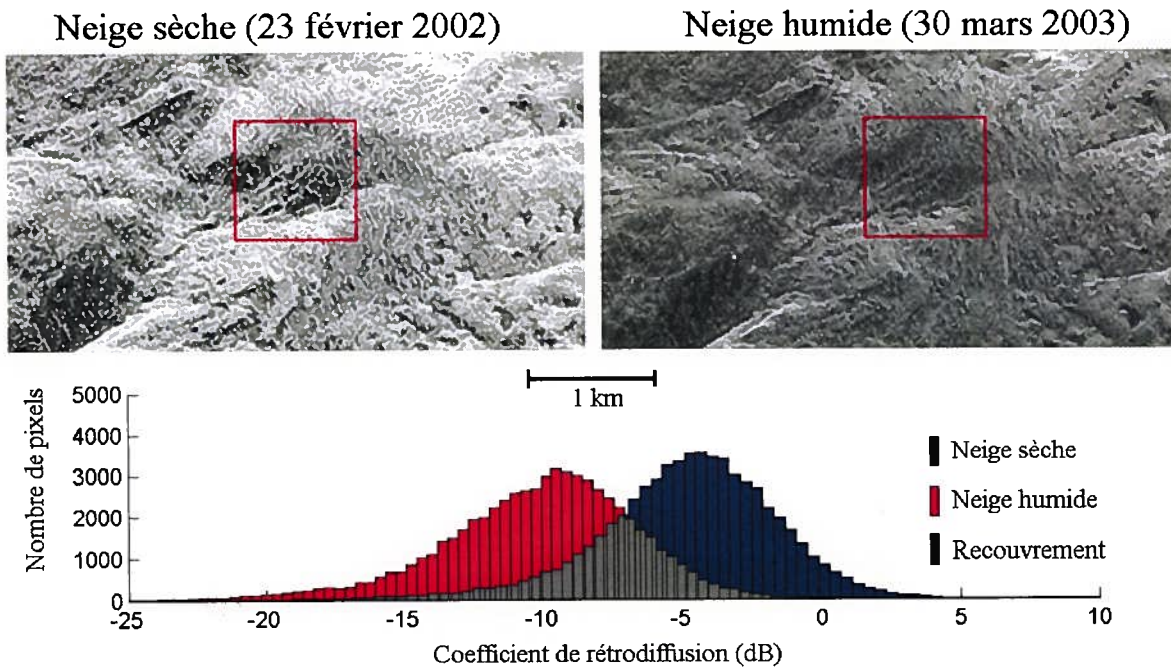


Figure 5.2 : Images radar en bande C polarisation HH et histogrammes des images pour des situations de neige sèche et de neige humide, sites de forêt épaisse de conifères (Buffalo Pass)

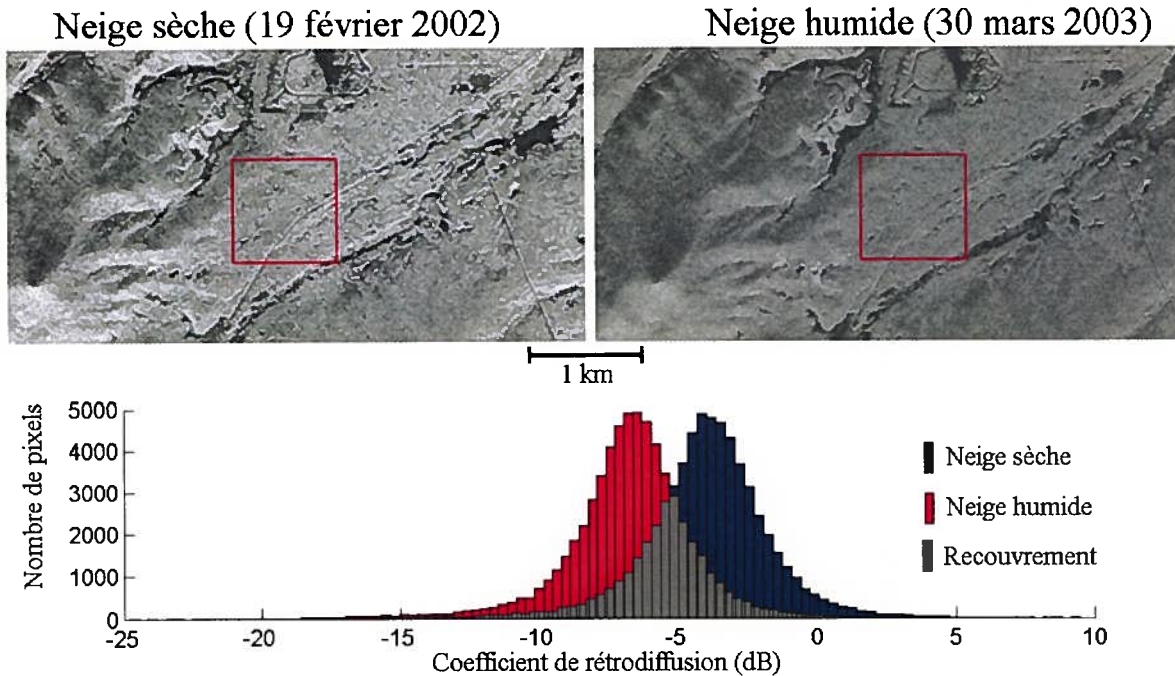


Figure 5.3 : Images radar en bande C polarisation HH et histogrammes des images pour des situations de neige sèche et de neige humide, sites de forêt dense de conifères (St-Louis Creek)

Le coefficient de rétrodiffusion de la neige humide en bande C est inférieur à celui de la neige sèche et à celui de la majorité des surfaces naturelles, sauf pour les surfaces d'eau libre (Rott and Nagler, 1995). Les figures 5.2 et 5.3 montrent que la présence d'une forêt éparse ou dense de conifères augmente les valeurs du coefficient de rétrodiffusion différemment pour les sites de neige sèche et de neige humide. Les histogrammes de neige sèche et de neige humide étant plus rapprochés en présence d'un couvert forestier, il est plus difficile de discriminer la neige humide de la neige sèche (Baghdadi *et al.*, 1997; Magagi *et al.*, 2002).

La méthode de détection de la neige humide développée par Rott et Nagler (1995) consiste à faire la différence entre le coefficient de rétrodiffusion en bande C (polarisation HH, VV ou HV) d'une image d'hiver et d'une image sans neige où le sol est gelé; ou d'une image d'hiver et une image prise en condition de neige sèche. Un seuil de -3dB est ensuite appliqué afin de différencier la neige sèche de la neige humide. Les figures 5.4, 5.5 et 5.6 montrent les

histogrammes des différences de coefficients de rétrodiffusion entre les images d'hiver et une image en condition de neige sèche en polarisation HH, VV et HV respectivement. Ces images ont été masquées des seize puits à neige. Lorsque la température lors de l'acquisition de l'image est au dessus de 0°C, l'image est considérée en condition de neige humide (en rouge). Inversement, lorsque la température est en dessous de 0°C, l'image est considérée en condition de neige sèche (en bleu). Le tableau 5.1 montre la matrice d'erreurs (en %) de cette méthode en polarisation HH, VV et HV appliquée sur les puits à neige, où des mesures terrains ont été prises, de chaque image pour les trois sites d'études.

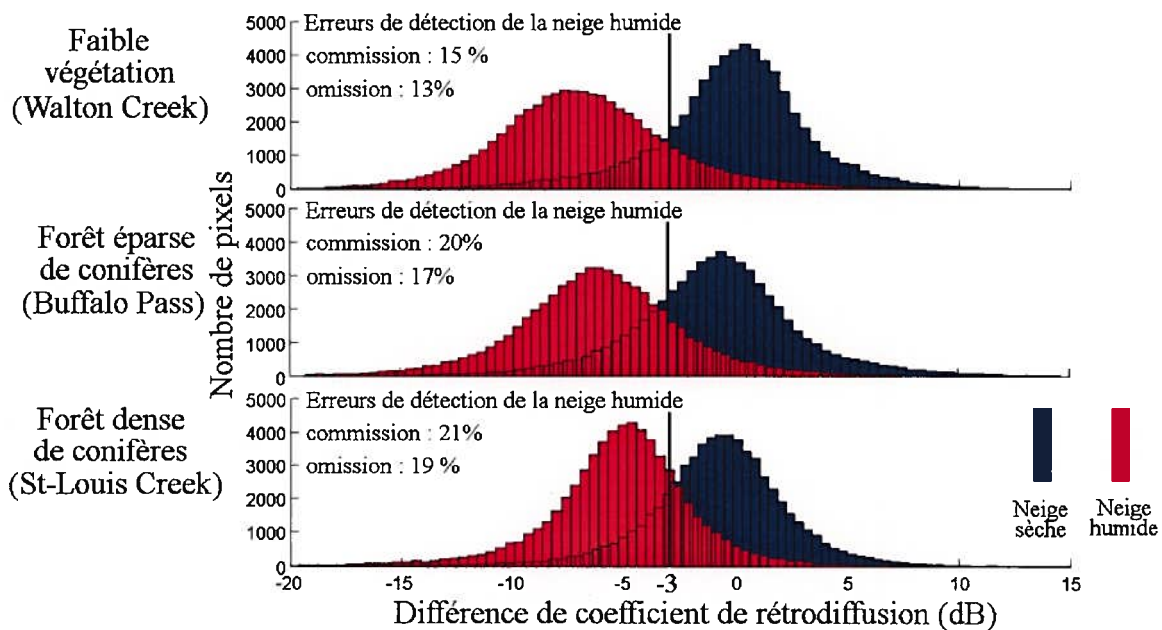


Figure 5.4 : Histogrammes des différences de coefficients de rétrodiffusion, polarisation HH, bande C pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude

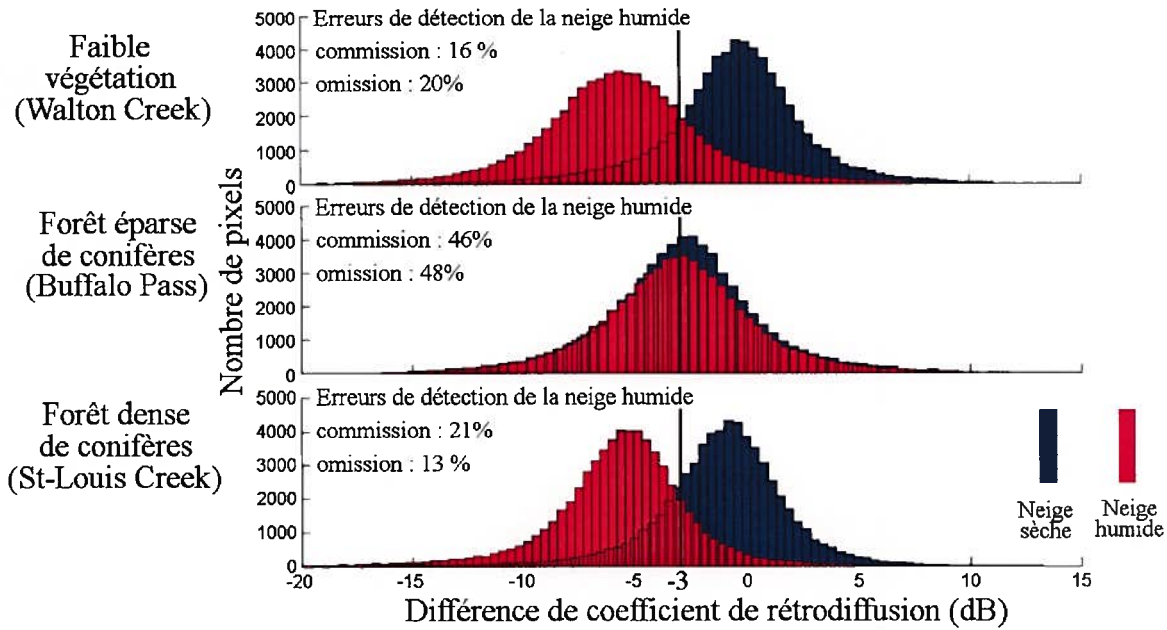


Figure 5.5 : Histogrammes des différences de coefficients de rétrodiffusion, polarisation VV, bande C pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude

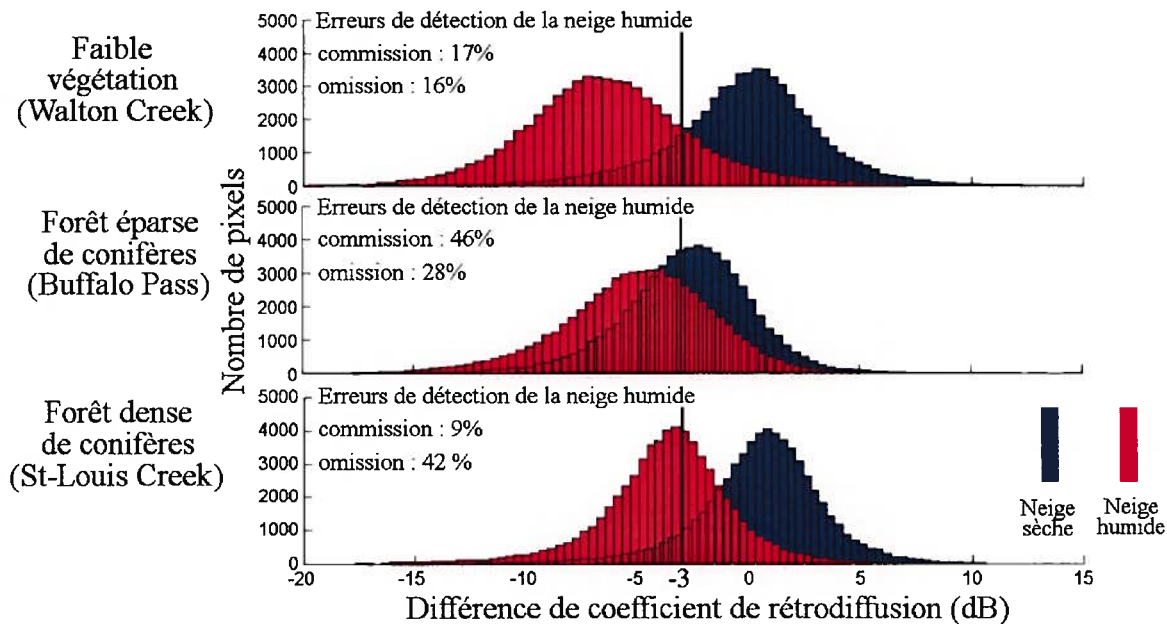


Figure 5.6 : Histogrammes des différences de coefficients de rétrodiffusion, polarisation HV, bande C pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude

Tableau 5.1 : Matrices d'erreurs (en %) pour les trois sites d'études, seuillage à -3 dB de la différence (en dB) en bande C entre une image d'hiver et une image en condition de neige sèche, polarisation linéaire

		Polarisation HH		Polarisation VV		Polarisation HV		
		Données des puits à neige						
		Neige	sèche	humide	sèche	humide	sèche	humide
Faible végétation (Walton Creek)	Classification à l'aide des images radar	sèche	100	0	100	6	100	0
		humide	0	100	0	94	0	100
Forêt éparse de conifères (Buffalo Pass)		sèche	94	13	87	47	81	28
		humide	6	87	13	53	19	72
Forêt dense de conifères (St-Louis Creek)		sèche	100	25	100	13	100	31
		humide	0	75	0	87	0	69

Cette méthode présente de bons résultats pour le site de faible végétation, mais montre des difficultés dans la détection de la neige humide pour les sites de forêt éparse de conifères et de forêt dense de conifères (Magagi *et al.*, 2002; Baghdadi *et al.*, 1997). En polarisation HH, on obtient de meilleurs résultats pour le site de forêt éparse de conifères que pour le site de forêt dense de conifères. En polarisation VV, une plus grande erreur est obtenue pour le site de forêt éparse de conifères. Le type de couverture forestière, son architecture particulièrement, peut expliquer cette variation. En effet, on retrouve du sapin et de l'épinette dans le site de forêt éparse de conifères, alors que l'on retrouve du pin tordu latifolié dans le site de forêt dense de conifères. La structure de ces trois espèces n'étant pas la même (figure 2.5, elle peut influencer la rétrodiffusion en fonction de la polarisation (figure 3.5). En polarisation HV, on remarque que le seuil de détection de la neige humide en présence d'une forêt dense de conifères est décalé. Comme la polarisation HV est plus sensible à la diffusion de volume, la présence d'un couvert forestier influence davantage les résultats. Ainsi, en posant le seuil à -3 dB pour le site de forêt dense de conifères comme pour le site de faible végétation, on augmente les erreurs d'omission de détection de la neige humide. Globalement, la polarisation HH donne les meilleurs résultats de détection de la neige humide sous différents couverts forestiers.

Le seuil de -3dB a été déterminé en fonction des statistiques des images acquises en bande C en condition de neige sèche et de neige humide (Rott *and* Nagler, 1995). En observant les statistiques des images en bande L et P (figure 5.7, 5.8), on voit qu'il n'est pas possible d'établir un seuil discriminant l'état de la neige pour différents couverts végétaux puisque les moyennes du coefficient de rétrodiffusion en condition de neige sèche sont très similaires aux moyennes du coefficient de rétrodiffusion en condition de neige humide.

Ainsi, dans l'analyse du coefficient de rétrodiffusion en polarisation linéaire, la bande C permet la meilleure discrimination de l'état de la neige. Le coefficient de rétrodiffusion en bande C est influencé à la fois par l'état de la neige et par la présence d'un couvert forestier. Les coefficients de rétrodiffusion en polarisation linéaire, bande L et P, sont plutôt influencés par la présence d'un couvert forestier et non par l'état de la neige.

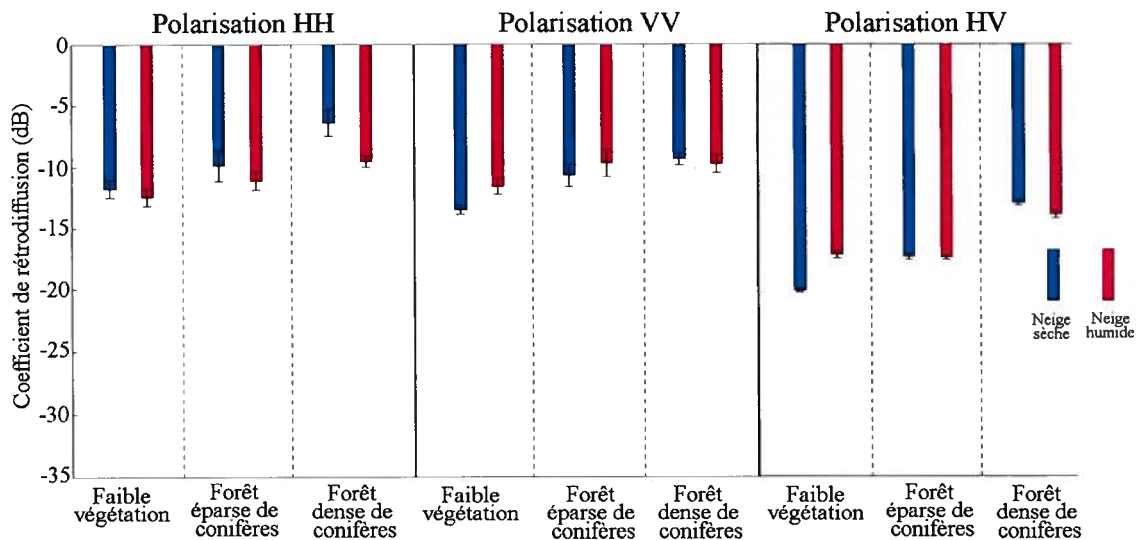


Figure 5.7 : Moyennes et écarts-type des coefficients de rétrodiffusion, polarisation linéaire, bande L

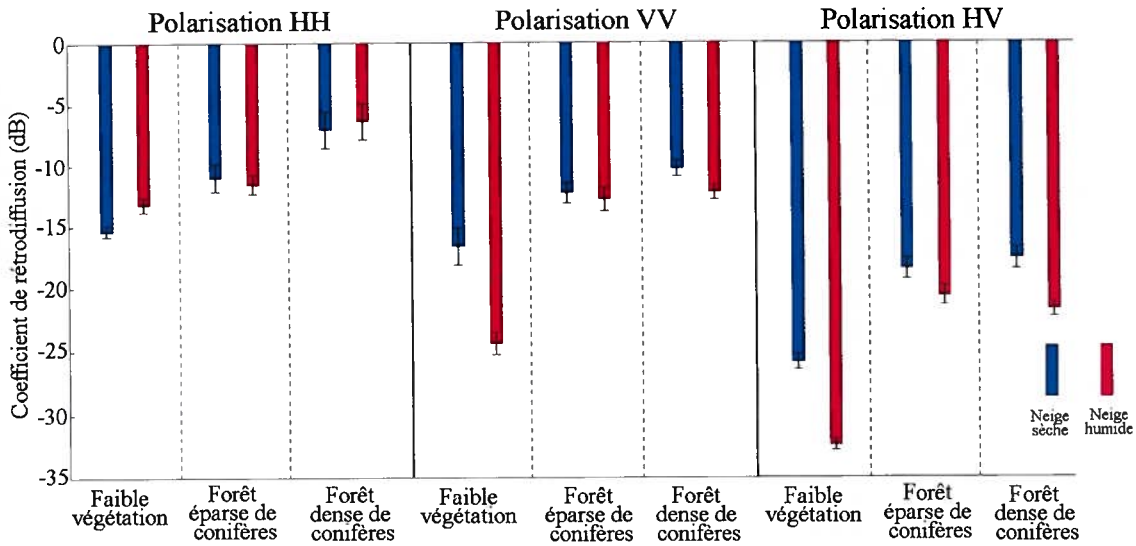


Figure 5.8 : Moyennes et écarts-type des coefficients de rétrodiffusion, polarisation linéaire, bande P

Il est également possible d'analyser la réponse du coefficient de rétrodiffusion en polarisation circulaire, soit en polarisation droite-droite (σ°_{DD}), en polarisation gauche-gauche (σ°_{GG}), et en polarisation droite-gauche (σ°_{DG}). Les figures 5.9, 5.10, et 5.11 montrent le coefficient de rétrodiffusion moyen et son écart type, dans les bandes C, L et P et, en polarisation DD, GG et DG, d'images acquises en condition de neige sèche (bleu) et de neige humide (rouge) sur les trois sites d'études.

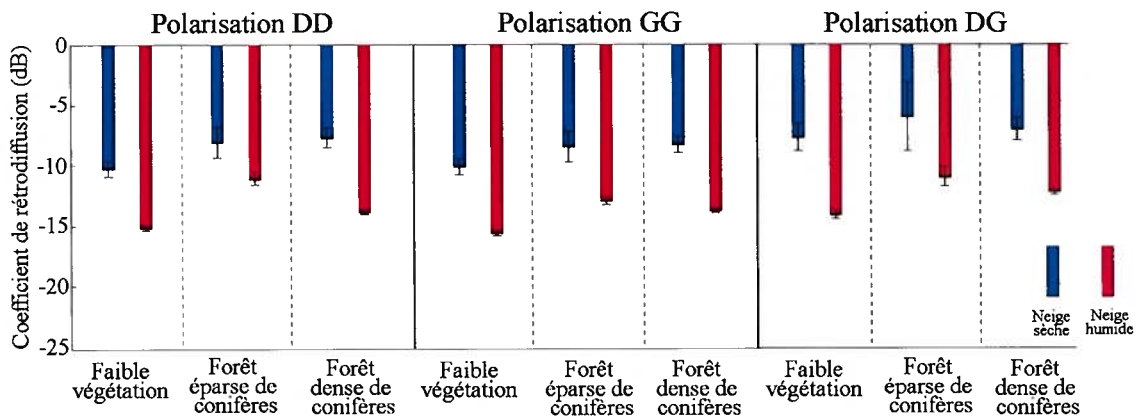


Figure 5.9 : Moyennes et écarts-type des coefficients de rétrodiffusion, polarisation circulaire, bande C

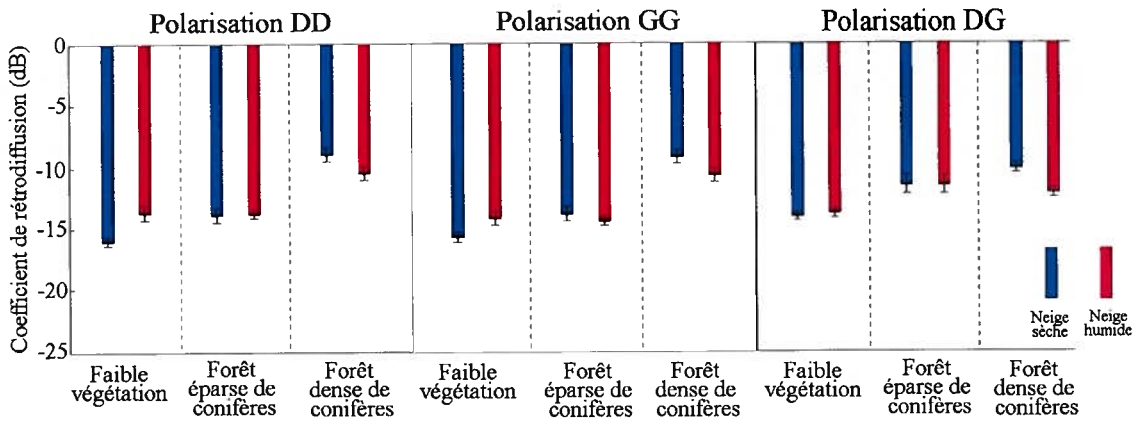


Figure 5.10 : Moyennes et écarts-type des coefficients de rétrodiffusion, polarisation circulaire, bande L

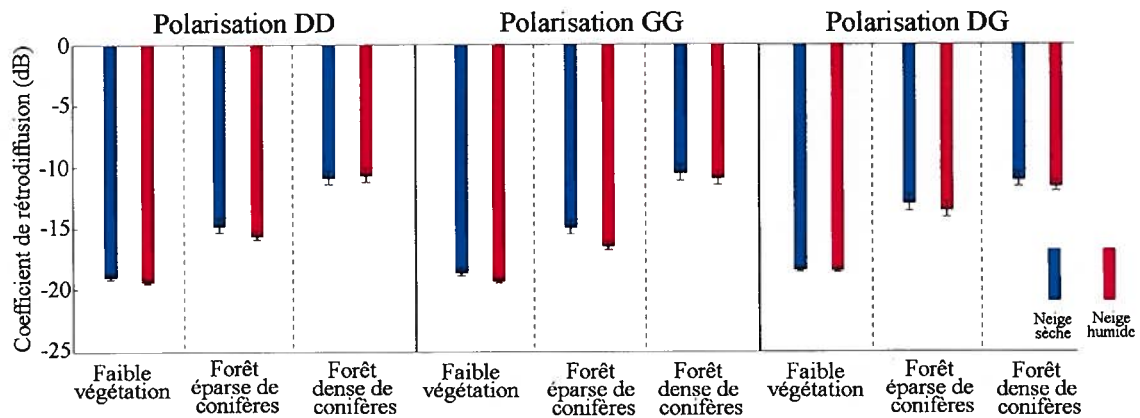


Figure 5.11 : Moyennes et écarts-type des coefficients de rétrodiffusion, polarisation circulaire, bande P

Le coefficient de rétrodiffusion en polarisation circulaire DD, GG et DG en bande C montre une différence d'environ 5 dB entre les conditions de neige sèche et de neige humide pour chacun des trois types de couverts forestiers. Cette variation n'est pas observée en bande L et P.

Le coefficient de rétrodiffusion en bande C, polarisation circulaire, des images en condition de neige sèche est toujours supérieur à celle des images en condition de neige humide. Ainsi, en effectuant la différence en dB entre une image d'hiver et une image de référence en condition

de neige sèche, il est possible d'établir un seuil permettant de discriminer la neige sèche de la neige humide. Les figures 5.12, 5.13 et 5.14 montrent les statistiques des différences d'images de coefficient de rétrodiffusion, en bande C, sur les trois sites d'études en conditions de neige sèche (bleu) et de neige humide (rouge) et pour les polarisations DD, GG et DG, respectivement. Le seuil est établi à -1.5 dB en polarisation DD et GG et à -3 dB en polarisation DG selon les statistiques des images. La polarisation DD ne permet pas de discriminer l'état de la neige pour le site de forêt épaisse de conifères puisque les deux histogrammes se recouvrent. La polarisation DG présente les erreurs de détection de la neige humide les plus faibles.

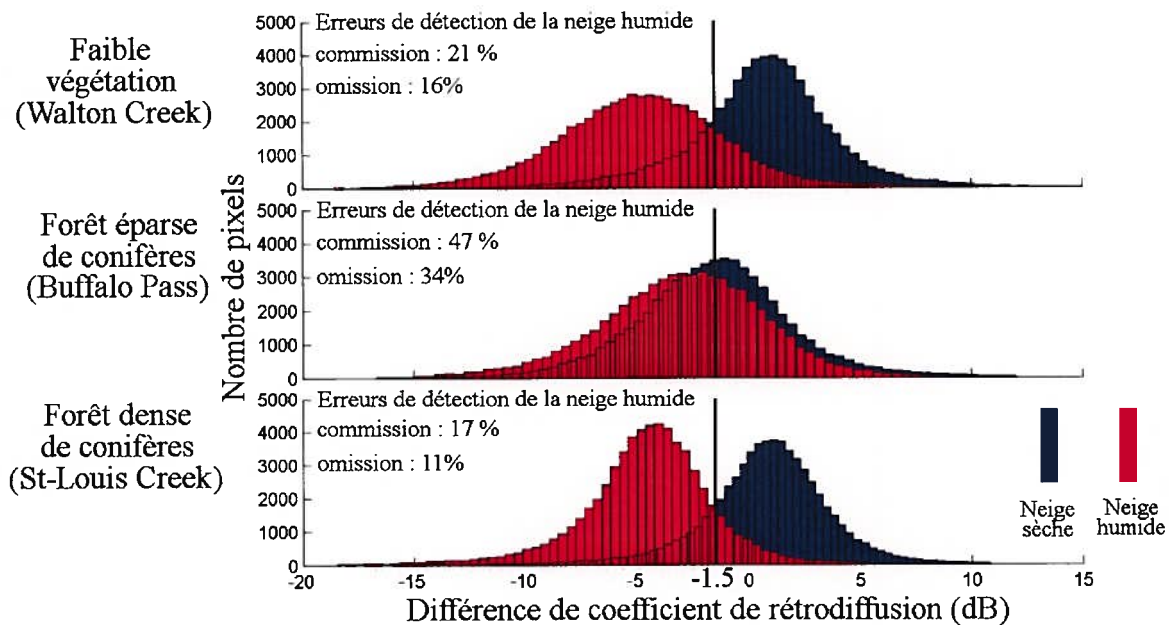


Figure 5.12 : Histogrammes des différences de coefficients de rétrodiffusion, polarisation DD, bande C pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude

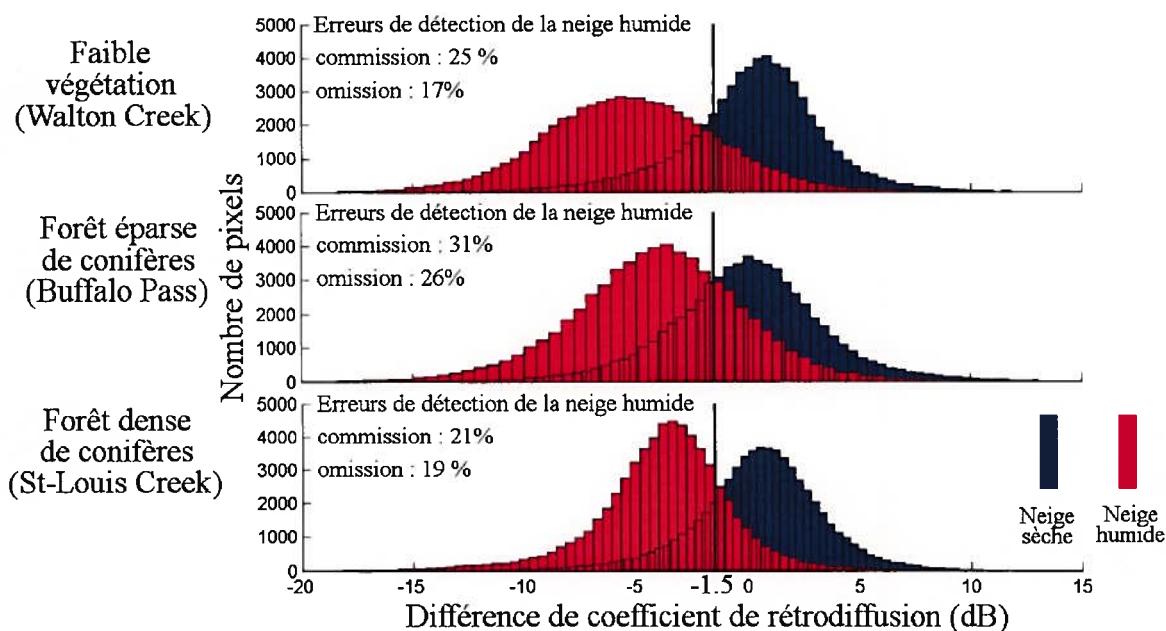


Figure 5.13 : Histogrammes des différences de coefficients de rétrodiffusion, polarisation GG, bande C, pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude

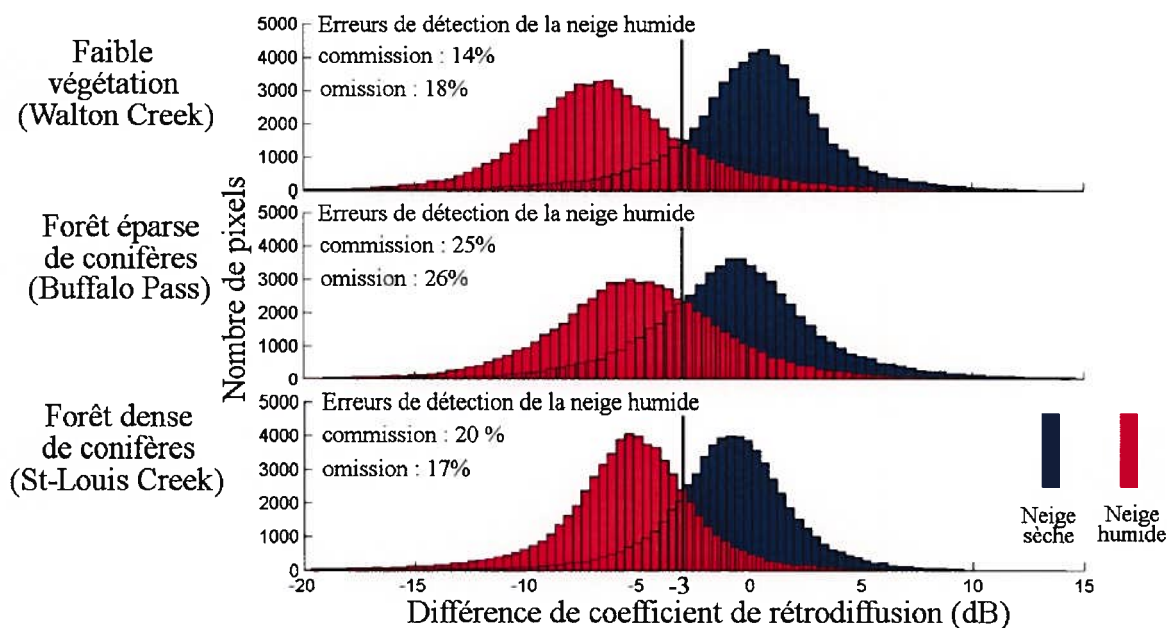


Figure 5.14 : Histogrammes des différences de coefficients de rétrodiffusion, polarisation DG, bande C, pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude

La matrice d'erreurs de cette méthode, appliquée sur les puits à neige des images pour les polarisations DD, GG et DG est donnée dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Matrice d'erreurs (en %) pour les trois sites d'études, seuillage de la différence (en dB) en bande C entre une image d'hiver et une image en condition de neige sèche, polarisation circulaire

		Polarisation DD seuil à -1.5 dB		Polarisation GG seuil à -1.5 dB		Polarisation DG seuil à -3 dB		
		Données des puits à neige						
		Neige	sèche	humide	Sèche	humide	sèche	humide
Faible végétation (Walton Creek)	Classification à l'aide de l'image radar	sèche	100	13	100	13	100	0
		humide	0	87	0	87	0	100
Forêt éparse de conifères (Buffalo Passe)	Classification à l'aide de l'image radar	sèche	94	44	100	34	94	22
		humide	6	56	0	66	6	78
Forêt dense de conifères (St- Louis Creek)	Classification à l'aide de l'image radar	sèche	100	9	100	13	100	6
		humide	0	91	0	87	0	94

Les histogrammes et le tableau 5.2 montrent que la polarisation circulaire DG donne les meilleurs résultats. On remarque une amélioration par rapport à la technique utilisant les polarisations linéaires HH, VV ou HV pour le site de forêt dense de conifères, mais on observe des erreurs plus élevées pour le site de forêt éparse de conifères. Par conséquent, une combinaison de la polarisation linéaire (HH, VV, HV) et circulaire (DD, GG, DG) pourraient permettre une amélioration de la discrimination de l'état de la neige sous différents types et densités de couverts forestiers.

5.1.2 Techniques multifréquence, multipolarisation

Différentes techniques multifréquences, multipolarisation ont été testées. Les paramètres analysés sont le rapport de polarisations croisées (HV / VV ou HV / HH), le rapport de

copolarisation (HH / VV), ainsi que des rapports de bandes en décibel pour chaque polarisation.

Shi et Dozier, (1997) ont montré que le rapport de polarisations croisées ainsi que le rapport de copolarisation permettent de distinguer un couvert de neige humide d'une zone sans neige. Tout comme Holden *et al.* (1998), nos résultats obtenus avec ces deux paramètres ne sont pas concluants. En effet, aussi bien le rapport de polarisations croisées que le rapport de copolarisation en bandes C, L et P, déduits des données de CLPX, ne montrent pas de variation entre le couvert de neige sèche et le couvert de neige humide.

Nous avons vu que le coefficient de rétrodiffusion en bande C est influencé par l'état de la neige et par la présence d'un couvert forestier (figures 5.1, 5.2, 5.3) et que les coefficients de rétrodiffusion en bande L et en bande P sont influencés par le couvert forestier mais non par l'état de la neige (figures 5.7, 5.8). Ainsi, la combinaison de la bande C et de la bande L, ou de la bande C et de la bande P nous permet de développer de nouvelles techniques de discrimination de l'état de la neige (sec ou humide) peu importe le couvert forestier. Des rapports de bandes en décibel donnent les meilleurs résultats. Aucun rapport utilisant la bande P ne permet de discriminer l'état de la neige, peu importe le couvert forestier. Quatre rapports utilisant les bandes C et L permettent d'attribuer aux trois sites d'étude (faible végétation, forêt éparse de conifères et forêt dense de conifères) un seuil commun de discrimination de l'état de la neige. Ce seuil est fixé en fonction des statistiques des images de rapport masquées des seize puits à neige. Les matrices d'erreurs des rapports issus des seize puits à neige permettant de valider le seuil commun aux trois sites d'études sont présentées dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3 : Matrices d'erreurs (en %) pour les trois sites d'études, seuillage des rapports de bandes multipolarisations

		L_{HH} / C_{HH} seuil à 1.3		L_{HV} / C_{HH} seuil à 2.5		L_{HV} / C_{HV} seuil à 1.0		L_{VV} / C_{HH} seuil à 1.5		
		Données des puits à neige								
		Neige	sèche	humide	sèche	humide	sèche	humide	sèche	humide
Faible végétation (Walton Creek)	Classification à l'aide des images radar	sèche	100	0	100	13	100	19	100	0
		humide	0	100	0	87	0	81	0	100
Forêt éparse de conifères (Buffalo Pass)		sèche	100	38	100	31	94	16	100	19
		humide	0	62	0	69	6	84	0	81
Forêt dense de conifères (St-Louis Creek)		sèche	94	0	100	0	100	0	87	0
		humide	6	100	0	100	0	100	13	100

L'analyse des histogrammes montre qu'à partir d'un certain seuil fixé à 1.3, le rapport $\sigma_{LHH}^0 / \sigma_{CHH}^0$ permet de discriminer la neige humide de la neige sèche pour les trois sites d'étude. La matrice d'erreurs générée en appliquant ce seuil au rapport $\sigma_{LHH}^0 / \sigma_{CHH}^0$ des seize puits à neige montre une bonne détection de la neige humide pour le site de faible végétation et pour le site de forêt dense de conifères, mais ce rapport ne permet pas de détecter la neige humide sur le site de forêt éparse de conifères.

L'analyse des histogrammes du rapport $\sigma_{LHV}^0 / \sigma_{CHH}^0$ permet de fixer un seuil de 2.5 pour la discrimination de la neige sèche et de la neige humide. On obtient une bonne détection de la neige humide pour le site de forêt dense de conifères. Par contre, des erreurs surviennent dans la détection de la neige humide pour le site de faible végétation (13%) et pour le site de forêt éparse de conifères (31%).

Il est également possible d'établir un seuil commun aux trois sites d'étude avec le rapport $\sigma^0_{LHV} / \sigma^0_{CHV}$. À partir des histogrammes, le seuil est établi à 1.0. La matrice d'erreurs montre une bonne détection de la neige humide pour le site de forêt dense de conifères. Par contre des erreurs supérieures à 15% sont observées pour la détection de la neige humide pour le site de faible végétation (19%) et le site de forêt éparse de conifères (16%).

Les histogrammes du rapport $\sigma^0_{LVV} / \sigma^0_{CHH}$ permettent aussi d'établir un seuil commun aux trois sites d'étude. Ce seuil est fixé à 1.5. La matrice d'erreurs est générée en appliquant ce seuil aux puits à neige des images. On observe une bonne détection de la neige humide pour le site de faible végétation. Par contre des erreurs de 19% apparaissent pour la détection de la neige humide du site de forêt éparse de conifères et des erreurs de 13 % pour la détection de la neige sèche du site de forêt dense de conifères.

Le rapport $\sigma^0_{LHH} / \sigma^0_{CHH}$ donne les meilleurs résultats de discrimination de l'état de la neige sur les sites de faible végétation et de forêt dense de conifères, mais présentent des erreurs élevées (>30%) sur le site de forêt éparse de conifères. Une raison possible que nous avançons, mais qui reste à vérifier, est que les rapports de bandes en décibel corrigent l'effet de la diffusion de volume du couvert forestier mais pas celui de la diffusion de double réflexion, présent principalement dans une forêt éparse. Ainsi, cette technique ne peut être efficace que pour une région de faible végétation ou une forêt dense.

5.1.3 Signature polarimétrique

La signature polarimétrique est une méthode graphique permettant de visualiser la réponse normalisée d'une cible comme une fonction des polarisations incidentes et rétrodiffusées. Elle peut être analysée qualitativement par sa forme et la position minimal et maximal de l'orientation (ψ) et de l'ellipticité (χ); et quantitativement par sa hauteur de socle. Les signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée ont été générées pour les bandes C, L et P.

Les figures 5.15 et 5.16 montrent les signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée en bande C pour des conditions de neige sèche et humide pour les trois sites d'étude.

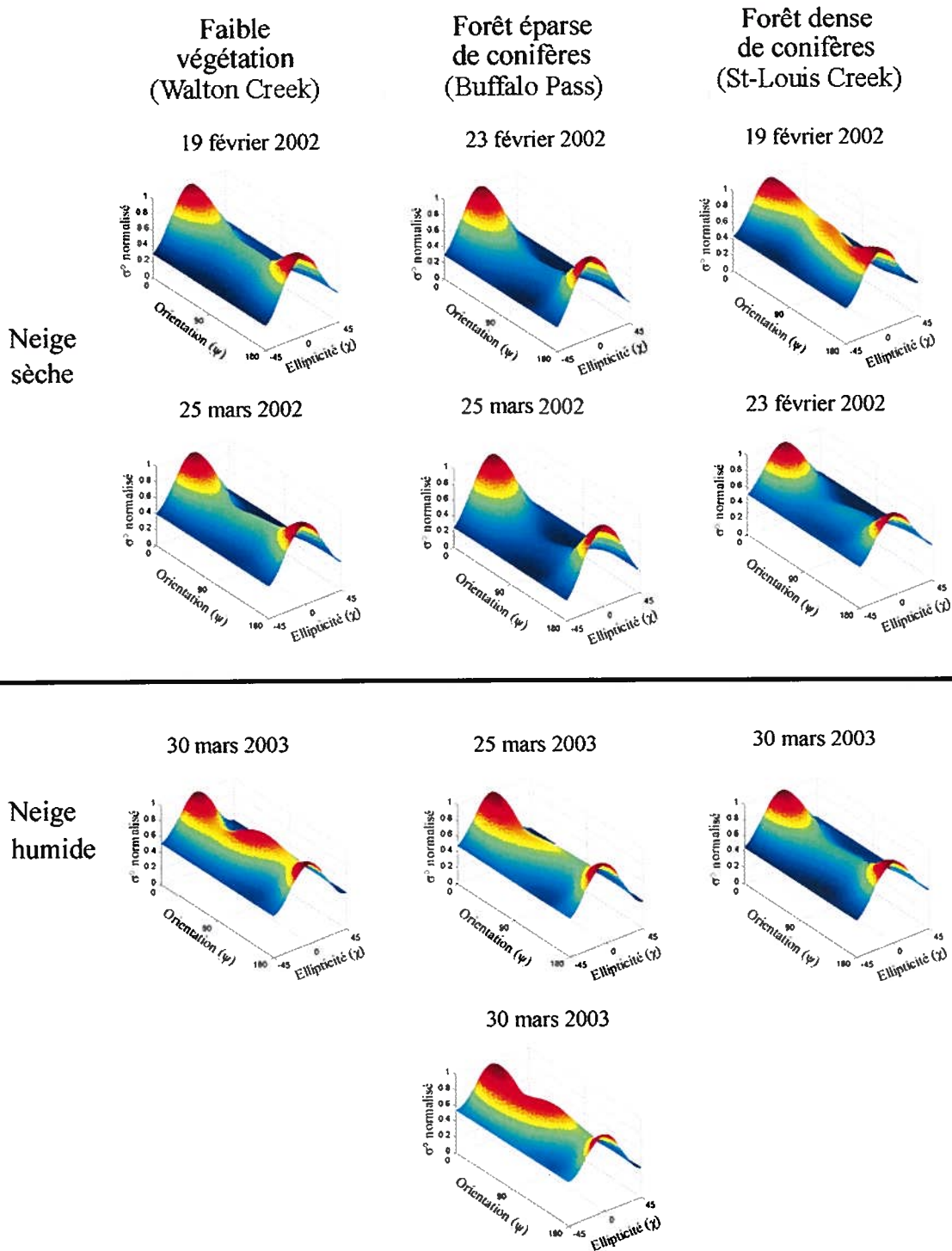


Figure 5.15 : Signatures polarimétriques co-polarisée en bande C pour des conditions de neige sèche et humide

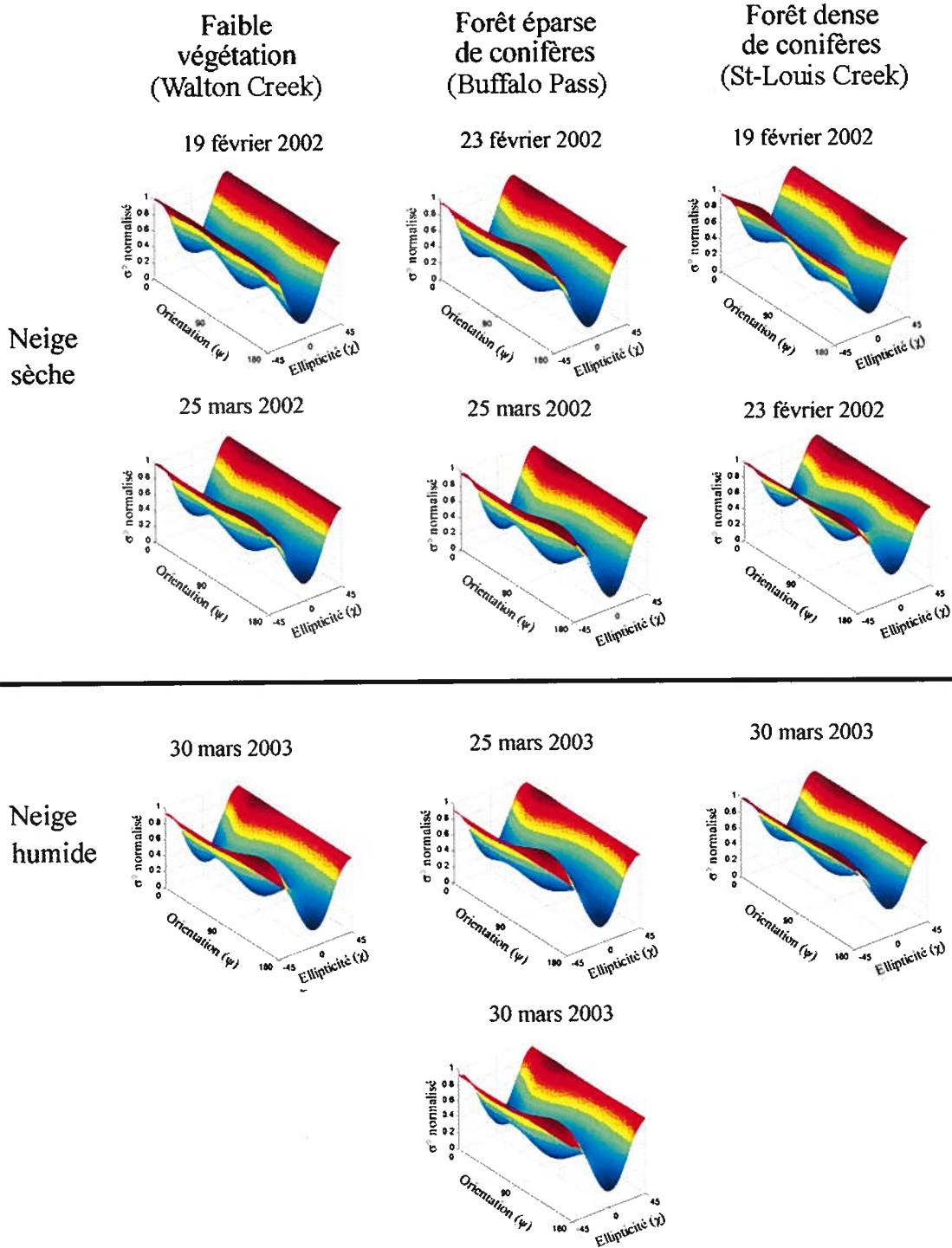


Figure 5.16 : Signatures polarimétriques ortho-polarisée en bande C pour des conditions de neige sèche et humide

La forme générale des signatures polarimétriques co-polarisées en bande C varie en fonction de l'état de la neige. Des résultats similaires ont été obtenus par Sokol et al. (2003). En condition de neige sèche, la forme des signatures polarimétriques montre des pics pour une orientation $\psi = 0^\circ$ et $\psi = 180^\circ$ et pour une ellipticité $\chi = 0^\circ$, soit la polarisation horizontale. On observe un creux pour une orientation $\psi = 90^\circ$. Ainsi, le signal de la polarisation HH est supérieur au signal de la polarisation VV. Cette variation n'est pas observée pour l'image du 19 février 2002 du site de forêt dense de conifères. En condition de neige humide, on voit apparaître un pic pour orientation $\psi = 90^\circ$ et une ellipticité $\chi = 0^\circ$ pour le site de faible végétation et le site de forêt éparse de conifères. Les signaux en polarisation HH et VV sont donc similaires. Ce pic n'apparaît pas pour le site de forêt dense de conifères.

Contrairement aux signatures polarimétriques co-polarisées, la forme des signatures polarimétriques ortho-polarisées en bande C est très similaire en condition de neige sèche et humide pour les trois sites d'étude. On observe un creux pour une orientation $\psi = 0^\circ$, $\psi = 90^\circ$ et $\psi = 180^\circ$ et pour une ellipticité $\chi = 0^\circ$. La forme de ces signatures polarimétriques ortho-polarisées rappelle celle d'une diffusion de surface rugueuse (figures 3.8 et 3.9).

Les figures 5.17 et 5.18 montrent les signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée en bande L dans des conditions de neige sèche et humide pour les trois sites d'études.

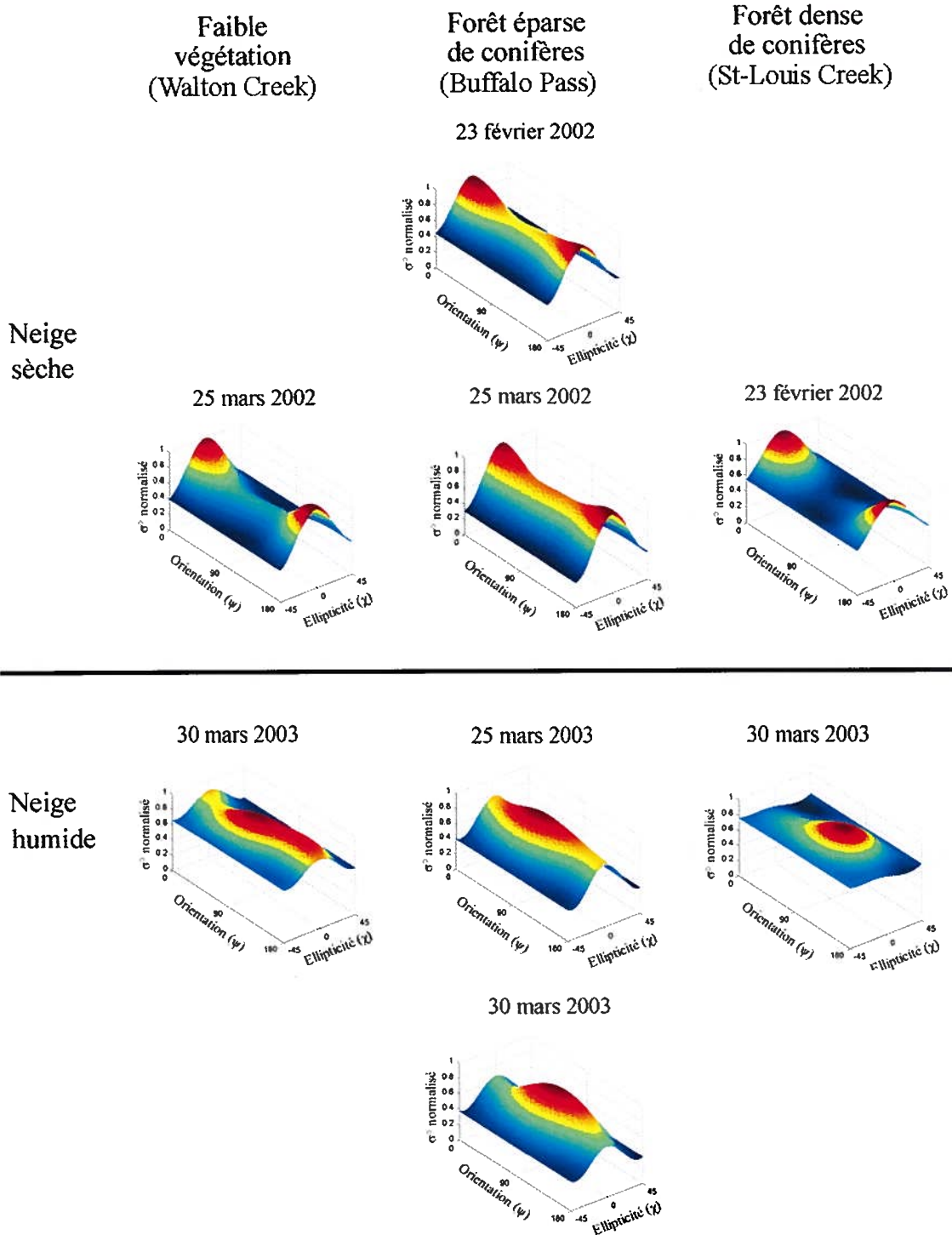


Figure 5.17 : Signatures polarimétriques co-polarisée en bande L pour des conditions de neige sèche et humide

Pour le site de faible végétation en condition de neige sèche, on observe une signature polarimétrique co-polarisée en bande L similaire à celle obtenue en bande C (figure 5.15). En condition de neige humide, on voit une augmentation de la réponse normalisée pour une orientation $\psi = 90^\circ$ et pour une ellipticité $\chi = 0^\circ$ (polarisation verticale) et une diminution de la réponse normalisée pour une orientation $\psi = 0^\circ$ et $\psi = 180^\circ$ et pour une ellipticité $\chi = 0^\circ$ (polarisation horizontale), par rapport aux signatures polarimétriques co-polarisées en bande L en condition de neige sèche.

La forme des signatures polarimétriques co-polarisée du site de forêt éparses de conifères en conditions de neige sèche rappelle celle d'une diffusion de surface moyennement rugueuse (figures 3.8 et 3.9). En condition de neige humide, on observe une augmentation par rapport aux signatures co-polarisées obtenues en condition de neige sèche pour une orientation $\psi = 90^\circ$ et pour une ellipticité $\chi = 0^\circ$ qui rappelle un dipôle orienté verticalement (figure 3.13). Cette augmentation pourrait s'expliquer par une plus grande sensibilité du signal au terme d'interaction en condition de neige humide.

Pour le site de forêt dense de conifères, on observe également une augmentation relative pour une orientation $\psi = 90^\circ$ et pour une ellipticité $\chi = 0^\circ$ pour la neige humide par rapport à la neige sèche.

Tout comme en bande C, les signatures polarimétriques ortho-polarisées en bande L montrent un creux pour une orientation $\psi = 0^\circ$, $\psi = 90^\circ$ et $\psi = 180^\circ$ et une ellipticité $\chi = 0^\circ$. Cette forme rappelle celle d'une diffusion de surface (figure 2.7, 2.8, 2.9). Pour le site de faible végétation et le site de forêt éparses de conifères, les signatures polarimétriques ortho-polarisées sont quasiment similaires pour des conditions de neige sèche et humide. Pour le site de forêt dense de conifères, le creux est moins important en condition de neige humide.

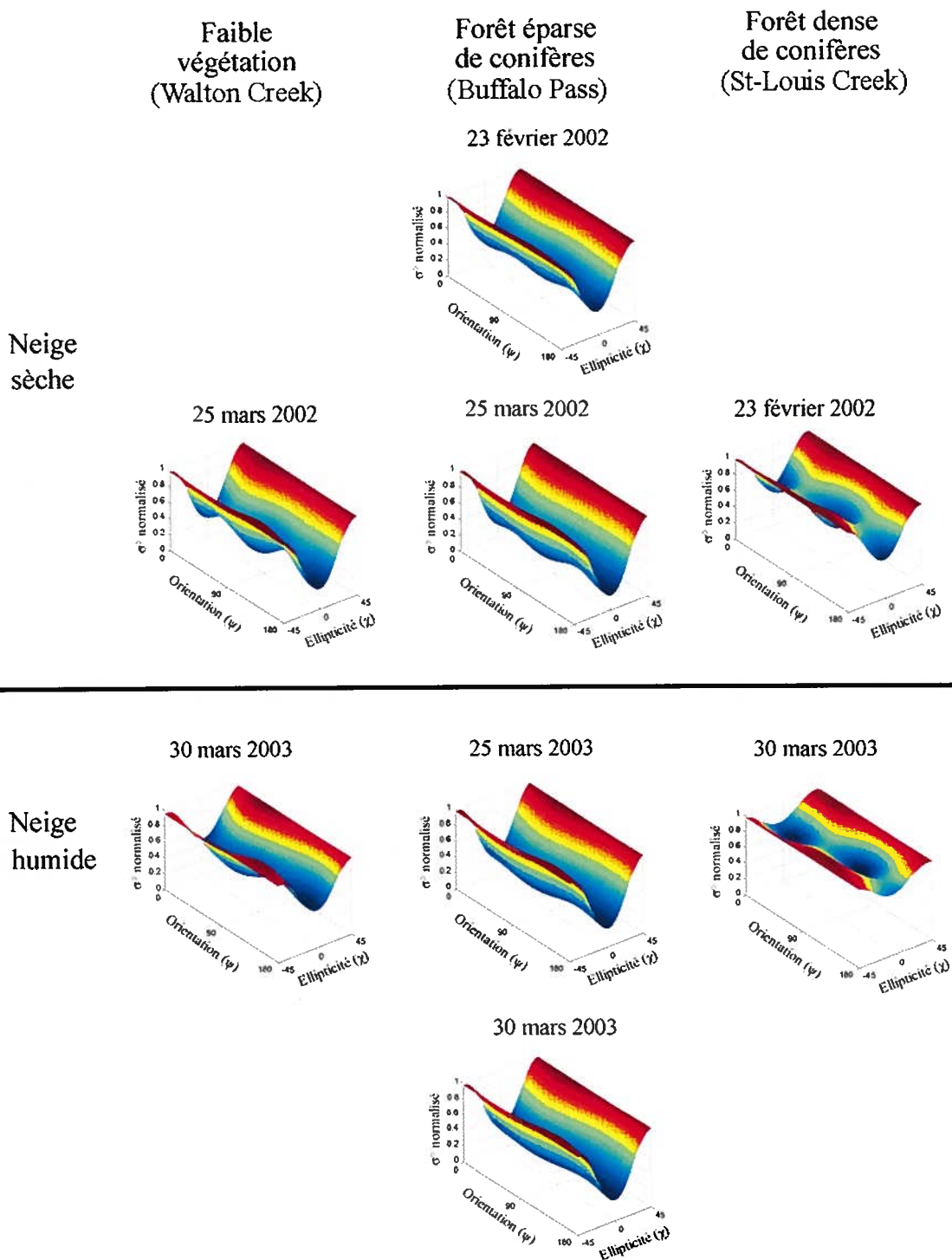


Figure 5.18 : Signatures polarimétriques ortho-polarisée en bande L pour des conditions de neige sèche et humide

Les figures 5.19 et 5.20 montrent les signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée en bande P pour des conditions de neige sèche et humide.

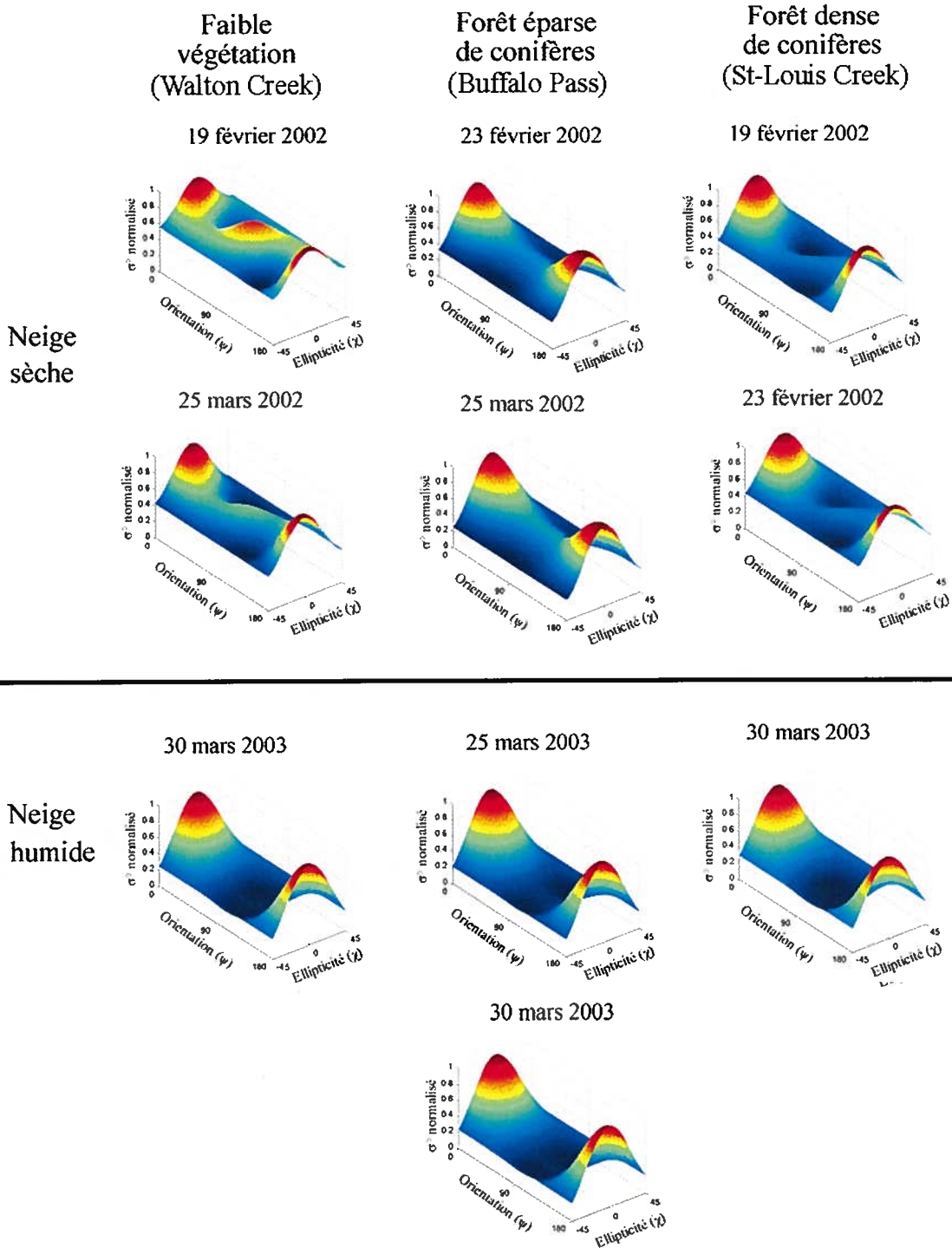


Figure 5.19 : Signatures polarimétriques co-polarisée en bande P pour des conditions de neige sèche et humide

En bande P, les signatures polarimétriques co-polarisées sont différentes entre les conditions de neige sèche et de neige humide. En condition de neige sèche, les signatures polarimétriques co-polarisée sont similaires à celles obtenues en en bande C (fig. 5.15). On retrouve globalement un pic pour une orientation $\psi = 0^\circ$ et $\psi = 180^\circ$ et pour une ellipticité $\chi = 0^\circ$ et un creux pour une orientation $\psi = 90^\circ$. En condition de neige humide, ce creux est amplifié et la forme de la signature polarimétrique co-polarisée rappelle celle d'un dipôle orienté horizontalement (figure 3.11).

Les signatures polarimétriques ortho-polarisées en bande P sont également différentes entre les conditions de neige sèche et de neige humide. En condition de neige sèche, le site de faible végétation et de forêt dense de conifères montre des pics pour une orientation $\psi \approx 45^\circ$ pour une ellipticité $\chi \approx 22.5^\circ$ ainsi que pour une orientation $\psi \approx 135^\circ$ pour une ellipticité $\chi \approx -22.5^\circ$. Pour le site de forêt éparse de conifères, la forme de la signature polarimétrique ortho-polarisée rappelle celle d'une diffusion de surface moyennement rugueuse (figures 3.8 et 3.9). En condition de neige humide, la forme des signatures polarimétriques ortho-polarisées rappelle celle d'un dipôle orienté horizontalement (figure 3.11).

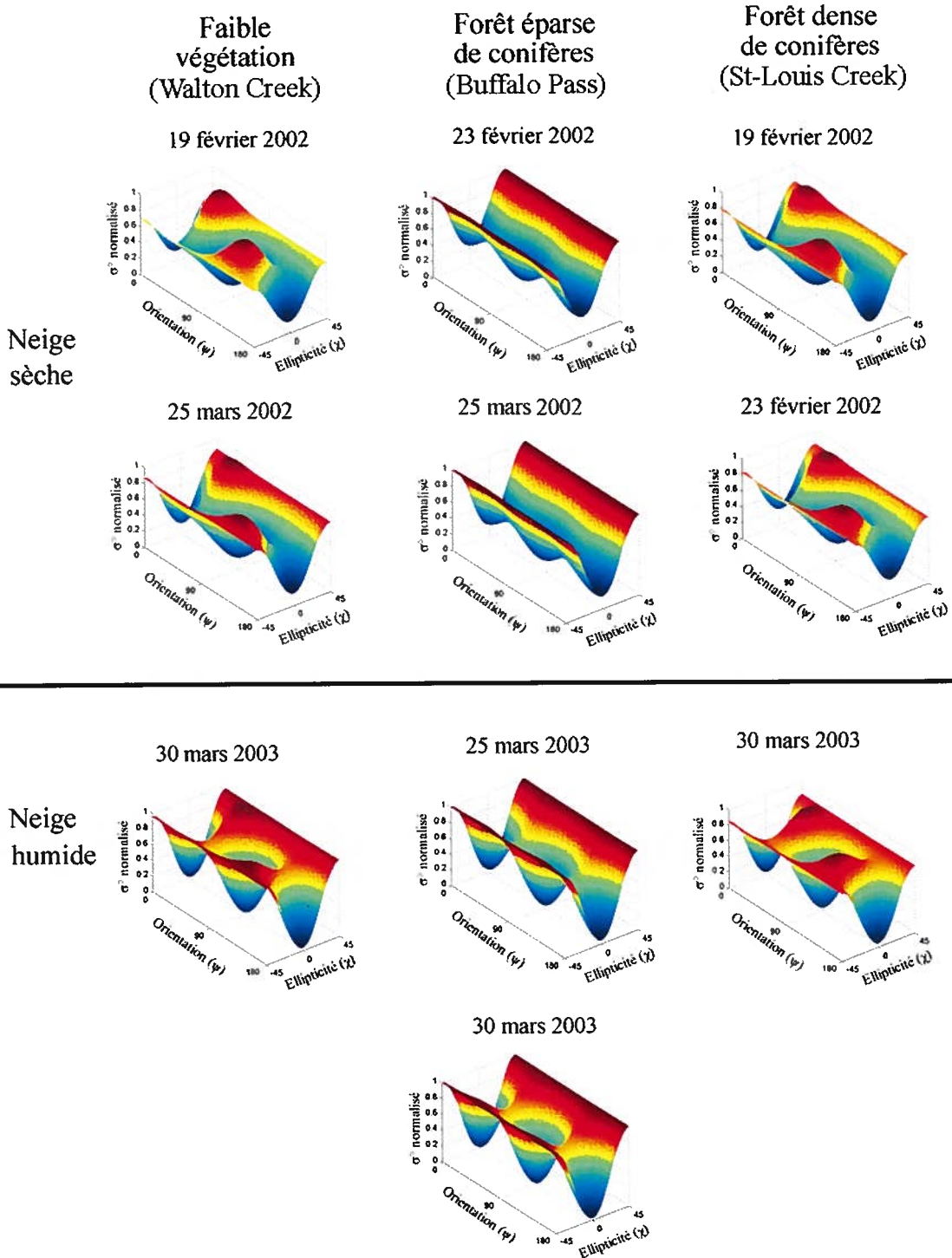


Figure 5.20 : Signatures polarimétriques ortho-polarisée en bande P pour des conditions de neige sèche et humide

L'analyse visuelle des signatures polarimétriques peut informer sur les tendances des différentes polarisations. Il est important de retenir que la réponse des signatures polarimétriques est normalisée à 1. Il n'est donc pas possible de comparer la réponse normalisée des signatures entre elles, mais bien leur forme générale. La hauteur de socle, elle, permet de faire une analyse quantitative de la signature polarimétrique. Elle est l'intensité minimale de la signature polarimétrique, une fois la réponse maximale normalisée à un. Des valeurs faibles de hauteur de socle indiquent qu'il y a peu de diffuseurs différents, alors que des valeurs élevées de hauteur de socle indiquent la présence de plusieurs diffuseurs ou la présence de bruit dans le capteur. Une diffusion de surface présente habituellement des valeurs de hauteur de socle faibles, alors qu'une diffusion de volume présente des valeurs de hauteur de socle plus élevées. Le tableau 5.4 montre les valeurs de la hauteur de socle des signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée, dans les trois bandes et pour les différentes conditions de neige.

Tableau 5.4 : Valeurs de la hauteur de socle pour les trois sites d'étude, en bande C, L et P

	Bande C		Bande L		Bande P	
	Co-polarisée	Ortho-polarisée	Co-polarisée	Ortho-polarisée	Co-polarisée	Ortho-polarisée
Faible végétation (Walton Creek)						
neige sèche	0.28	0.18	0.36	0.25	0.33	0.14
neige humide	0.42	0.20	0.56	0.43	0.06	0.03
Forêt éparses de conifères (Buffalo Pass)						
neige sèche	0.17	0.14	0.30	0.18	0.22	0.15
neige humide	0.31	0.20	0.31	0.26	0.04	0.02
Forêt dense de conifères (St-Louis Creek)						
neige sèche	0.39	0.23	0.47	0.48	0.22	0.13
neige humide	0.43	0.34	0.67	0.68	0.06	0.05

La hauteur de socle co-polarisée et ortho-polarisée en bandes C et L pour des conditions de neige humide est toujours supérieure à celle en condition de neige sèche. Le signal est donc plus dépolarisé. L'augmentation de la hauteur de socle en condition de neige humide peut s'expliquer par une diminution du rapport signal / bruit. Conformément à nos attentes, on remarque une augmentation de la hauteur de socle pour le site de forêt dense de conifères par rapport aux deux autres sites. Par contre, en bandes C et L, il n'est pas possible d'établir un seuil commun aux trois sites d'étude en utilisant la hauteur de socle. En bande P, la hauteur de socle des signatures polarimétriques co-polarisée et ortho-polarisée montre les plus grandes variations entre les couverts de neige sèche et humide. En effet, on observe une baisse importante de la hauteur de socle pour les conditions de neige humide. En fixant un seuil de 0.15 pour la signature co-polarisée et un seuil de 0.07 pour la signature ortho-polarisée, en bande P, il est possible de discriminer la neige humide de la neige sèche pour les trois sites d'étude. Le tableau 5.5 montre la matrice d'erreurs en bande P issue de la hauteur de socle des seize puits à neige; elle permet valider cette méthode sur les trois sites d'études.

Tableau 5.5 : Matrices d'erreurs (%) pour les trois sites d'études, seuillage de la hauteur de socle en bande P

		Données des puits à neige				
		Neige	Hauteur de socle co-polarisée seuillage à 0.15		Hauteur de socle ortho-polarisée seuillage à 0.07	
			sèche	humide	sèche	humide
Faible végétation (Walton Creek)	Classification à l'aide de l'image radar	sèche	97	0	97	0
		humide	3	100	3	100
Forêt éparse de conifères (Buffalo Pass)		sèche	100	0	100	6
		humide	0	100	0	94
Forêt dense de conifères (St-Louis Creek)		sèche	100	0	97	0
		humide	0	100	3	100

L'utilisation de la hauteur de socle co-polarisée et ortho-polarisée en bande P permet de discriminer l'état de la neige avec des erreurs inférieures à 6% peu importe la couverture forestière.

5.1.4 Décomposition de Freeman-Durden

La décomposition de Freeman-Durden décompose la cible en trois mécanismes de diffusion : diffusion de surface (P_S), diffusion de volume (P_V) et diffusion de double réflexion (P_{DR}). Ces trois paramètres sont évalués pour les images en condition de neige sèche et en condition de neige humide pour les trois bandes (C, L et P).

Les figures 5.21 et 5.22 montrent un composé couleur des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande C pour les trois sites d'étude en condition de neige sèche et neige humide respectivement. La puissance de diffusion de surface (dB) est en rouge, la puissance de diffusion de volume (dB) en vert et la puissance de diffusion de double réflexion (dB), en bleu. Les histogrammes de chacun des paramètres sont également illustrés.

En bande C et en condition de neige sèche, on observe une diminution de la puissance de diffusion de surface et une augmentation de la puissance de diffusion de volume pour le site de forêt dense de conifères par rapport aux deux autres sites d'étude, comme attendu (Freeman *and* Durden, 1998). La puissance de diffusion de double réflexion des sites de forêt éparse de conifères et forêt dense de conifères présente deux pics résultants probablement de deux mécanismes. Un des pics observé provient certainement de l'interaction entre les différentes couches du couvert nival. L'autre pic observé provient probablement de la diffusion de double réflexion entre le couvert forestier et le couvert nival.

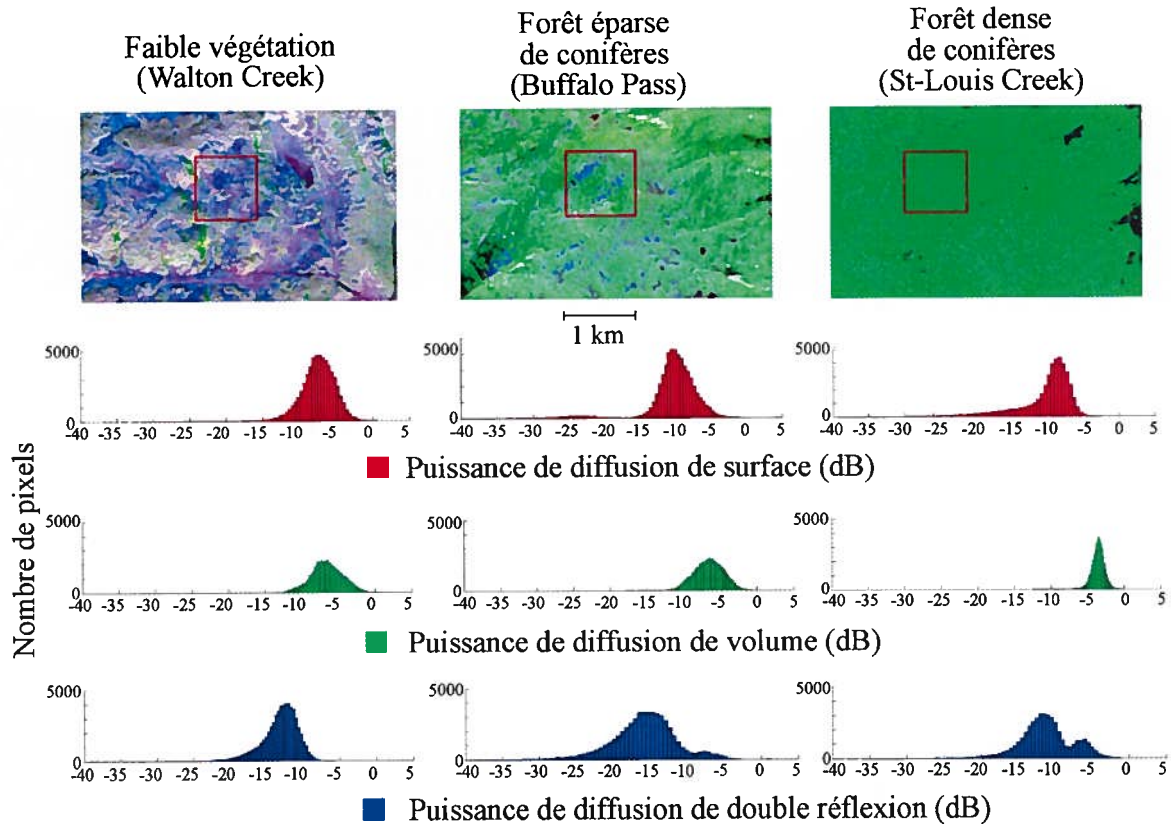


Figure 5.21 : Composés couleur et histogrammes des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande C pour les trois sites d'étude en condition de neige sèche

En condition de neige humide, on observe une diminution de la puissance de diffusion de volume d'environ 5 dB par rapport à la puissance de diffusion de volume observé en condition de neige sèche. En effet, lorsque la neige est humide, le signal pénètre moins la couche de neige. La puissance de diffusion de volume est donc plus faible (Ulaby *et al.*, 1982). La diffusion de surface est également plus faible d'environ 5 dB pour les conditions de neige humide que pour les conditions de neige sèche. Il est ainsi possible d'appliquer un seuil sur la puissance de la diffusion de surface et la puissance de la diffusion de volume en bande C afin de discriminer l'état de la neige. En condition de neige humide, un seul pic apparaît sur l'histogramme de la puissance de diffusion de double réflexion. Ce qui est normal dans la mesure où le terme d'interaction se résume uniquement à l'interaction couvert forestier / neige humide. Comme attendu, le site de forêt éparse de conifères présente une plus grande diffusion

de double réflexion en condition de neige humide causée par une plus grande interaction entre le couvert nival et le couvert forestier (Magagi *et al.*, 2002).

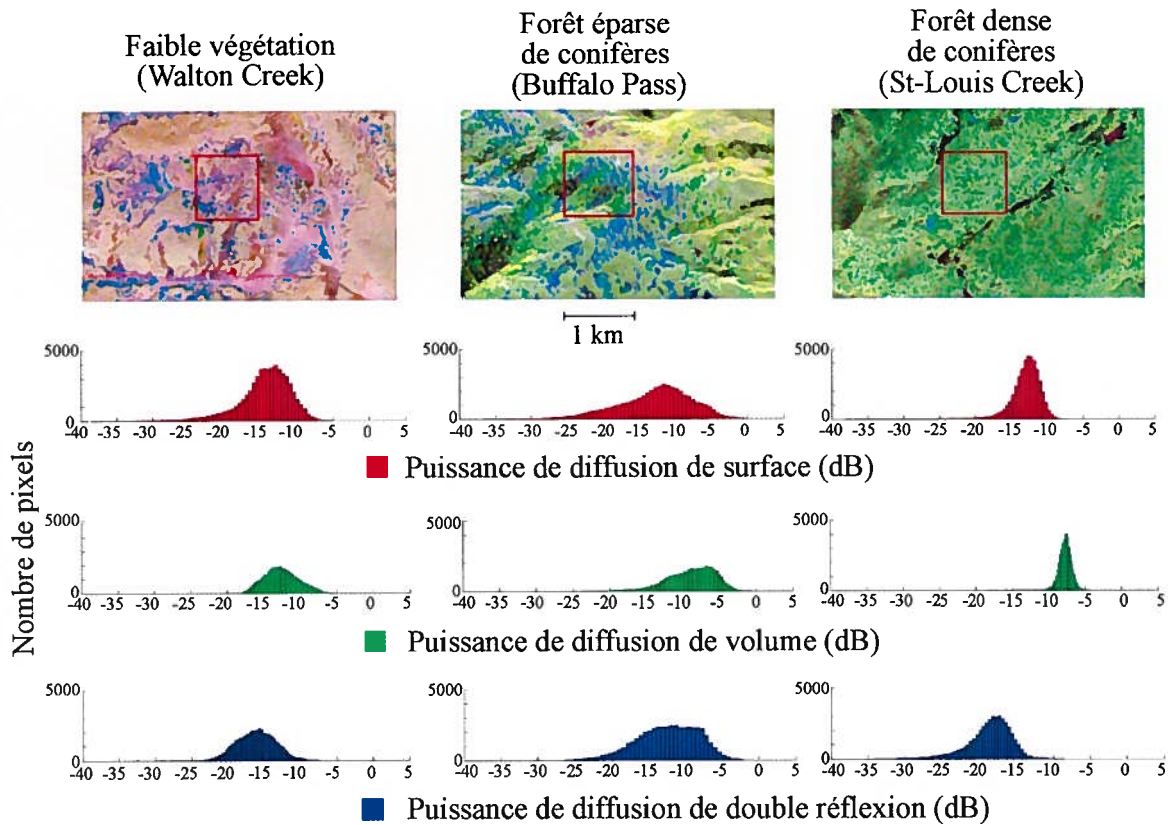


Figure 5.22 : Composés couleur et histogrammes des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande C pour les trois sites d'étude en condition de neige humide

En effectuant une différence entre l'image de puissance d'hiver et une image de puissance en condition de neige sèche, il est possible d'établir un seuil afin de différencier l'état de la neige. En bande C, le seuil est établi à -3 dB pour la différence de puissance de diffusion de volume (figure 5.23) et à -4 dB pour la différence de puissance de diffusion de surface (figure 5.24) selon les statistiques (moyenne et écart type) des images. La différence d'image de puissance de diffusion de double réflexion ne permet pas d'établir un seuil discriminant l'état de la neige. Les matrices d'erreurs générées à partir des puissances de diffusion de volume et de surface des seize puits à neige sont montrées dans le tableau 5.6.

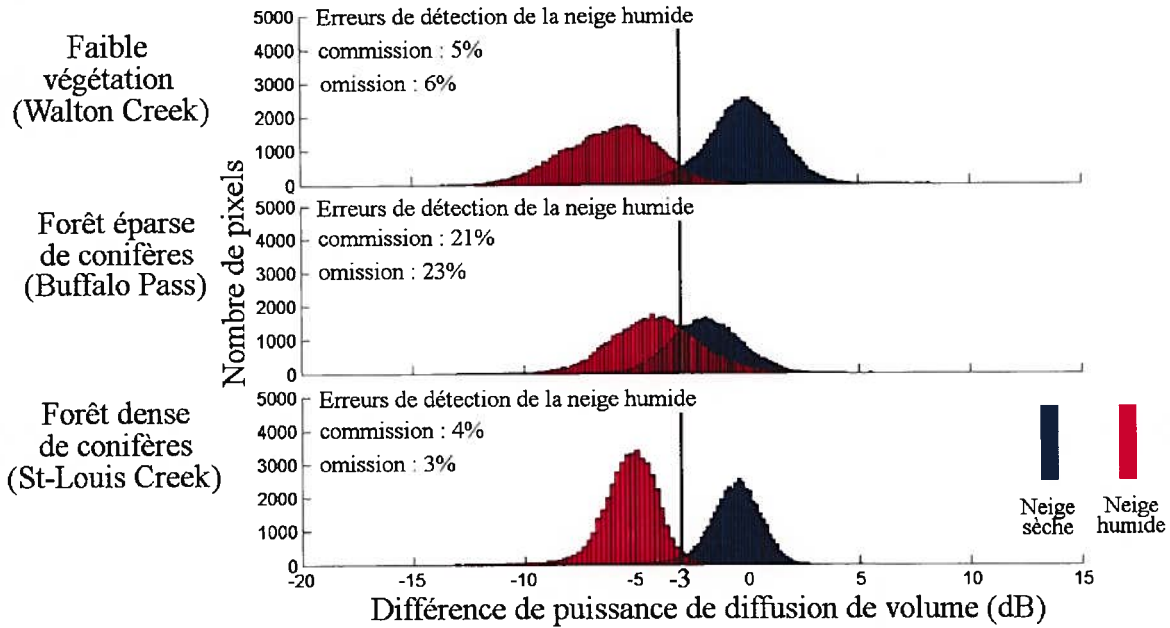


Figure 5.23 : Histogrammes des différences de puissance de diffusion de volume, bande C, pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude

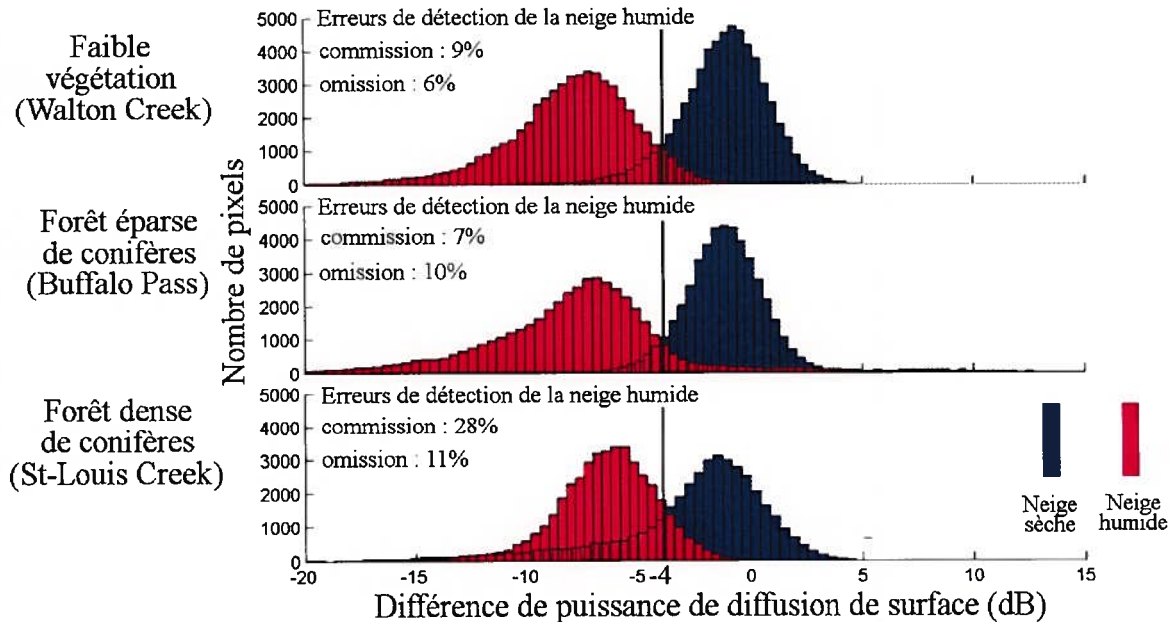


Figure 5.24 : Histogrammes des différences de puissance de diffusion de surface, bande C, pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude

Tableau 5.6 : Matrices d'erreurs (%) pour les trois sites d'études, seuillage de la différence d'images (en dB) en bande C entre une image d'hiver et une image en condition de neige sèche, décomposition de Freeman-Durden

		Puissance de diffusion de volume, seuil de - 3dB			Puissance de diffusion de surface, seuil de - 4dB	
		Données des puits à neige				
		Neige	Sèche	humide	sèche	Humide
Faible végétation (Walton Creek)	Classification à l'aide de l'image radar	sèche	100	0	100	0
		humide	0	100	0	100
Forêt éparsée de conifères (Buffalo Pass)		sèche	94	16	81	6
		humide	6	84	19	94
Forêt dense de conifère (St-Louis Creek)		sèche	100	0	69	0
		humide	0	100	31	100

Tout comme la figure 5.23, le tableau 5.6 montre que la technique utilisant la différence de diffusion de volume donne de bons résultats pour les sites de faible végétation et de forêt dense de conifères. Les erreurs restent élevées pour le site de forêt éparsée de conifères. Par ailleurs, la technique utilisant la différence de diffusion de surface donne de bons résultats, surtout sur le site de forêt éparsée de conifères (figure 5.24). En effet, comparé aux erreurs de détection de la neige humide issue de la différence de diffusion de volume, une amélioration est observée sur les histogrammes de l'image du site de forêt éparsée de conifères. Cependant, en présence d'un couvert forestier, sur les puits à neige, des erreurs significatives apparaissent dans la matrice d'erreurs.

Les figures 5.25 et 5.26 montrent un composé couleur des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande L pour les trois sites d'étude en condition de neige sèche et humide, respectivement. La puissance de diffusion de surface (dB) est en rouge, la puissance de diffusion de volume (dB) en vert et la puissance de diffusion de double réflexion (dB), en bleu. Les histogrammes de chacun des paramètres sont également illustrés.

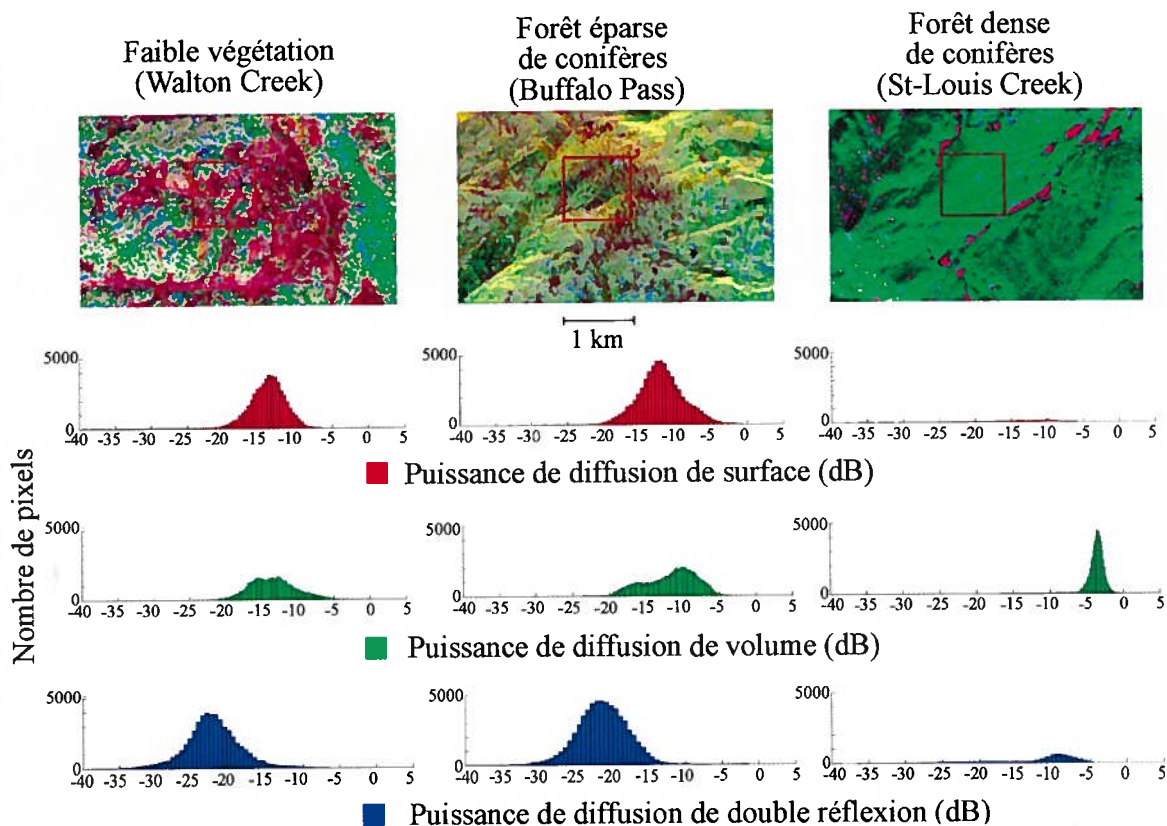


Figure 5.25 : Composés couleur et histogrammes des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande L pour les trois sites d'étude en condition de neige sèche

En bande L, en condition de neige sèche, on observe une augmentation de la diffusion de volume entre les sites de faible végétation et de forêt éparse de conifères ainsi qu'entre le site de forêt éparse et de forêt dense de conifères, comme attendu. En fait, pour le site de forêt dense de conifères, on observe pratiquement que de la diffusion de volume.

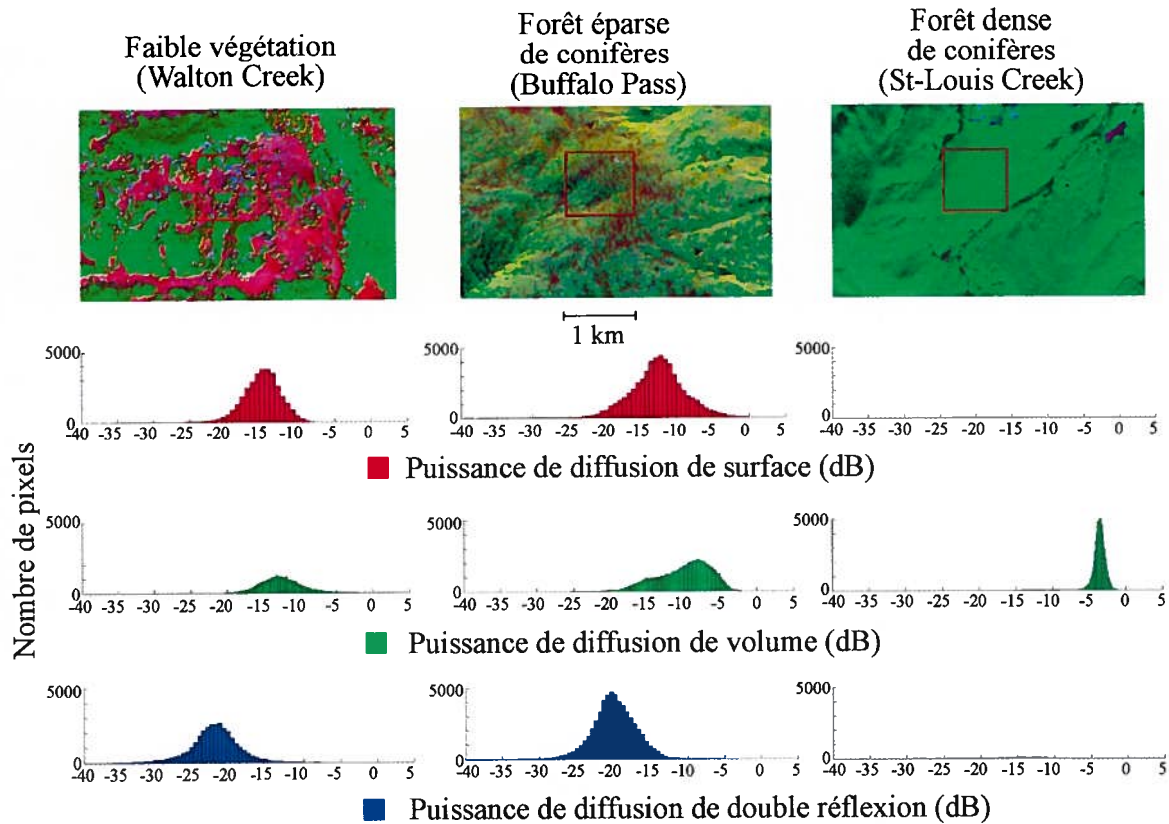


Figure 5.26 : Composés couleur et histogrammes des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande L pour les trois sites d'étude en condition de neige humide

Les images et histogrammes des trois paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande L (figures 5.25 et 5.26) sont très similaires en condition de neige sèche et de neige humide. En bande L, il n'est donc pas possible d'établir un seuil permettant de détecter la neige humide à l'aide de la décomposition de Freeman-Durden.

Les figures 5.27 et 5.28 montrent un composé couleur des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande P pour les trois sites d'étude en condition de neige sèche et neige humide respectivement. La puissance de diffusion de surface (dB) est en rouge, la puissance de diffusion de volume (dB) en vert et la puissance de diffusion de double réflexion (dB), en bleu. Les histogrammes de chacun des paramètres sont également illustrés.

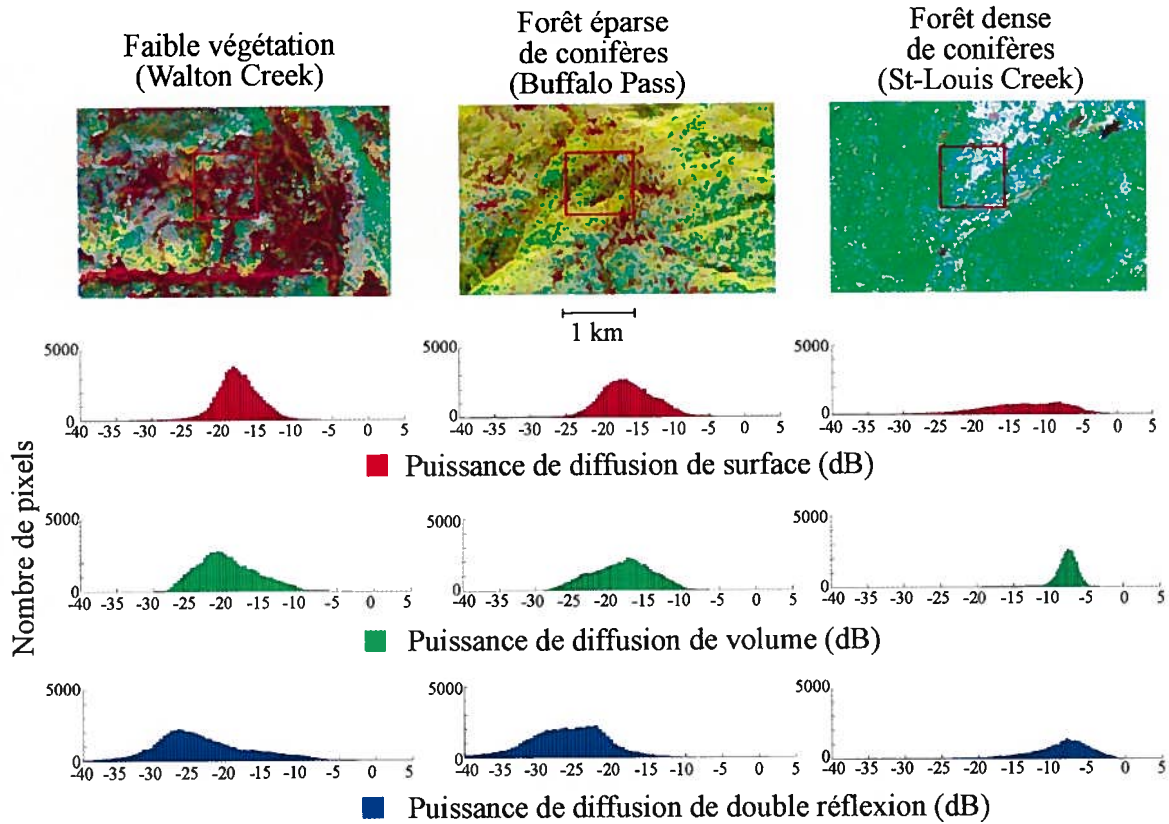


Figure 5.27 : Composés couleur et histogrammes des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande P pour les trois sites d'étude en condition de neige sèche

En bande P tout comme en bande L, en condition de neige sèche, on observe peu de variation entre le site de faible végétation et le site de forêt épaisse de conifères. Le site de forêt dense montre une augmentation de la puissance de diffusion de volume et de double réflexion (Fung, 1994).

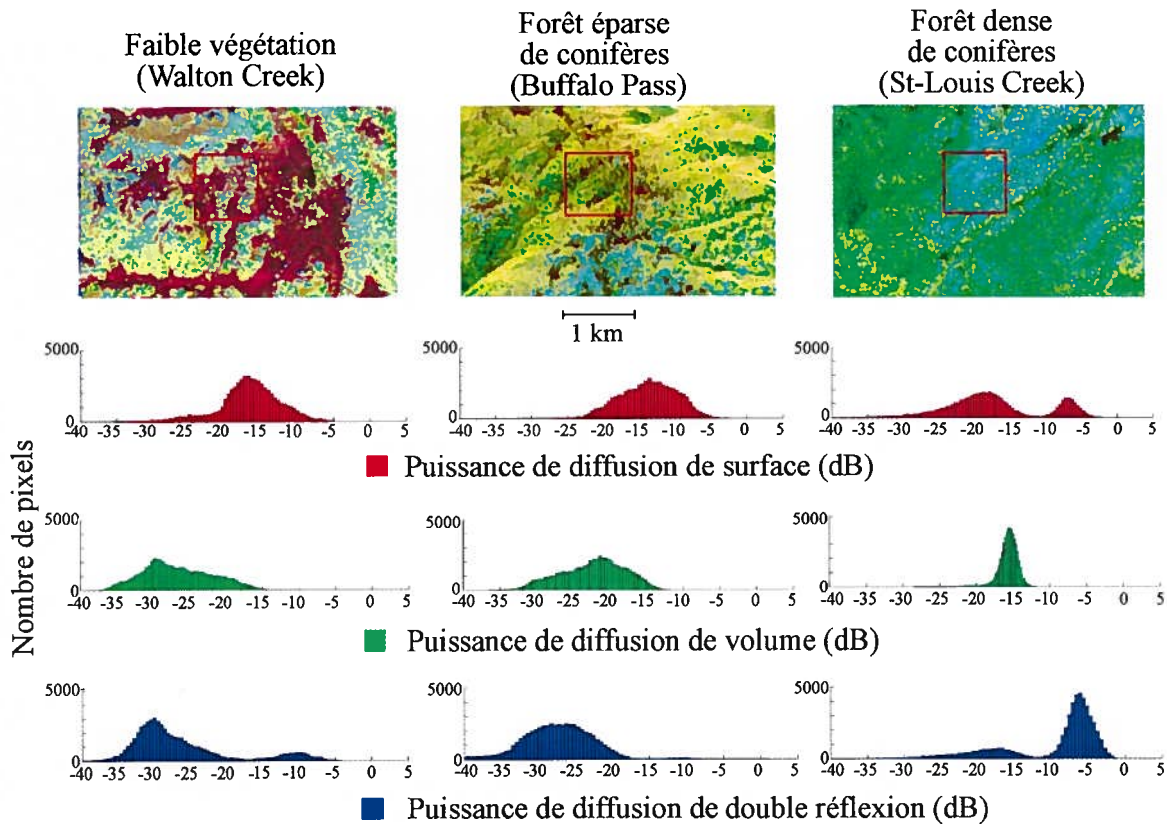


Figure 5.28 : Composés couleur et histogrammes des paramètres de la décomposition de Freeman-Durden en bande P pour les trois sites d'étude en condition de neige humide

En condition de neige humide, on observe une légère augmentation de la puissance de diffusion de surface pour les trois sites d'étude par rapport à la puissance de diffusion de surface en condition de neige sèche. On observe également une légère diminution de la diffusion de volume pour le site de faible végétation et une diminution de la puissance de diffusion de volume d'environ 5 dB pour le site de forêt dense de conifères. Le site de forêt dense de conifères présente également une augmentation de la diffusion de double réflexion (Magagi *et al.*, 2002). Par contre, tout comme en bande L, il n'est pas possible d'établir un seuil commun aux trois sites d'étude permettant de détecter la neige humide.

5.1.5 Décomposition de Cloude-Pottier

La décomposition de Cloude-Pottier décompose la cible en trois paramètres : l'entropie (H), l'anisotropie (A) et l'angle α . Un graphique de l'angle α en fonction de l'entropie (H) permet de classer les différents mécanismes de diffusion (figure 3.15). Les graphiques de l'angle α en fonction de l'entropie (H) réalisés pour les bandes C, L et P sont présentés dans les figures 5.29, 5.30, 5.31, respectivement.

En bande C, le site de faible végétation présente une entropie moyenne, la diffusion est donc dépolarisée. En condition de neige sèche, le maximum d'occurrence (zone rouge) des valeurs d'angle α se situe principalement dans la zone de diffusion de surface. On retrouve une faible occurrence (zone bleue) de données où l'angle α se retrouve dans la zone de diffusion de volume (figure 3.15). En condition de neige sèche, le signal provient principalement de la diffusion de surface à l'interface neige / sol, ainsi que de la diffusion de volume du couvert de neige (Ulaby *et al.*, 1986). En condition de neige humide, on observe une augmentation ($\sim 5^\circ$) du maximum d'occurrence (zone rouge) des valeurs d'angle α pour les conditions de neige humide par rapport aux conditions de neige sèche. On observe donc une augmentation de la diffusion de volume par rapport à la diffusion de surface. On observe également une faible occurrence de données dans la zone de diffusion de double réflexion. En condition de neige humide le signal provient principalement de la diffusion de surface à l'interface air / neige (Ulaby *et al.*, 1986). Par contre, avec un angle d'incidence de 55° , il est possible que le signal soit rétrodiffusion spéculairement par la surface. Ainsi, le signal redirigé vers l'antenne est de moindre énergie. Lorsque le signal est fortement atténué, même une très faible pénétration correspond à une diffusion de volume. Le rapport signal sur bruit est également plus faible. Cette diminution de rapport signal sur bruit explique également la faible augmentation d'entropie observée en condition de neige humide par rapport aux conditions de neige sèche.

Le site de forêt éparses de conifères présente aussi une entropie moyenne. On observe une augmentation du maximum d'occurrence des valeurs d'entropie pour les conditions de neige humide. Le maximum d'occurrence des valeurs d'angle α se situe dans la zone de diffusion de

volume et de surface autant en condition de neige sèche que de neige humide. On retrouve également une faible occurrence de données dans la zone de double réflexion. En bande C, le terme d'interaction entre l'interface air-neige et le couvert forestier est plus important pour une forêt éparse que pour une faible végétation ou une forêt dense; on observe donc plus de diffusion de double réflexion pour le site de forêt éparse de conifères. Ce résultat est en concordance avec les histogrammes obtenus à partir de la décomposition de Freeman-Durden en condition de neige humide (figure 5.22). Tout comme le site de faible végétation, on observe une augmentation du maximum d'occurrence des valeurs d'angle α d'environ 5° pour les conditions de neige humide par rapport aux conditions de neige sèche. On voit donc une augmentation de la diffusion de double réflexion pour les conditions de neige humide (Magagi *et al.*, 2002).

Pour le site de forêt dense de conifère, on observe une entropie allant de moyenne à élevée. Le maximum d'occurrence des valeurs d'angle α se situe entièrement dans la zone de diffusion de volume. La dépendance du signal à la densité du couvert forestier est saturée par la présence de la végétation et le signal provient de la partie supérieure du couvert forestier (Fung, 1994).

Les graphiques de l'angle α en fonction de l'entropie (H) en bande C permettent d'analyser les différents mécanismes de diffusion d'un couvert nival en présence d'un couvert forestier. De plus, il n'est pas possible d'établir un discriminant permettant de détecter la neige humide sous différents couverts forestiers.

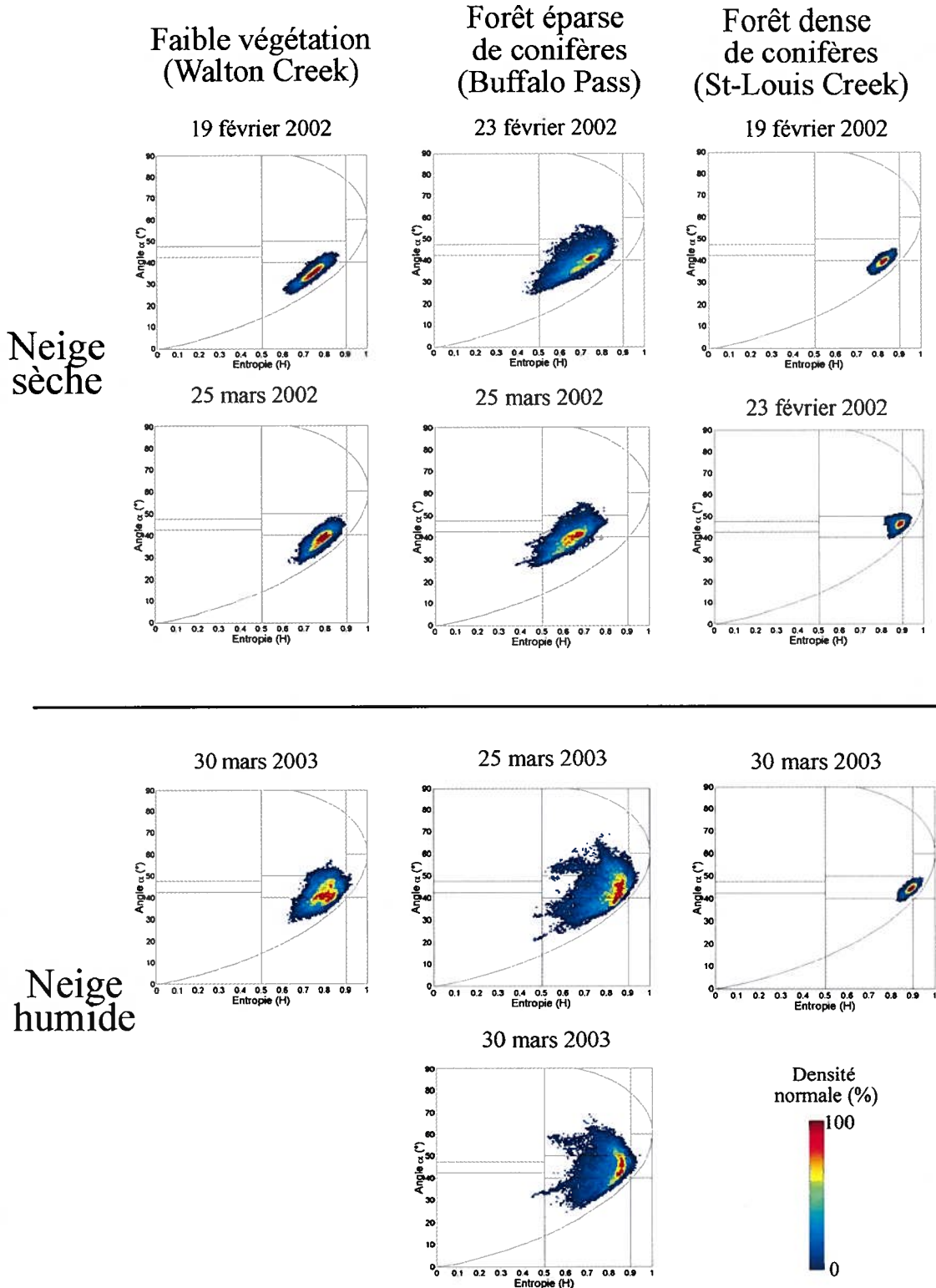


Figure 5.29 : Graphiques de l'angle α en fonction de l'entropie (H) pour les trois sites d'étude en bande C

En bande L (figure 5.30), le site de faible végétation présente des valeurs d'entropie moyenne en condition de neige sèche. En condition de neige humide, le maximum d'occurrence des valeurs d'entropie est élevé. Tout comme en bande C, le maximum d'occurrence des valeurs d'angle α ce retrouve dans les zones de diffusion de volume et de surface en condition de neige sèche, et dans la zone de diffusion de volume en condition de neige humide. La distribution des données est plus étendue en bande L qu'en bande C.

Le site de forêt épars de conifères présente des graphiques de l'angle α en fonction de l'entropie similaire à ceux obtenus pour le site de faible végétation. On observe peu de diffusion de double réflexion par rapport aux graphiques obtenus en bande C.

Le maximum d'occurrence des valeurs d'angle α du site de forêt dense de conifères est entièrement situé dans la zone de diffusion de volume. On observe également une augmentation des valeurs d'entropie pour les conditions de neige humide par rapport aux conditions de neige sèche.

Ainsi, comme en bande C, les graphiques de l'angle α en fonction de l'entropie permettent d'identifier les mécanismes de diffusion. De plus, il est impossible d'établir un discriminant permettant de détecter la neige humide sous différents couverts forestiers.

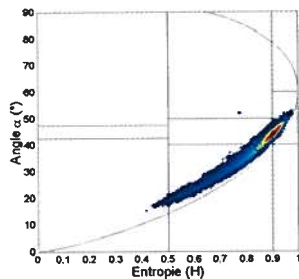
Faible végétation
(Walton Creek)

Forêt épars
de conifères
(Buffalo Pass)

Forêt dense
de conifères
(St-Louis Creek)

23 février 2002

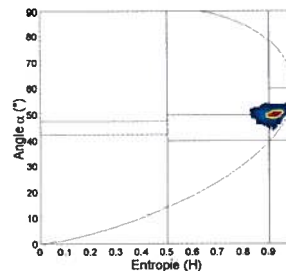
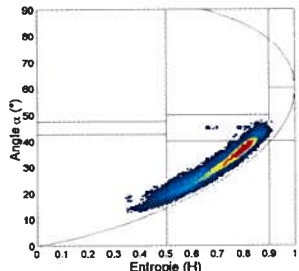
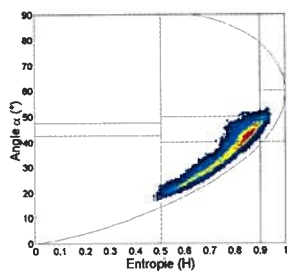
Neige
sèche



25 mars 2002

25 mars 2002

23 février 2002

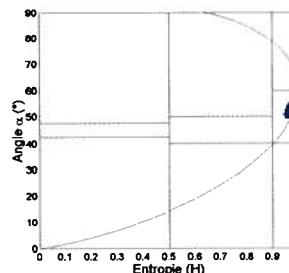
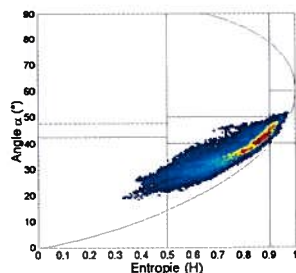
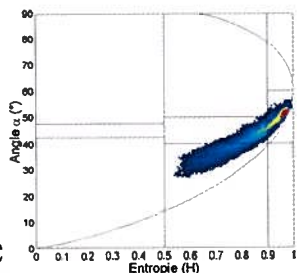


30 mars 2003

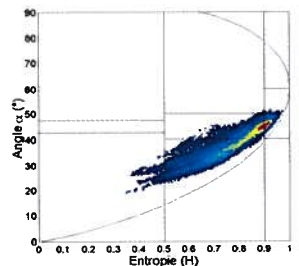
25 mars 2003

30 mars 2003

Neige
humide



30 mars 2003



Densité
normale (%)



Figure 5.30 : Graphiques de l'angle α en fonction de l'entropie (H), bande L

En bande P (figure 5.31), le maximum d'occurrence des valeurs d'angle α varie en fonction de la densité du couvert forestier en condition de neige sèche.

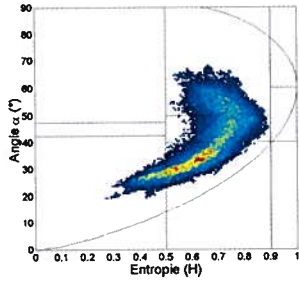
Pour le site de faible végétation, le mécanisme de diffusion dominant est la diffusion de surface. On observe également de la diffusion de volume et de la diffusion de double réflexion. On observe une augmentation du maximum d'occurrence des valeurs d'angle α pour le site de forêt éparse de conifère par rapport au site de faible végétation. Le mécanisme de diffusion dominant est donc la diffusion de volume. On observe aussi de la diffusion de surface. Pour le site de forêt dense de conifères, le maximum d'occurrence des valeurs d'angle α est principalement situé dans la zone de diffusion de volume.

On observe également une diminution de l'entropie entre les conditions de neige sèche et de neige humide pour les trois sites d'étude. Pour le site de faible végétation et de forêt éparse de conifères, les valeurs d'entropie vont de faible à moyenne pour les conditions de neige sèche et sont faibles pour les conditions de neige humide. Pour le site de forêt dense de conifères, on observe une entropie allant de moyenne à élevée pour les conditions de neige sèche et une entropie toujours faible pour les conditions de neige humide. Il est donc possible d'utiliser les valeurs d'entropie afin d'établir un seuil permettant de discriminer l'état de la neige. Ce seuil est établi à 0.5. Une analyse de la figure 5.31 montre qu'une combinaison des valeurs d'angle $\alpha > 30^\circ$ et d'un seuillage à 0.5 sur l'entropie, permet une parfaite discrimination des couverts de neige sèche et humide en bande P.

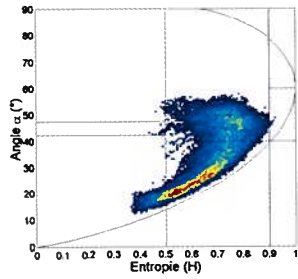
Neige
sèche

Faible végétation
(Walton Creek)

19 février 2002

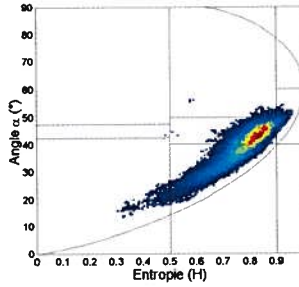


25 mars 2002

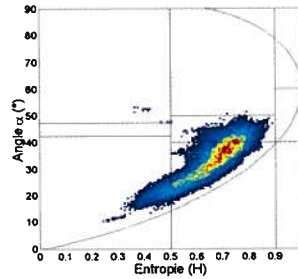


Forêt éparse
de conifères
(Buffalo Pass)

23 février 2002

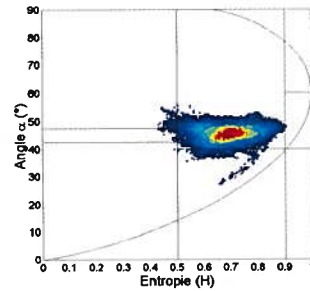


25 mars 2002

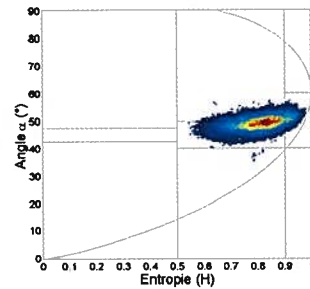


Forêt dense
de conifères
(St-Louis Creek)

19 février 2002

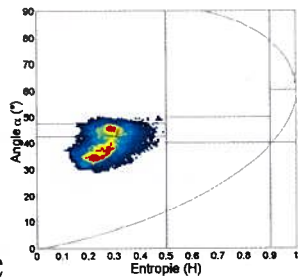


23 février 2002

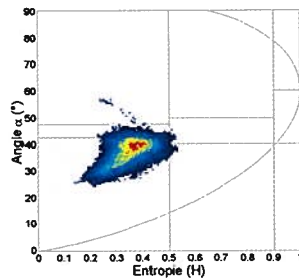


Neige
humide

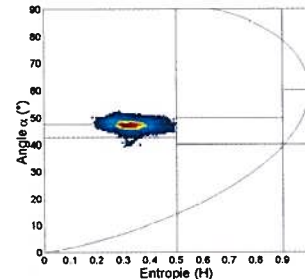
30 mars 2003



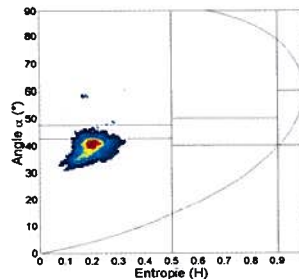
25 mars 2003



30 mars 2003



30 mars 2003



Densité
normale (%)



Figure 5.31 : Graphiques de l'angle α en fonction de l'entropie (H), bande P

La matrice d'erreurs réalisée à partir d'un seuillage à 0.5 des valeurs d'entropie et de 30° des valeurs d'angle α sur les puits à neige ne présente aucune erreur de classification. Ainsi, cette technique semble prometteuse et pourrait permettre de discriminer l'état de la neige peu importe le couvert forestier.

5.2 Évaluation de l'effet d'un couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival : résultats

Trois approches sont étudiées afin d'analyser l'effet du couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival : soit les coefficients de rétrodiffusion en bandes C, L et P, simple polarisation; des indices de végétation radar multipolarisation en bande C, L et P; et la puissance de diffusion de volume de la décomposition de Freeman-Durden pour les trois bandes. Les résultats de ces trois approches sont décrits dans les sections suivantes.

5.2.1 Coefficient de rétrodiffusion, bande C, L et P, simple polarisation

Les mesures du coefficient de rétrodiffusion en bande C, L et P interagissent différemment avec le couvert forestier. Pour évaluer l'effet du couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival, le coefficient de rétrodiffusion moyen a été calculé pour les trois sites d'études (faible végétation, forêt éparse de conifères et, forêt dense de conifères).

Les figures 5.32, 5.33 et 5.34 montrent le coefficient de rétrodiffusion (dB) en fonction du type de couvert forestier pour les trois polarisations (HH, VV, HV) des bandes C, L et P. La moyenne et l'écart type ont été calculés pour trois conditions au sol : sans couverture de neige lorsque le sol est dégelé (image d'automne), en condition de neige sèche et en condition de neige humide.

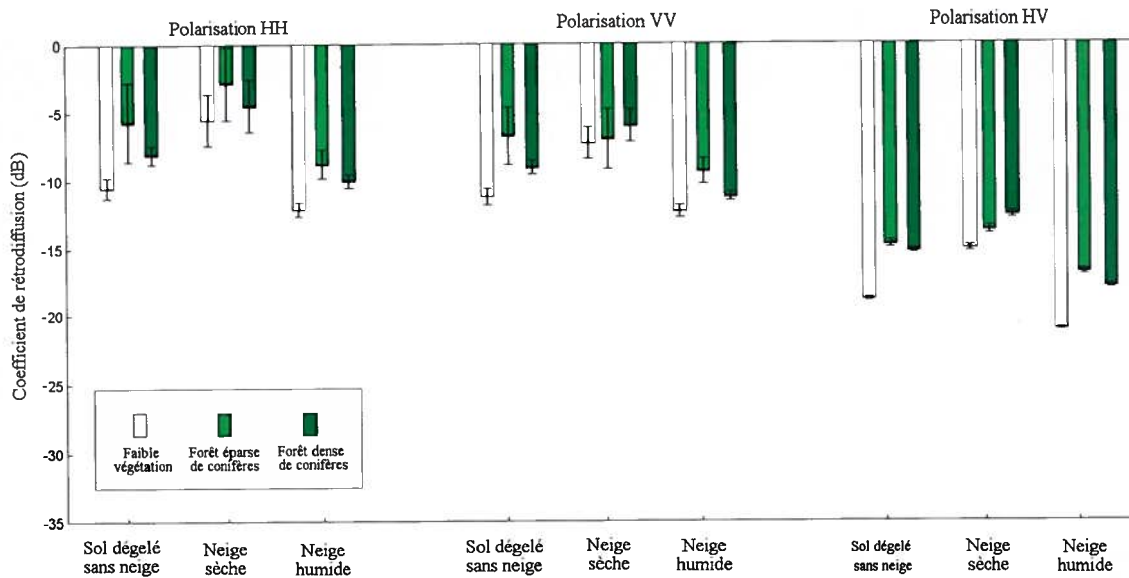


Figure 5.32 : Coefficients de rétrodiffusion moyens en fonction du couvert forestier en bande C

Le coefficient de rétrodiffusion observé en bande C augmente d'environ 3 dB entre le site de faible végétation et le site de forêt éparse de conifères en polarisation HH, pour les trois conditions au sol (sol dégelé sans neige, neige sèche, neige humide). Cette augmentation est également observée en polarisation VV et HV pour les conditions au sol sans neige et de neige humide. Elle est d'environ 1 dB en condition de neige sèche pour ces deux polarisations. Ainsi, l'effet du couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert de neige en bande C, varie en fonction des conditions au sol comme l'état de la neige (Nyström *et al.*, 1994) et de la polarisation du signal. On observe une diminution du signal entre le site de forêt éparse de conifères et le site de forêt dense de conifères en polarisation HH et VV. En bande C, il y a une saturation de la dépendance du signal avec l'augmentation de la densité du couvert forestier (Fung, 1994). Il est donc normal de ne pas observer d'augmentation du signal avec l'augmentation de la densité du couvert forestier. La diminution de 1 à 3 dB observée peut aussi s'expliquer par la différence entre les espèces forestières présentes sur les deux sites, soit l'épinette et le sapin pour le site de forêt éparse de conifères, et le pin tordu latifolié pour le site de forêt dense de conifères (figure 2.5). En polarisation HV, on observe une saturation du

signal entre les sites de forêt éparses et de forêt dense de conifères comme attendu (Fung, 1994).

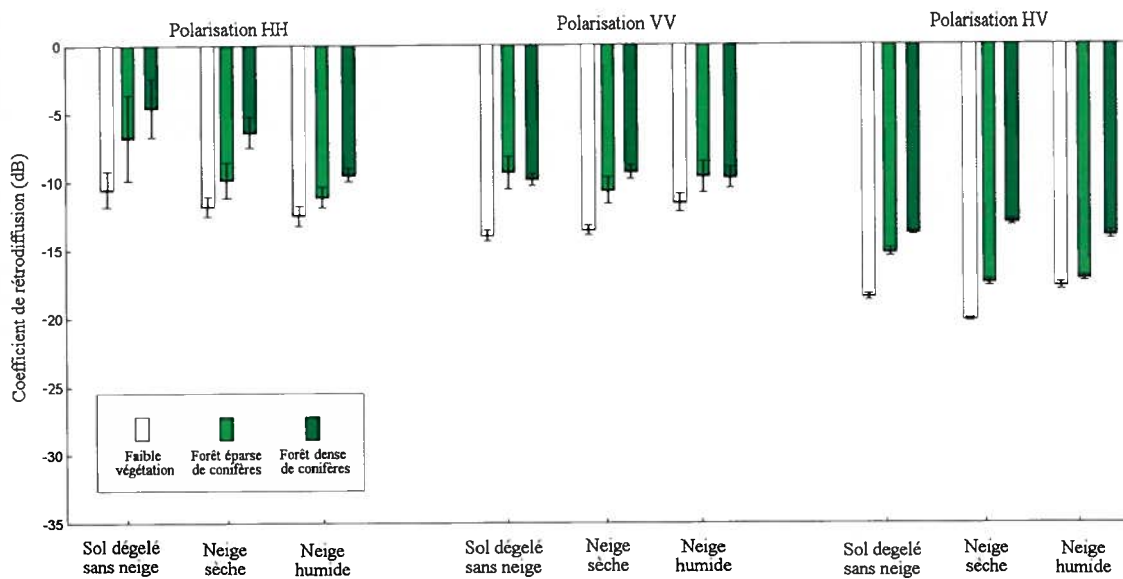


Figure 5.33 : Coefficients de rétrodiffusion moyens en fonction du couvert forestier en bande L

En bande L, on observe une augmentation du signal de plus de 5 dB entre le site de faible végétation et le site de forêt éparses de conifères lorsque le sol est dégelé et sans neige (image d'automne) pour les trois polarisations. Cette augmentation est d'environ 3 dB en condition de neige sèche et de neige humide. Ainsi, la présence d'un couvert nival influence la rétrodiffusion d'un couvert forestier. Entre le site de forêt éparses de conifères et le site de forêt dense de conifères, on observe également une augmentation du signal en polarisation HH et HV. Cette augmentation varie également en fonction des conditions au sol (sol dégelé sans neige, neige sèche, neige humide). En polarisation VV, on observe une saturation du signal entre le site de forêt éparses de conifères et le site de forêt dense de conifères. Cette saturation peut être causée par la différence de structure du couvert forestier. Ainsi, le signal rétrodiffusé varie en fonction de la structure du couvert forestier et de la polarisation (Boerner *et al.*, 1998).

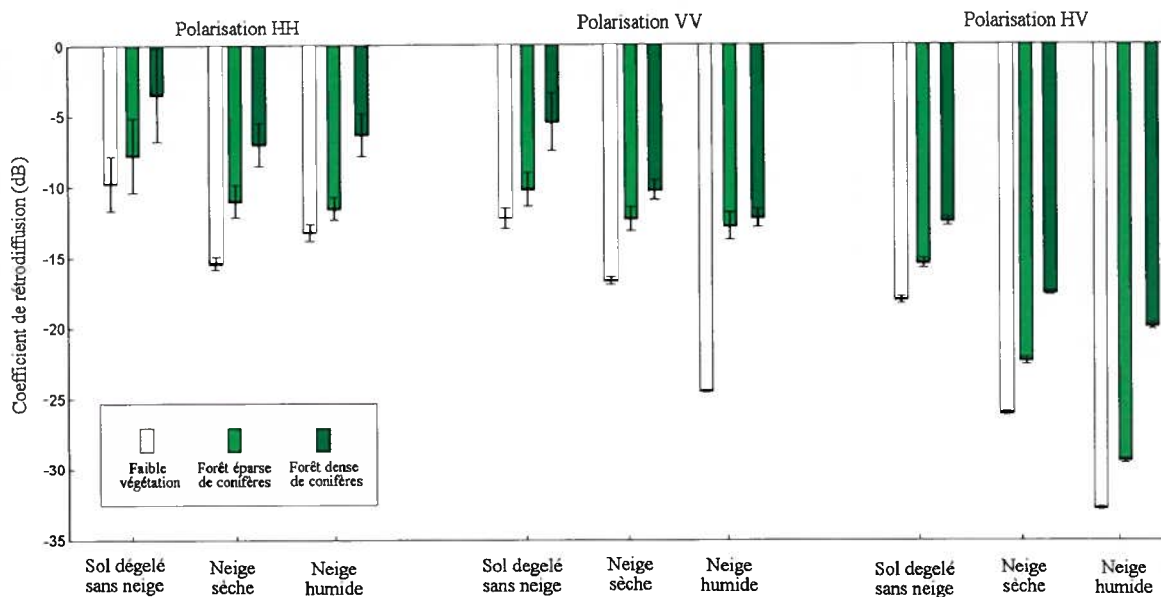


Figure 5.35 : Coefficients de rétrodiffusion moyens en fonction du couvert forestier en bande P

En bande P, on observe une augmentation du signal rétrodiffusé avec l'augmentation de la densité du couvert forestier pour toutes les polarisations. Par rapport aux bandes C et L, la bande P montre une plus grande sensibilité du signal aux conditions au sol (sol dégelé sans neige, présence de neige). En effet, les variations du signal sont plus importantes entre les conditions de neige et les conditions sans neige.

Les figures 5.32, 5.33 et 5.34 confirment la dépendance de la rétrodiffusion d'un couvert forestier en fonction de la fréquence, de la polarisation, de la densité et de la structure du couvert ainsi qu'en fonction des conditions au sol (sol dégelé sans neige, neige sèche, neige humide).

5.2.2 Indices de végétation radar multipolarisation

La deuxième approche d'analyse de l'effet du couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival utilise des indices de végétation radar (IVR). Le premier indice analysé a été

développé par Kim et van Zyl (2004). Il estime le niveau de biomasse à l'aide du signal rétrodiffusé dans trois polarisations (équation 4.1).

Le IVR moyen a été ensuite calculé pour chacun des trois sites d'études en bande C, L et P. La figure 5.35 montre un graphique du IVR (intensité) moyen en fonction du site d'étude pour les trois bandes.

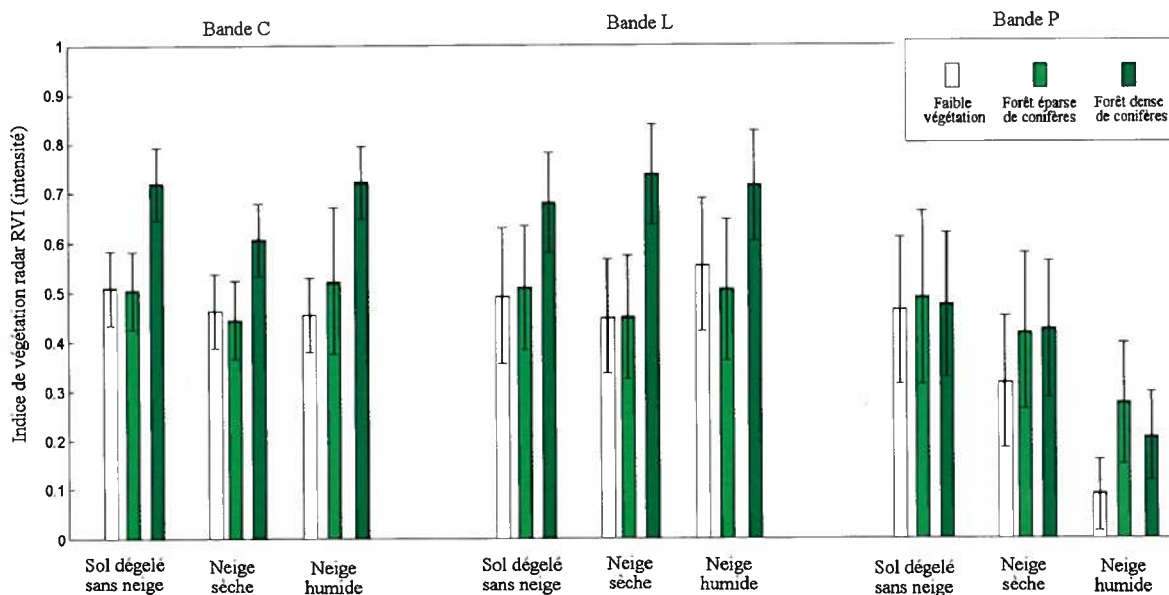


Figure 5.35 : Indice de végétation radar (IVR) moyen en fonction du couvert forestier en bande C, L, P

En bande C et L, on observe peu de variation (<0.1) du IVR entre le site de faible végétation et le site de forêt éparse de conifères. Par contre, entre le site de forêt éparse de conifères et de forêt dense de conifères le IVR augmente. Le IVR présente peu de variation entre les trois conditions (sol dégelé sans neige, neige sèche, neige humide) en bande C et L. En bande P, on observe une diminution du IVR entre la condition de sol dégelé sans neige et celle de neige sèche, ainsi qu'entre la situation de neige sèche et de neige humide. En bande P, il y a peu de variation de l'IVR entre les trois densités de couverture forestière.

La figure 5.36 montre un exemple d'images de IVR (en bande C pour des conditions de neige humide) pour les trois sites d'étude ainsi que leur histogramme respectif afin de voir la variation spatiale du IVR en fonction du taux de couverture forestière. Spatialement, les sites de faible végétation et de forêt dense de conifères présentent des valeurs de IVR homogènes, alors qu'une plus grande variation des valeurs de IVR est observée pour le site de forêt éparse de conifères. L'écart type du site de forêt éparse de conifères est donc plus élevé. Des variations spatiales similaires sont observées pour les autres conditions (sol dégelé sans neige et neige humide) ainsi que pour les autres indices de végétation analysés dans cette recherche.

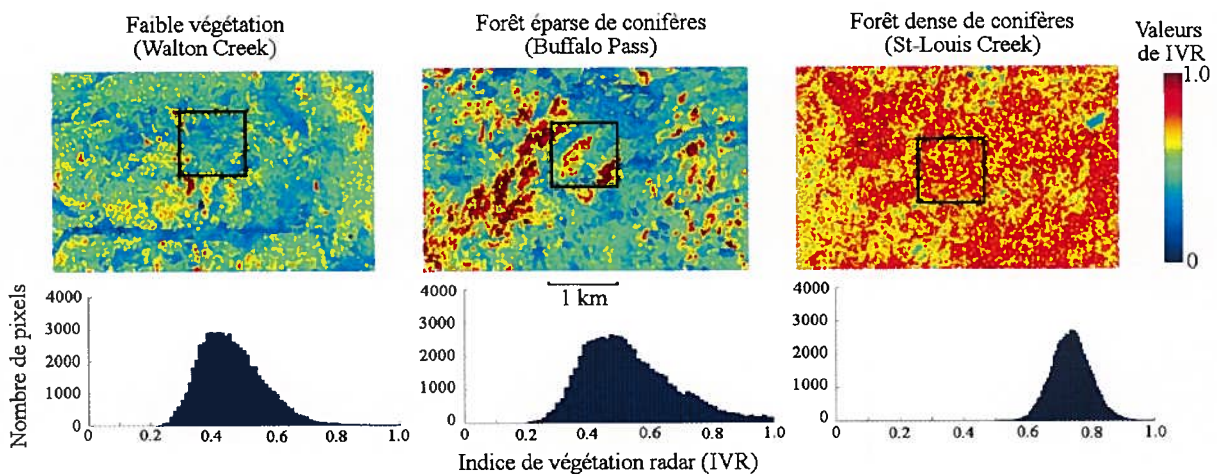


Figure 5.36 : Images et histogrammes des indices de végétation radar (IVR) en bande C pour des conditions de neige humide

Le IVR est un indice multipolarisation qui nécessite la connaissance de toutes les polarisations (HH, VV et HV). Parallèlement à l'IVR, deux indices de végétation utilisant deux polarisations (Charbonneau *et al.*, 2005) sont étudiés (équation 4.2 et 4.3).

Les figures 5.37 et 5.38 montrent les moyennes et écart type des indices $IVRD_{HH}$ et $IVRD_{VV}$ en intensité en fonction du site d'étude (faible végétation, forêt éparse de conifères, forêt dense de conifères) et des conditions au sol (sol dégelé sans neige, neige sèche, neige humide) pour les trois bandes (C, L, P).

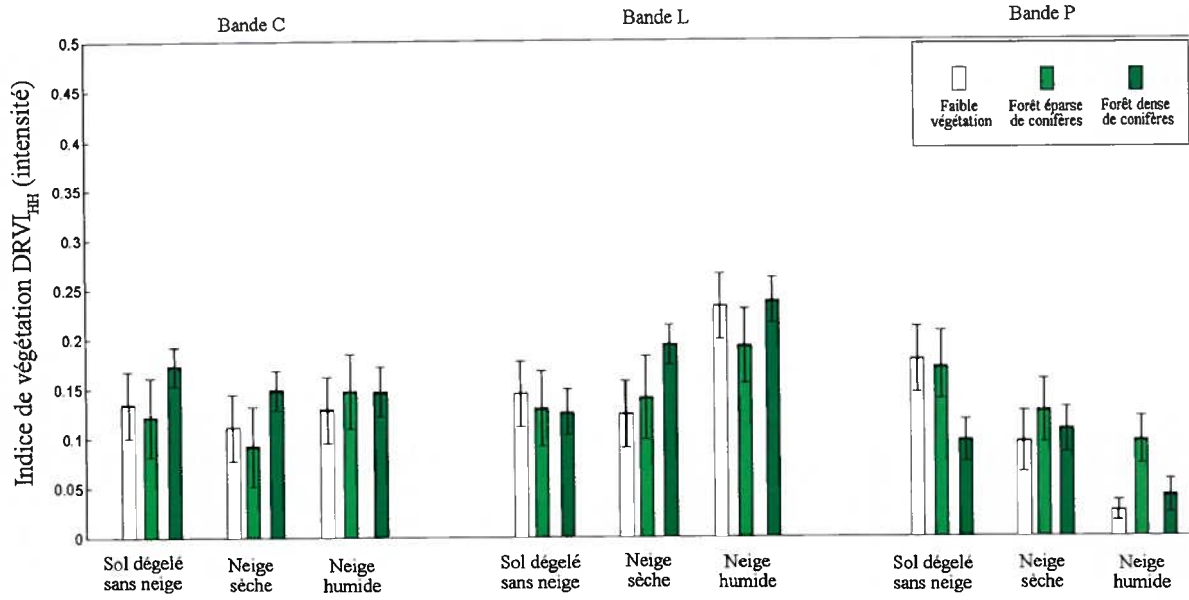


Figure 5.37 : Indice de végétation radar en double polarisation HH (IVRD_{HH}) moyen en fonction du couvert forestier en bande C, L, P

En bande C, le IVRD_{HH} présente peu de variation entre les sites de faible végétation et forêt éparses de conifère (figure 5.37). On observe une augmentation du IVRD_{HH} entre le site de forêt éparses de conifère et forêt dense de conifères pour les conditions de sol dégelé sans neige et de neige sèche. Aucune variation n'est observée en condition de neige humide. En bande L et P, il n'est pas possible d'établir une relation entre le IVRD_{HH} et la densité de couvert forestier.

En bande C et P, on observe une augmentation du IVRD_{VV} entre le site de faible végétation et le site de forêt dense de conifères (figure 5.38). Pour le site de forêt éparses de conifères, le IVRD_{VV} varie en fonction des conditions au sol (sol dégelé sans neige, neige sèche, neige humide). En bande L, on observe peu de variation entre le site de faible végétation et le site de forêt éparses de conifère pour les trois conditions (automne, neige sèche et neige humide). Par contre, une forte augmentation du IVRD_{VV} est observée pour le site de forêt dense de conifères.

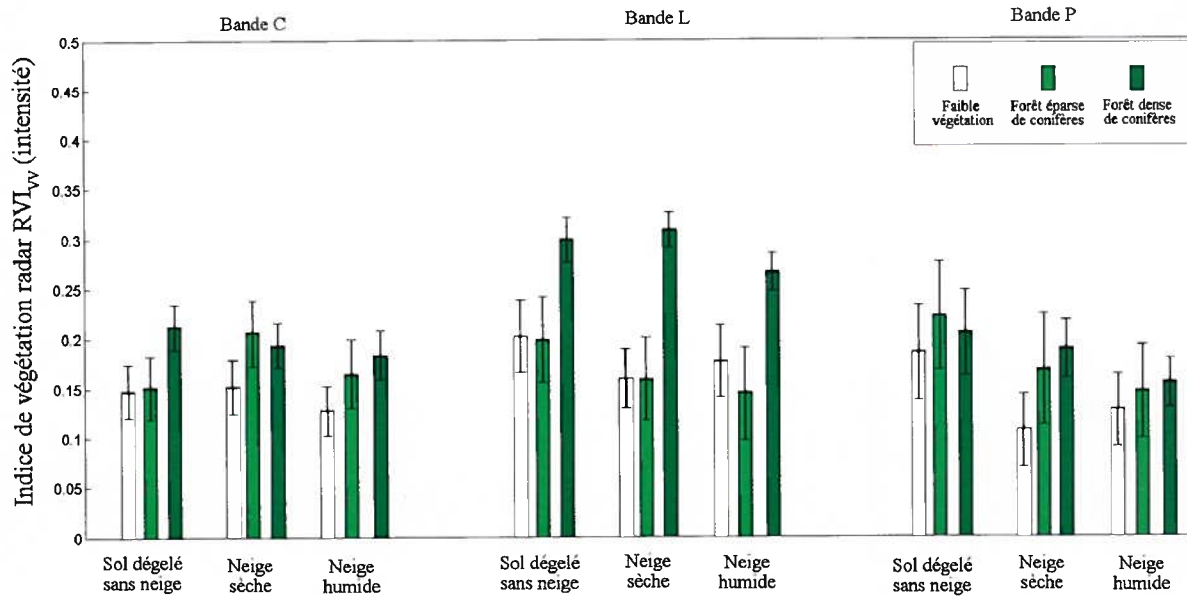


Figure 5.38 : Indice de végétation radar en double polarisation VV (IVRD_{VV}) moyen en fonction du couvert forestier en bande C, L, P

Les indices de végétation radar IVR en bande C et L, ainsi que l'indice IVRD_{VV} en bande L montrent un comportement similaire : faible variation entre les sites de faible végétation et forêt éparse de conifères, et grandes variations entre le site de forêt dense de conifères et les deux autres sites. Il serait intéressant d'analyser jusqu'à quel point ces indices pourraient caractériser la densité du couvert forestier afin de les intégrer dans des modèles de rétrodiffusion.

5.2.3 Décomposition de Freeman-Durden

La décomposition de Freeman-Durden décompose la cible en trois mécanismes de diffusion, soit la puissance de la diffusion de surface (P_S), de la diffusion de volume (P_V) et de la diffusion de double réflexion (P_{DR}). La présence d'un couvert forestier augmente la diffusion de volume (Fung, 1994). Ainsi, la puissance de diffusion de volume devrait être sensible à la densité du couvert forestier.

La figure 5.39 montre la puissance moyenne de diffusion de volume (dB) en fonction du site d'étude pour les bandes C, L et P. L'écart type a été calculé aussi pour les trois situations : sol dégelé sans neige, neige sèche et, neige humide.

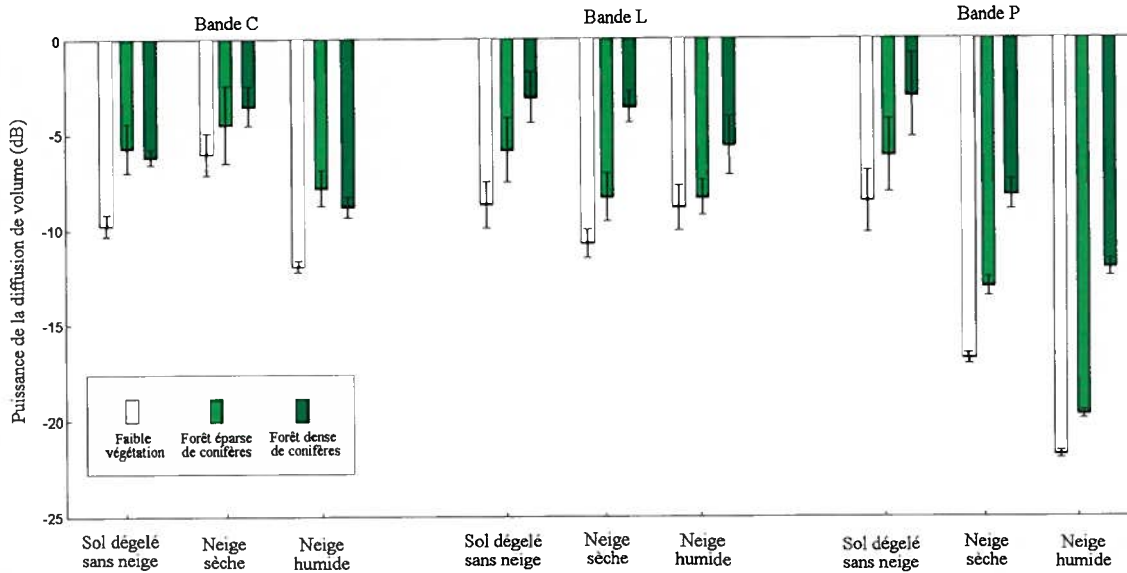


Figure 5.39 : Puissance de diffusion de volume moyenne (en dB) en fonction du couvert forestier en bandes C, L et P

En bande C, on observe une augmentation de la puissance de diffusion de volume entre les sites de faible végétation et de forêt éparse de conifères. Comme, en bande C, le signal provient principalement de la partie supérieure du couvert (Fung, 1994), on observe une saturation de la puissance de diffusion de volume entre les sites de forêt éparse et forêt dense de conifères. La puissance de diffusion de volume varie également en fonction des conditions au sol (sol dégelé sans neige, neige sèche, neige humide). On observe une plus grande puissance de diffusion de volume pour la condition de neige sèche que pour les conditions de sol dégelé sans neige et neige humide. Cette augmentation provient probablement de la diffusion de volume causée par le couvert nival sec.

En bande L et P, quelles que soient les conditions au sol, on observe une augmentation de la puissance de diffusion de volume avec l'augmentation de la densité du couvert forestier. Alors qu'en bande L la puissance de diffusion varie peu en fonction des conditions au sol (Praks *et*

al., 2001), en bande P, elle varie beaucoup en fonction des conditions au sol (sol dégelé sans neige, neige sèche, neige humide).

5.3 Correction de l'effet du couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert de neige : résultats

Une modélisation simple de la rétrodiffusion d'un couvert nival et d'un couvert forestier pour une fréquence et un angle d'incidence est donnée par l'équation 4.4 (Ulaby *et al.* 1986).

La rétrodiffusion provenant du couvert forestier ($\sigma^{\circ}_{\text{forêt}}$) peut être modélisée comme étant la puissance de diffusion de volume de la décomposition de Freeman-Durden. En condition de neige sèche, la puissance de diffusion de volume provient principalement du couvert forestier, mais également du couvert de neige. En condition de neige humide, il n'y a plus de diffusion de volume provenant du couvert nival. Ainsi, la différence d'image (en dB) entre une image d'hiver et la puissance de diffusion de volume prise en condition de neige humide est analysée afin de corriger partiellement l'effet du couvert forestier sur le couvert nival.

La différence utilisant la polarisation HH en bande C permet d'établir un seuil afin de discriminer l'état de la neige sous différents couverts forestiers. Les différences effectuées en utilisant la polarisation VV et HV en bande C et les différences effectuées en bande L et P pour toutes les polarisations ne donnent pas de résultats concluants.

Les histogrammes des différences d'images en dB entre la polarisation HH et la puissance de diffusion de volume en condition de neige humide sont présentés à la figure 5.40. Il est possible d'établir un seuil commun aux trois sites d'étude permettant de détecter la neige humide. Ce seuil est fixé à 1.5 dB. Avec ce seuil, on obtient des pourcentages de recouvrement inférieurs à 28 %. La matrice d'erreurs de cette méthode appliquée sur les puits à neige des images est présentée au tableau 5.7.

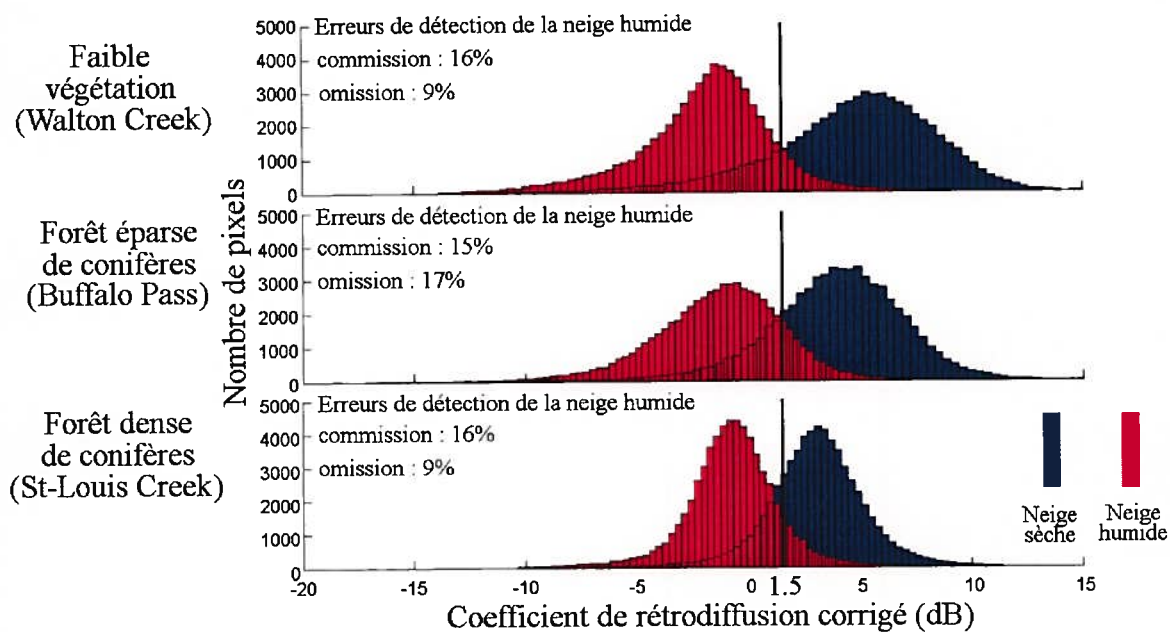


Figure 5.40 : Histogrammes différences d'images (en dB) entre la polarisation HH et la puissance de diffusion de volume en condition de neige humide en bande C; pour des conditions de neige sèche (bleu) et humide (rouge) pour les trois sites d'étude

Tableau 5.7 : Matrice d'erreurs (en %) pour les trois sites d'études, seuillage de la différence d'image (en dB) en bande C entre une image d'hiver (polarisation HH) et la puissance de diffusion de volume prise en condition de neige humide

		Coefficient de rétrodiffusion corrigé, seuil de -1.5 dB		
		Données des puits à neige		
		Neige	sèche	humide
Faible végétation (Walton Creek)	Classification à l'aide de l'image radar	sèche	100	0
		humide	0	100
Forêt éparse de conifères (Buffalo Pass)		sèche	100	6
		humide	0	94
Forêt dense de conifères (St-Louis Creek)		sèche	100	0
		humide	0	100

Tout comme la figure 5.40, le tableau 5.7 montre de bons résultats (erreurs $\leq 6\%$) pour la détection de la neige humide en effectuant une différence d'image entre une image d'hiver et la puissance de diffusion de volume d'une image de référence prise en condition de neige humide. Cette technique néglige le terme d'interaction entre le couvert forestier et le couvert nival (σ°_{int}), on observe donc des erreurs un peu plus élevées (6%) pour le site de forêt éparse de conifères puisque le terme d'interaction est plus important (Magagi *et al.*, 2002).

Par contre, il peut s'avérer difficile opérationnellement d'utiliser une image en condition de neige humide comme image de référence puisqu'elle est prise lors de la période de fonte du couvert nival. Une image de neige humide d'une année antérieure peut être utilisée en supposant que les caractéristiques du couvert forestier n'ont pas changé.

6. Discussion et conclusion

Les résultats obtenus au chapitre 5 démontrent l'utilité des données radar multifréquence, multipolarisation et polarimétrique pour la détection de la neige humide sous différents couverts forestiers. De plus, la rétrodiffusion d'un couvert nival, sous divers couverts forestiers, varie en fonction de la fréquence, la polarisation, la densité et la structure du couvert forestier ainsi que des conditions au sol (sol dégelé sans neige, neige sèche, neige humide). Il est également possible de corriger partiellement l'effet du couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival et ainsi améliorer la détection de la neige humide.

Dans cette recherche, les effets de la stratigraphie, de la taille des grains ainsi que la présence de glace dans le couvert de neige n'ont pas été pris en compte dans l'analyse puisque les données de profil de densité n'étaient pas disponibles pendant nos travaux. Ces données ont été mesurées lors de la campagne CLPX et seront probablement disponibles dans le futur. Il sera alors intéressant d'inclure ces caractéristiques de la neige dans l'analyse du couvert nival à l'aide de données radar multifréquences polarimétriques. De plus, l'hétérogénéité dans les sites d'étude a été négligée. En effet, il existe de petites zones de forêts denses à l'intérieur du site de faible végétation (figure 2.2a). Ces zones sont donc incluses lors de l'analyse de la zone entière de 1km^2 . Par contre, tous les puits à neige de la zone de faible végétation ont été réalisés dans des aires ouvertes. Il en est de même pour le site de forêt éparse de conifères où certaines zones auraient pu être considérées comme des aires ouvertes (figure 2.2b). Ici aussi, tous les puits à neige sont situés dans des régions de forêt éparse.

Il est également important de considérer l'erreur absolue sur la calibration des données lors d'une analyse multitemporelle comme dans cette recherche. Le capteur AIRSAR-POLSAR a une erreur de calibration absolue de 3 dB. Ainsi, une variation de moins de 3 dB entre les images multitemporelle peut résulter de la calibration.

Les tableaux 6.1 et 6.2 présentent, respectivement, un aperçu des erreurs maximales et minimales de détection de la neige humide obtenues avec les différentes techniques analysées dans cette recherche. La configuration nécessaire pour l'obtention de chaque résultat ainsi que le site d'étude où l'erreur maximale a été enregistrée sont également indiqués. Les principaux résultats de chaque technique sont ensuite résumés.

Tableau 6.1 : Erreur maximale de détection de la neige humide, pour les différentes méthodes utilisées en fonction de la configuration du capteur et de la densité du couvert forestiers

Technique	Configuration	Erreur maximale (%)	Densité du couvert forestier pour l'erreur maximal
Méthode développée par Rott et Nagler (1995)	C_{HH}	25	Forêt dense de conifères
	C_{VV}	47	Forêt éparses de conifères
	C_{HV}	31	Forêt dense de conifères
Différence d'image utilisant les polarisations circulaires	C_{DD}	44	Forêt éparses de conifères
	C_{GG}	34	Forêt éparses de conifères
	C_{DG}	22	Forêt éparses de conifères
Ratio de bandes	L_{HH} / C_{HH}	38	Forêt éparses de conifères
	L_{HV} / C_{HH}	31	Forêt éparses de conifères
	L_{HV} / C_{HV}	19	Faible végétation
	L_{VV} / C_{HH}	19	Forêt éparses de conifères
Hauteur de socle	Bande P co-polarisée	3	Faible végétation
	Bande P ortho-polarisée	6	Forêt éparses de conifères
Décomposition de Freeman-Durden	P_V en bande C	16	Forêt éparses de conifères
	P_S en bande C	31	Forêt dense de conifères
Décomposition de Cloude-Pottier	Bande P, $H > 0,5$ et $\alpha > 30^\circ$	0	Les trois sites d'étude
Correction de l'effet du couvert forestier	$C_{HH} - P_V$ en bande C (en dB)	6	Forêt éparses de conifères

Tableau 6.2 : Erreur minimale de détection de la neige humide, pour les différentes méthodes utilisées en fonction de la configuration du capteur et de la densité du couvert forestiers

Technique	Configuration	Erreur minimale (%)	Densité du couvert forestier pour l'erreur maximal
Méthode développée par Rott et Nagler (1995)	C_{HH}	0	Faible végétation
	C_{VV}	6	Faible végétation
	C_{HV}	0	Faible végétation
Différence d'image utilisant les polarisations circulaires	C_{DD}	9	Forêt dense de conifères
	C_{GG}	13	Faible végétation et forêt dense de conifères
	C_{DG}	0	Faible végétation
Ratio de bandes	L_{HH} / C_{HH}	0	Faible végétation
	L_{HV} / C_{HH}	0	Forêt dense de conifères
	L_{HV} / C_{HV}	0	Forêt dense de conifères
	L_{VV} / C_{HH}	0	Faible végétation
Hauteur de socle	Bande P co-polarisée	0	Forêt épaisse de conifères et forêt dense de conifères
	Bande P ortho-polarisée	3	Faible végétation et forêt dense de conifères
Décomposition de Freeman-Durden	P_V en bande C	0	Faible végétation et forêt dense de conifères
	P_S en bande C	0	Faible végétation
Décomposition de Cloude-Pottier	Bande P, $H > 0,5$ et $\alpha > 30^\circ$	0	Les trois sites d'étude
Correction de l'effet du couvert forestier	$C_{HH} - P_V$ en bande C (en dB)	0	Faible végétation et forêt dense de conifères

La méthodologie développée par Rott et Nagler (1995) pour détecter la neige humide en bande C consiste à appliquer un seuil de -3 dB à une différence entre une image d'hiver et une image de référence prises en condition de neige sèche. Cette méthodologie a été appliquée pour trois polarisations (HH, VV et HV). De bons résultats sont obtenus pour le site de faible végétation comme attendu, mais des erreurs élevées (> 13 %) sont observées pour les sites de forêt éparses de conifères et de forêt dense de conifères. Les meilleurs résultats sont obtenus en polarisation HH mais présentent tout de même des erreurs de 13 % et 25 % pour les sites de forêt éparses de conifères et de forêt dense de conifères, respectivement. En bande L et P, l'analyse des moyennes et écarts types des coefficients de rétrodiffusion ne permet pas de discriminer l'état de la neige. L'utilisation des polarisations circulaires améliore la détection de la neige humide en présence d'un couvert forestier. Tout comme les coefficients de rétrodiffusion en polarisation linéaire, seule la bande C permet la détection de la neige humide. Les meilleurs résultats sont obtenus avec la polarisation DG. Pour le site de forêt éparses de conifères et de forêt dense de conifères, les erreurs obtenues sont de 13% et 22%, respectivement. Contrairement aux résultats obtenus avec la polarisation linéaire HH, la polarisation circulaire DG présente de meilleurs résultats pour la forêt éparses de conifères. La combinaison des polarisations linéaire (HH) et circulaire (DG) pourrait permettre une amélioration de la détection de la neige humide sous un couvert forestier. Il existe peu d'étude théorique impliquant des polarisations circulaires. Il serait intéressant, dans une recherche future, d'établir un lien théorique entre les résultats obtenus en polarisation circulaire et un modèle de rétrodiffusion.

Parmi les différents paramètres multipolarisations et multifréquences testés pour la détection de la neige humide, les rapports de bandes en décibel donnent les meilleurs résultats. En effet, les résultats obtenus avec les rapports $\sigma_{LHH}^0 / \sigma_{CHH}^0$, $\sigma_{LHV}^0 / \sigma_{CHH}^0$, $\sigma_{LHV}^0 / \sigma_{CHV}^0$ et $\sigma_{LVV}^0 / \sigma_{CHH}^0$ montrent des erreurs $\leq 13\%$ pour les sites de faible végétation et forêt dense de conifères. Par contre, des erreurs plus élevées comprises entre 16 % et 38 % sont observées sur le site de forêt éparses de conifères. Cette technique de détection de la neige humide ne pourrait ainsi être utilisée que pour des zones homogènes, soit faible végétation ou forêt dense de conifères. Comme il n'existe pas actuellement de capteur satellitaire multifréquence opérant en bandes C et L, des études devront évaluer les possibilités d'appliquer cette technique à des

données multifréquences acquises par deux capteurs différents. Les caractéristiques des capteurs satellitaires ALOS-PALSAR (bande L), RADARSAT-2 (bande C) et ASAR-ENVISAT (bande C) sont similaires (tableaux 6.2). Leur compatibilité dans l'application de cette nouvelle technique de détection de la neige humide devra être explorée.

Tableau 6.2 : Caractéristiques des capteurs ALOS-PALSAR, RADARSAT 2 et ASAR-ENVISAT

Capteur	ALOS-PALSAR	RADARSAT 2	ASAR-ENVISAT
Fréquence	1,27 GHz (bande L)	5,3 GHz (bande C)	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	HH ou VV ou HV ou HH + HV ou VV + VH ou HH + VV
Angle d'incidence nominale (°)	8 - 60	10 - 60	15-45
Résolution nominale de la portée au sol (m)	10 - 100	3 - 100	30
Résolution azimutale nominale (m)	10 - 100	3 - 100	30
Largeur de fauchée (km)	20 - 350	10 - 500	50-100
Cycle orbital (jours)	46	24	35

Tiré de Japan Aerospace Exploration Agency (2005), de Agence spatiale canadienne (2005) et de European Space Agency (2005)

La forme des signatures polarimétriques co-polarisées et ortho-polarisées en bande C, L et P varie en fonction de l'état de la neige, de la densité et du type de couvert forestier. L'analyse visuelle des signatures polarimétriques permet d'observer de manière qualitative les mécanismes de diffusion. La forme des signatures polarimétriques calculées en bande C et L, en condition de neige humide, rappelle celle de signatures polarimétriques d'une diffusion de surface. En bande P, la forme des signatures polarimétriques en condition de neige humide

rappelle celle d'un dipôle orienté horizontalement. La hauteur de socle permet une analyse quantitative des signatures polarimétriques. On observe une augmentation de la hauteur de socle co-polarisée et ortho-polarisée pour les conditions de neige humide par rapport aux conditions de neige sèche en bande C et L. Cette augmentation, qui pourrait s'expliquer par une réduction du rapport signal / bruit ne permet pas d'établir un seuil commun de discrimination aux trois sites d'études (faible végétation, forêt éparse de conifères et forêt dense de conifères). En bande P, on observe une diminution de la hauteur de socle en condition de neige humide. À cette fréquence, il est possible d'établir aux trois sites d'étude, un seuil commun de détection de la neige humide sous différents couverts forestiers. Les erreurs obtenues avec la matrice d'erreur sont inférieures à 6% pour toutes les conditions d'observation. Cette méthode donne de bons résultats, mais sera difficilement applicable dans un avenir proche puisqu'il existe peu de capteur en bande P et qu'aucun capteur satellitaire en bande P n'est prévu dans les prochaines années.

La décomposition de Freeman-Durden exprime la cible en fonction de la puissance de diffusion de surface, de volume et de double réflexion. L'analyse de ces trois paramètres en bande C, L et P permet d'évaluer les principaux mécanismes de diffusion présents lors de la rétrodiffusion d'un couvert nival sous différents couverts forestiers. En bande L et P, il n'a pas été possible d'établir un seuil permettant de détecter la neige humide sous différents couverts forestiers. En bande C, la puissance de diffusion de surface et de volume présentes des variations entre les conditions de neige sèche et de neige humide. Ainsi, en effectuant une différence entre l'image d'hiver et une image en condition de neige sèche, il est possible d'établir un seuil permettant de différencier l'état de la neige. Le seuil est établi à -3 dB pour la puissance de diffusion de volume et à -4 dB pour la puissance de diffusion de surface. La matrice d'erreur effectuée sur les puits à neige de chaque image montre de bons résultats (0% d'erreur) avec l'utilisation de la puissance de diffusion de volume pour les sites de faible végétation et de forêt dense de conifères. Par contre, on obtient des erreurs de 16% pour les sites de forêt éparse de conifères. Quant à la matrice d'erreur calculée à partir de la différence de diffusion de surface, sur les puits à neige, elle présente des erreurs élevées pour les site de forêt éparse de conifères (19%) et de forêt dense de conifères (31%).

La décomposition de Cloude-Pottier représente la cible à l'aide de trois paramètres, l'angle α et l'entropie (H). Un graphique de l'angle α en fonction de l'entropie permet d'identifier les principaux mécanismes de diffusion d'une cible. En bande C et L, ce graphique permet de mieux comprendre les différents mécanismes de diffusion présents dans un couvert nival sous différents couverts forestiers. Par contre, il ne permet pas l'application d'un seuil permettant de discriminer l'état de la neige sous différents couverts forestiers. La bande P permet également de mieux cibler les mécanismes de diffusion d'un couvert nival et forestier. De plus, on observe une diminution de l'entropie pour la neige humide permettant d'établir un seuil discriminant l'état de la neige. La matrice d'erreur réalisée à partir d'une combinaison des valeurs d'angle $\alpha > 30^\circ$ et d'un seuillage à 0.5 sur l'entropie sur les puits à neige ne présente aucune erreur de classification. Par contre, tout comme la méthode utilisant la hauteur de socle en bande P, cette méthode sera difficilement applicable de manière opérationnelle, dans un avenir rapproché.

L'analyse des mécanismes de diffusion d'un couvert nival sous différents couverts forestiers à l'aide des deux techniques de décomposition de la cible présente des similitudes, mais également des différences. Ces concordances et différences sont exposées dans le tableau 6.3.

Tableau 6.3 Comparaison de l'analyse des mécanismes de diffusion d'un couvert nival sous différents couverts forestiers à l'aide des techniques de décompositions de la cible

	Décomposition de Freeman-Durden	Décomposition de Cloude-Pottier
Bande C	Diminution de P_S et augmentation de P_V pour le site de forêt dense de conifères par rapport aux deux autres sites d'étude	Augmentation de l'occurrence des données dans la zone de diffusion de volume pour le site de forêt dense de conifères par rapport aux deux autres sites d'étude
	Diminution de P_S et P_V en conditions de neige humide par rapport aux conditions de neige sèche	Augmentation des valeurs d'angle α et donc de l'occurrence des données dans la zone de diffusion de volume en conditions de neige humide par rapport aux conditions de neige sèche
	Augmentation de P_{DB} en conditions de neige humide et pour le site de forêt éparse de conifères	Augmentation de l'occurrence des données dans la zone de diffusion multiple en conditions de neige humide et pour le site de forêt éparse de conifères
Bande L	Augmentation de P_V avec l'augmentation de la densité du couvert forestier	Augmentation de l'occurrence de données dans la zone de diffusion de volume avec l'augmentation de la densité du couvert forestier
	Le site de forêt dense présente majoritairement de la diffusion de volume	Le site de forêt dense présente majoritairement de la diffusion de volume
	Les images sont similaires en conditions de neige sèche et de neige humide	Les graphiques de l'angle α en fonction de H présentent peu de variation entre les conditions de neige sèche et de neige humide
Bande P	Les sites de faible végétation et forêt éparse de conifères présentent des histogrammes similaires Augmentation de P_V pour le site de forêt dense de conifères	Augmentation de l'occurrence de données dans la zone de diffusion de volume avec l'augmentation de la densité du couvert forestier
	Augmentation de P_V et diminution de P_S en conditions de neige humide par rapport aux conditions de neige sèche pour les sites de faible végétation et forêt éparse de conifères Augmentation de P_{DB} en conditions de neige humide par rapport aux conditions de neige sèche pour la forêt dense de conifères	Diminution des valeurs d'entropie en conditions de neige humide par rapport aux conditions de neige sèche pour les trois sites d'étude

L'analyse de la rétrodiffusion d'un couvert nival, sous divers couverts forestiers, confirme que le signal rétrodiffusé varie en fonction de la fréquence, la polarisation, la densité et la structure du couvert forestier ainsi que des conditions au sol (sol dégelé sans neige, neige sèche, neige humide).

Trois indices de végétation radar ont été analysés en fonction de la densité du couvert forestier et des conditions au sol (sol dégelé sans neige, neige sèche, neige humide). L'indice de végétation radar IVR développé par Kim et van Zyl (2004) en bande C et L est sensible à la densité du couvert forestier. L'indice $IVRD_{VV}$ en bande L est également sensible à la densité du couvert forestier. L'indice $IVRD_{HH}$ varie peu avec l'augmentation de la densité du couvert forestier. Il est également très sensible aux conditions du couvert de neige. Les deux indices, IVR en bande C et L et $DIVR_{VV}$ en bande L, devront faire l'objet de recherches plus approfondies afin d'établir une relation entre l'indice et la densité du couvert forestier. S'il est possible d'établir une relation entre ces indices et la densité du couvert forestier, elle pourrait être utilisée pour la modélisation de la rétrodiffusion d'un couvert forestier.

La puissance de diffusion de volume de la décomposition de Freeman-Durden permet également de caractériser la densité du couvert forestier. Comme attendu, on observe une saturation de la puissance de diffusion de volume en bande C avec l'augmentation de la densité du couvert forestier. En bande L et P, la puissance de diffusion de volume augmente avec l'augmentation de la densité de couvert forestier. Par contre, la puissance de diffusion en bande P varie beaucoup en fonction des conditions au sol (sol dégelé sans neige, neige sèche, neige humide). La puissance de diffusion de volume en condition de neige humide caractérise bien la diffusion de volume présente dans la rétrodiffusion d'un couvert forestier. Elle pourrait être intégrée aux modèles afin de caractériser la diffusion de volume du couvert forestier.

Une différence entre le coefficient de rétrodiffusion en bande C et la puissance de diffusion de volume en condition de neige humide en bande C permet de corriger partiellement l'effet du couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival. En utilisant le coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH, il est possible d'établir un seuil commun aux trois sites

d'études (faible végétation, forêt éparses de conifères, forêt dense de conifères) permettant de discriminer l'état de la neige. En appliquant un seuil de 1.5 dB, la matrice d'erreur réalisée à partir des puits à neige montre des erreurs d'au plus 6%.

Les techniques analysées dans cette recherche pour déterminer l'état de la neige (sèche ou humide), analyser l'effet de la végétation sur la rétrodiffusion d'un couvert nival et, corriger cet effet, sont prometteuses. Elles devront être testées sur d'autres sites d'étude avec d'autres capteurs afin de les valider. Les données polarimétriques étant sensibles à la structure du couvert forestier, l'analyse devra être refaite avec d'autres types de couverts forestiers. La recherche a été réalisée avec des images radar ayant un angle d'incidence de 55°. La végétation a un effet important aux angles d'incidences élevés, comme celui-ci. Cet angle d'incidence est parfois difficile à obtenir avec des capteurs satellitaires. Par exemple, ENVISAT peut aller jusqu'à 45° et le mode polarimétrique de RADARSAT-2 ne pourra aller qu'à 41°. Ainsi, une recherche future pourrait refaire l'analyse avec des images ayant un angle d'incidence plus petit. Il serait également intéressant d'analyser ces nouvelles techniques de détection de la neige humide et d'analyser l'effet d'un couvert forestier sur la rétrodiffusion d'un couvert nival à une résolution plus grossière, souvent utilisée par les capteurs satellitaires; les images utilisées dans nos travaux ont une résolution spatiale en azimut de 9.6 et de 3.3 m en portée.

Dans cette étude, nous avons étudié, à l'aide de données radar multifréquence polarimétrique, les variations des mécanismes de diffusion d'un couvert nival en fonction de son état (sec, humide) et de la présence d'un couvert forestier. Des caractéristiques importantes du couvert nival (la densité, l'épaisseur de la neige ainsi que la structure du couvert nival) pourraient être étudiées à l'aide de ce type de données acquises principalement en bande C. Le lancement prochain (mars 2007) du capteur satellitaire Radarsat-2 augmentera la disponibilité des données radar polarimétrique en bande C et pourra permettre ce genre de recherche à l'échelle spatiale.

7. Références

Agence spatiale canadienne (2005) Spécifications techniques et composantes, *in* RADARSAT-2, <http://www.space.gc.ca/asc/fr/satellites/radarsat2/default.asp>

Baghdadi N, Gauthier Y and Bernier M (1997) Capability of multitemporal ERS-1 SAR data for wet snow mapping, *Remote sensing of Environment*, 60(2), 174-186

Bernier M, Gauthier Y, Mermoz S, Gherboudj I, Battay A E and Khaldoune J (2005), Investigating Polarimetric SAR Data for Cryospheric Monitoring in a Canadian Environment, *Proceeding Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '05*, CD-ROM 4 pages

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.

Charbonneau F, Trudel M and Fernandes R (2005) Use of dual-polarization and multi-incidence SAR for soil permeability mapping, *Atelier ASAR'2005*, Saint-Hubert, Canada, novembre 2005, CD-ROM

Chauhan N S, Lang R H and Ranson K J (1991) Radar modeling of a boreal forest, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(4), 627-638

Cline D (2005) Cold Land Process Field Experiment, *in* NASA Land Surface Hydrology Program - Cold Land Process Working, <http://www.nohrsc.nws.gov/~cline/clpx.html>

Cloude R and Pottier E (1997) An entropy based classification scheme for land application of polarimetric SAR, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1), 68-78

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

Durden S L, van Zyl J J and Zekber H A (1989) Modeling and observation of the radar polarization signature of forested areas, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3), 290-301

European Space Agency (2005) ASAR product handbook, *in* Missions Earth Observation, <http://envisat.esa.int/handbooks/asar>

Evans D L, Farr T G, van Zyl J J and Zekber H A (1988), *Radar polarimetry : Analysis Tools and Applications*, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 26(6), 774- 789

Ferro-Famil L, Pottier E, Saillard J, Dedieu J P, Bernier M and Fortin J P (1999) The Potential of Full Polarimetric SAR Data to Classify Dry Snowcover, *Proceeding Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '99*, 3, 1792-1794

Freeman A and Durden S L (1998) A Three-Component Scattering Model for Polarimetric SAR Data, IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 36(3), 963-973

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

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

ITT Industries Inc. (2006) ENVI – The Remote Sensing Exploitation Platform, <http://www.ittvis.com/envi/index.asp>

Japan Aerospace Exploration Agency (2005) PALSAR *in* Advanced Land Observing Satellite, <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/about/palsar.htm>

López-Martínez C, Ferro-Famil L and Pottier E (2005) Chapter 4: Polarimetric Decompositions *in* Part I - Tutorial on SAR Polarimetry, POLSARPRO tutorial, 28 pp

Karam M A, Fung A K, Lang R H and Chauhan N S (1992) A microwave scattering model for layered vegetation, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(4), 767-784

Karam M A, Amar F, Fung A K, Mougin E, Lopes A, Le Vine D M and Beaudoin A (1995) A microwave polarimetric scattering model for forest canopies based on vector radiative transfer theory, Remote Sensing of Environment, 53(1), 16-30

Kim Y and van Zyl J (2004) Vegetation effects on soil moisture estimation, Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'04, 2, 800 - 802

Koskinen J T, Pulliainen J T and Hallikainen M T (1997) The use of ERS-1 SAR data in snow melt monitoring, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 35(3), 601-610

Kennaugh E (1951) Effects of the type of polarization on echo characteristics, Antenna Lab, Ohio State University, Columbus

Lee J S (1980) Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-2, 165-168

Le Toan T, Beaudoin A, Riou J and Guyon D (1992), Relating forest biomass to SAR data, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 30(2), 403-411

Magagi R, Bernier M and Bouchard M-C (2002), Use of Ground Observation to Simulate the Seasonal Changes in the Backscattering Coefficient of the Subarctic Forest, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 40(2), 281-297

Mätzler C (1987) Applications of the Interaction of Microwave with the natural snow cover, Remote sensing Reviews, 2, 259-387

Moghaddam M, Durden S and Zebker H (1993) Effects of environmental change on radar backscatter in the Oregon transect, Proceeding Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'93, 2, 580-582

National Snow and Ice Data Centre (2006) Cold Land Processes Experiment (CLPX) Data, *in* Data Product and service, <http://nsidc.org/data/clpx>

Nyström A, Stjernman A and Vivekanandan J (1994) Temporal variations in radar backscatter coefficients of vegetation and snow cover, Proceeding Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'94, 4, 2483-2485

Oh Y, Sarabandi K and Ulaby F T (1992) An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 30(2), 370-381

Praks J, Koskinen J, Arslan A N, Kruopis N, Alasalmi H and Hallikainen M (1998) Cloude'target decomposition theorems applied to EMISAR data acquired during EMAC'95 snow campaign, Proceeding Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'98, 3, 1538-1540

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

Pottier E and Lee J s (2000) Application of the «H / A / alpha» Polarimetric Decomposition Theorem for Unsupervised Classification of Fully Polarimetric SAR Data Based on the Wishart Distribution, SAR Workshop, 26-29 October 1999, Toulouse, France ESA-SP, 450, p.335

Pullianen J, Koskinen J and Hallikainen M (2001) Compensation of Forest Canopy Effects in the Estimation of Snow Covered Area from SAR Data, Proceeding Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'01, 2, 813 - 815

Rott E and Nagler T (1995) Monitoring temporal dynamics of snowmelt with ERS-1 SAR, Proceeding Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'95 , 3, 1747-1749

Sinclair G (1950) The transmission and reception of elliptically polarized wave, Proceeding IRE, 38, 148-151

Shi J and Dozier (1997) Mapping Seasonal Snow with SIR-C/X-SAR in Mountainous Areas, Remote Sensing of Environment, 59, 294-307

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, 24(24), 5327-5344

Touzi R and Charbonneau F J (2004) PWS: a friendly and effective tool for polarimetric image analysis, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(3), 566–571

Ulaby F T, Moore R K and Fung A (1982) *Microwave Remote Sensing Active and Passive; Radar remote sensing and surface scattering and emission theory. Vol. 2.* Addison-Wesley Publishing Compagny Inc., 1065 - 2162

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

Ulaby F T, Sarabandi K, McDonald K, Whitt M and Dobson M C (1990) Michigan microwave canopy scattering model, *International Journal of Remote Sensing*, 11(7), 1223-1253

van Zyl J J, Zekber H A and Elachi C (1987) Imaging radar polarization signatures: Theory and observation, *Radio Science*, 22(4), 529-543

Zekber H A, van Zyl J.J and Held D N (1987) Imaging Radar Polarimetry From Wave Synthesis, *Journal of Geophysical research*, 92(B1), 683-701