



**HAL**  
open science

**Téledétection d'un couvert neigeux en milieux alpins à  
partir de données SAR  
polarimétriques multi-fréquentielles et multi-temporelles**

Audrey Martini

► **To cite this version:**

Audrey Martini. Téledétection d'un couvert neigeux en milieux alpins à partir de données SAR polarimétriques multi-fréquentielles et multi-temporelles. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Rennes 1, 2005. Français. NNT: . tel-00133805

**HAL Id: tel-00133805**

**<https://theses.hal.science/tel-00133805>**

Submitted on 27 Feb 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 3225

# **THESE**

présentée

**DEVANT L'UNIVERSITE DE RENNES 1**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE RENNES 1**

**Mention : Traitement du signal et Télécommunications**

par

**Audrey MARTINI**

Equipe d'accueil : Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes

Ecole doctorale : MATISSE

Composante universitaire : Structure et Propriétés de la Matière

## **Téledétection d'un couvert neigeux en milieux alpins à partir de données SAR polarimétriques multi-fréquentielles et multi-temporelles**

soutenue le 15 Septembre 2005 devant la commission d'examen

### **COMPOSITION DU JURY**

Présidente	Monique BERNIER	Professeur - INRS ETE Québec
Rapporteurs	Joseph SAILLARD	Professeur - Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes
	Walid TABBARA	Professeur - Université Pierre et Maris Curie, Paris VI
Examineurs	Laurent FERRO-FAMIL	Maître de Conférences - IETR - Université de Rennes 1
	Jean-Pierre DEDIEU	Chargé de Recherche - CNRS - LGGE de Grenoble
Directeur de thèse	Eric POTTIER	Professeur - IETR - Université de Rennes 1



*A mes parents, à mes grands-parents*



*L'imagination est plus importante que le savoir*

Albert Einstein



# REMERCIEMENTS

---

Mes remerciements vont tout d'abord à mon directeur de thèse, le Professeur Eric Pottier. J'étais venue pour faire de la télédétection, il m'a transmis le virus de la polarimétrie radar. Je le remercie pour sa disponibilité, pour son soutien et sa confiance en moi dans les moments de doute qui ont ponctué ces années de thèse. Merci pour ces interminables discussions qui m'ont aidée à "orienter mes axes de recherche" dans la bonne direction mais aussi à "garder la foi"!!!!!!

Je remercie aussi très sincèrement, Laurent Ferro-Famil, qui s'est trouvé être un encadrant surprenant. Jamais à court d'idées, il a su me guider malgré tout dans ce long et fastidieux périple qu'est la thèse. Il a toujours pris le temps (précieux parfois!) de répondre à mes questions mêmes les plus " naïves " et de rendre simple les raisonnements les plus confus !!!! Merci pour ta patience, car il t'en a fallu.

Merci à Monsieur Daniel Thouroude, directeur de l'Institut d'Electronique et de Télécommunication de Rennes, de m'avoir accueillie au sein de cette grande équipe et de m'avoir permis de réaliser ainsi mes travaux de recherche.

Je présente ici mes remerciements au Professeur Walid Tabbara et au Professeur Joseph Saillard qui ont accepté le rôle de rapporteur pour mon manuscrit.

Je tiens à remercier tout particulièrement "la Professeure" Monique Bernier de l'Institut National de la Recherche Scientifique, qui a fait un long trajet depuis le Québec pour présider mon jury. J'en suis très honorée.

Je remercie aussi Jean-Pierre Dedieu d'avoir accepté d'être membre de mon jury mais aussi pour ses nombreux conseils lors de nos conversations téléphoniques. Dans le cadre d'un sujet comme le mien, j'ai eu la chance de pouvoir aller sur le terrain pour faire des mesures nivologiques. Je remercie encore Jean-Pierre mais aussi les équipes de Météo-France et d'EDF situées à Grenoble, d'avoir organisé cette journée inoubliable. Je retiendrais tout particulièrement notre pause déjeuner autour d'une bouteille de vin et d'un saucisson.

Retour à Rennes, où je n'oublie pas les membres de l'IETR qui participent à la bonne ambiance quotidienne Yoann, Sylvain, Divitha, Gilles, Noëlle et tous les autres.

Quant à l'équipe SAPHIR, hé bien merci à vous, à ceux qui sont déjà partis voir d'autres horizons, à ceux qui sont là et aux autres, pour votre touche personnelle. Un peu de diversité ça fait pas de mal! Merci donc à Stéphane, Tadashi, Carlos, Sophie, Stefan, Shaharyar, Paul, Olivier, Ludo et notre "Casanova". Merci à toi Joëlle pour ton oreille attentive, ton dynamisme et tes confitures.

Merci aussi aux potes du club d'escalade: Alain, Benoît, Jarmila, Céline, Ronan, Xaxier, Adrienne et bien sûr Gwen, qui m'ont servi d'exutoire chaque fois que j'en avais besoin, et c'est pas peu dire..... Merci de votre patience et de votre indulgence dans mes moments de crise et de stress intense. Merci pour votre joie et votre bonne humeur toujours au rendez-vous. Gwen un monstrueux merci à toi pour avoir su me rendre le sourire quand c'était difficile, pour ton attention de tous les jours et ton soutien inconditionnel, merci pour tout...!!!!

Je tiens à saluer aussi Van's et Pierrot, chez qui c'est toujours les vacances, Fredo et Laetitia qui poursuivent leur rêve, Eric l'idéaliste, Mick et Chris les insaisissables!!!!

Tiens c'est ton tour Cyril. Que te dire si ce n'est merci bien sur. Où que tu te trouves, Paris, Rennes, Nantes et encore Paris, tu as toujours été là au final!!!!

Un grand, un énorme MERCI à mes parents et à mon frère qui m'ont toujours soutenue pendant ces longues années. Merci à Marie-Laure pour ses encouragements constants et ses conseils avisés. Qu'ils trouvent dans ces pages ma plus profonde reconnaissance et l'accomplissement d'un rêve. Je souhaite à mon fréro autant de belles choses si ce n'est encore mieux.





---

# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>Introduction</b>	<b>7</b>
<b>Chapitre I. Introduction à la polarimétrie radar</b>	<b>11</b>
<i>I.1 Introduction</i>	<i>11</i>
<i>I.2 Polarisation d'une onde</i>	<i>12</i>
I.2.1 Polarisation d'une onde électromagnétique plane	12
I.2.2 Ellipse de polarisation et état de polarisation	12
I.2.3 Le vecteur de Jones	13
I.2.4 Le vecteur de Stokes et le vecteur de Stokes modifié	15
I.2.4.1 Le vecteur de Stokes	15
I.2.4.2 Le vecteur de Stokes modifié	16
I.2.5 Addition incohérente des vecteurs de Stokes	17
<i>I.3 Convention des systèmes de coordonnées</i>	<i>17</i>
I.3.1 Système de coordonnées en convention FSA	18
I.3.2 Système de coordonnées en convention BSA	19
<i>I.4 Représentation polarimétrique d'une cible radar</i>	<i>20</i>
I.4.1 Représentation matricielle cohérente	20
I.4.2 Représentation matricielle incohérente	21
I.4.2.1 La matrice de Kennaugh	21
I.4.2.2 La matrice de Mueller modifiée	22
I.4.2.3 Le vecteur cible	23
I.4.2.4 Les matrices de cohérence et de covariance	24
<i>I.5 Théorèmes de décomposition polarimétrique</i>	<i>25</i>
I.5.1 Décomposition polarimétrique suivant un modèle de diffusion	25
I.5.1.1 La diffusion de volume	26
I.5.1.2 La double réflexion	27
I.5.1.3 La diffusion de surface	27
I.5.2 Théorèmes de décomposition polarimétrique aux valeurs/vecteurs propres	29
I.5.2.1 Les valeurs propres	29
I.5.2.2 Détermination du nombre de mécanismes dominants	30
I.5.2.3 Les vecteurs propres	31
I.5.2.4 Interprétation statistique de la décomposition	32
I.5.2.5 Décomposition de l'espace $H - \bar{\alpha}$	33
<i>I.6 Conclusion</i>	<i>34</i>

<b>Chapitre II. Présentation des données</b>	<b>37</b>
II.1 Introduction	37
II.2 Les sites d'étude des Alpes	38
II.2.1 Les données radar	38
II.2.2 Les mesures terrain	40
II.2.3 Les images optiques Landsat	42
II.3 Le modèle numérique de terrain	43
II.3.1 La mission SRTM	43
II.3.2 Les caractéristiques du MNT SRTM	44
II.3.3 Utilisation du MNT	45
II.3.4 Les images optiques projetées dans le plan oblique radar	49
II.4 Conclusion	52
<b>Chapitre III. Modélisation de la diffusion d'un couvert neigeux</b>	<b>53</b>
III.1 Introduction	53
III.2 Caractérisation du couvert neigeux	54
III.2.1 Composition de la neige	54
III.2.1.1 Les particules de glace	54
III.2.1.2 La teneur en eau liquide	56
III.2.1.3 La densité de la neige	57
III.2.2 La constante diélectrique de la neige	58
III.2.2.1 La neige sèche	58
III.2.2.2 La neige humide	59
III.2.3 La profondeur de pénétration	61
III.2.4 L'interface air-neige	63
III.2.5 Synthèse	63
III.3 Le modèle de diffusion d'un sol recouvert de neige	64
III.3.1 Le transfert radiatif	65
III.3.1.1 L'équation du transfert radiatif scalaire	65
III.3.1.2 L'équation du transfert radiatif vectoriel	66
III.3.1.3 Solution itérative de l'équation du transfert radiatif vectoriel	70
III.3.2 Modèle de diffusion de surface	78
III.3.2.1 Description d'une surface rugueuse	78
III.3.2.2 La méthode de Kirchhoff – Approximation scalaire	79
III.3.2.3 La méthode de l'équation intégrale (IEM)	80
III.4 Caractérisation polarimétrique d'un sol enneigé	82
III.4.1 La réponse d'un sol en rétrodiffusion	82
III.4.1.1 Comportement en puissance	82
III.4.1.2 Comportement polarimétrique	86
III.4.2 La rétrodiffusion de volume	89
III.4.2.1 Comportement en puissance	89
III.4.2.2 Comportement polarimétrique	91
III.4.3 Le mécanisme de double rebond	92
III.4.3.1 Comportement en puissance	92
III.4.3.2 Comportement polarimétrique	94
III.4.4 La rétrodiffusion totale d'un couvert neigeux	95
III.4.4.1 Comportement en puissance	95

III.4.4.2	Comportement polarimétrique	96
III.5	<i>Conclusion</i>	97
<b>Chapitre IV.</b>	<b>Cartographie de la neige sèche</b>	<b>101</b>
IV.1	<i>Introduction</i>	101
IV.2	<i>Pré-traitement des données SAR polarimétriques</i>	102
IV.2.1	Filtrage des données	103
IV.2.1.1	Moyennage multi-vues	104
IV.2.1.2	Filtrage de speckle	104
IV.2.2	Regroupement par caractéristiques polarimétriques	105
IV.3	<i>Analyse au moyen des paramètres polarimétriques <math>H</math> et <math>\bar{\alpha}</math></i>	106
IV.3.1	Variations fréquentielles	106
IV.3.2	Variations temporelles	108
IV.3.3	Discussion	111
IV.4	<i>Approche multi-temporelle et multi-fréquentielle</i>	111
IV.4.1	Détection des forêts	112
IV.4.1.1	Décomposition à partir d'un modèle de diffusion	112
IV.4.1.2	Combinaisons entre l'entropie et l'anisotropie	114
IV.4.1.3	Application aux données SAR en bande L	114
IV.4.2	Détection des surfaces	117
IV.4.3	Détection des forêts enneigées	119
IV.4.4	Détection des surfaces enneigées	121
IV.4.4.1	Optimisation du Contraste Polarimétrique classique (OPCE)	121
IV.4.4.2	Maximisation de la Variation du Contraste Polarimétrique (PCVE)	123
IV.4.5	Cartographie globale multi-fréquentielle du couvert neigeux	127
IV.4.5.1	Représentation de l'ensemble du couvert neigeux	127
IV.4.5.2	Algorithme de synthèse	128
IV.5	<i>Approche multi-temporelle et mono-fréquentielle en bande C</i>	129
IV.5.1	Application à la bande C de la méthode développée en bande L	129
IV.5.1.1	Détection des forêts	129
IV.5.1.2	Détection des surfaces	131
IV.5.1.3	Détection des forêts enneigées	132
IV.5.1.4	Détection de surfaces enneigées	133
IV.5.2	Méthodes adaptées à la bande C	133
IV.5.2.1	Détection des forêts : Procédure basée sur l'entropie seule	133
IV.5.2.2	Détection des surfaces : Procédure basée sur l'angle $\bar{\alpha}$	134
IV.5.2.3	Détection de la petite végétation	135
IV.5.2.4	Détection des forêts enneigées	135
IV.5.2.5	Détection des surfaces enneigées	136
IV.5.2.6	Détection de la neige sur la petite végétation	137
IV.5.3	Cartographie globale mono-fréquentielle du couvert neigeux	138
IV.5.3.1	Représentation de l'ensemble du couvert neigeux	138
IV.5.3.2	Algorithme de synthèse des deux méthodes	139
IV.6	<i>Estimation des performances</i>	140
IV.6.1	Approche multi-temporelle et multi-fréquentielle	140
IV.6.1.1	Site de Risoul	140
IV.6.1.2	Site d'Izoard	141

IV.6.1.3	Discussion	143
IV.6.2	Approche multi-temporelle et mono-fréquentielle en bande C	143
IV.6.2.1	Estimation à partir de la méthode développée en bande L	143
IV.6.2.2	Estimation à partir de la méthode adaptée à la bande C	145
IV.6.3	Récapitulatif	147
IV.7	Conclusion	147
<b>Chapitre V.</b>	<b>Analyse polarimétrique altitudinale du manteau neigeux</b>	<b>151</b>
V.1	Introduction	151
V.2	Analyse des paramètres physiques et polarimétriques	152
V.2.1	Modélisation du couvert neigeux par CROCUS	152
V.2.2	Relations entre les paramètres polarimétriques et l'altitude	154
V.2.2.1	Les variations temporelles de l'indicateur $\bar{\alpha}$ en fonction de l'altitude	154
V.2.2.2	Les variations temporelles de l'entropie en fonction de l'altitude	155
V.2.2.3	Les variations temporelles du coefficient $\sigma_{hv}$ en fonction de l'altitude	155
V.2.2.4	Le comportement polarimétrique toutes orientations confondues	162
V.2.2.5	Discussion	165
V.3	Approche alternative pour l'estimation du comportement polarimétrique de l'épaisseur du couvert neigeux	165
V.4	Conclusion	168
	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>169</b>
	<b>Références</b>	<b>173</b>
<b>Annexe A</b>	<b>Validation des méthodes de cartographie: Application au site de Nezer</b>	<b>183</b>
<b>Annexe B</b>	<b>Solution numérique de l'OPCE</b>	<b>185</b>

---



# INTRODUCTION

---

La télédétection d'environnements naturels au moyen d'images radar de type SAR a connu récemment un essor considérable. En effet l'imagerie radar présente une faible sensibilité aux conditions atmosphériques (météorologiques) lors des mesures, contrairement à l'optique. Cette technique d'observation permet l'extraction de paramètres bio et géo-physiques pertinents fournissant ainsi un moyen d'accroître nos connaissances sur l'environnement naturel. Les applications radar sont la plupart du temps utilisées pour la compréhension des phénomènes à grande échelle tels que la météorologie, la climatologie voire l'interprétation des phénomènes de rétrodiffusion entre le sol et le couvert végétal. Néanmoins, les capteurs qui opèrent en mono-polarisation comme RADARSAT-1 ou ERS-1, ont des capacités limitées pour des applications autres que la cartographie en agriculture, foresterie ou hydrologie. Ainsi les radars multi-fréquences et/ou multi-polarisations interférométriques aéroportés et satellitaires comme SIR-C (JPL), ESAR (DLR), EMISAR (DDRE), ENVISAT (ESA), RADARSAT II (CSA) et ALOS (NASDA) sont des outils plus performants qui fournissent une information sensiblement accrue pour la mesure de certaines grandeurs physiques des milieux naturels comme la hauteur, la densité, l'humidité.

Dans les domaines des fréquences intermédiaires (bande L, 1.3 GHz et bande C, 5.3 GHz), l'identification de la neige sèche demeure un problème difficile à résoudre [Shi 93], [Koskinen 97], [Bernier 98a]. De plus, dans le contexte alpin, la topographie influe très fortement sur l'amplitude et les caractéristiques polarimétriques du signal [Nägler 05]. En bande L, la neige sèche influe peu sur le signal rétrodiffusé dont la composante dominante est directement reliée à la réponse du milieu sous jacent [Shi 00a], [Shi 00b], [Bernier 95]. En bande C, la nature de la réponse rétrodiffusée dépend fortement de l'angle d'incidence. Pour de faibles valeurs de l'angle d'incidence la nature de la diffusion correspond au mécanisme de diffusion de surface, pour des valeurs plus élevées (supérieures à 35°) le mécanisme dominant correspond à la diffusion des particules [Guneriussen 97], [Shi 94].

Les propriétés électromagnétiques de la neige sèche en font un milieu peu atténuateur qui affaiblit de 1 dB le signal rétrodiffusé par rapport à une image sans neige. Au contraire, dans le cas de la neige humide, le signal est fortement réfléchi et sa réponse est atténuée de façon significative de 3dB. Il devient alors plus aisé en période de fusion printanière de pouvoir identifier directement la neige par rapport aux autres surfaces environnantes [Nägler 96], [Nägler 00]. Ainsi dans le cas précis des applications nivologiques, l'imagerie SAR en mode de polarisation parallèle (HH ou VV) peut prétendre à cartographier l'extension du couvert nival essentiellement sous condition de neige humide [Magagi 03].

Pour les gestionnaires de l'eau ou les climatologues, la connaissance de paramètres caractéristiques du couvert neigeux en période hivernale, où la neige est sèche, est essentielle afin

d'obtenir un suivi cartographique complet de l'étape d'accumulation à l'étape de fusion. A partir d'images SAR, plusieurs études ont été menées pour atteindre cet objectif [Storvold 05], [Malnes 02], voire tenter de remonter à l'Equivalent En Eau (EEN) du manteau neigeux [Bernier 98b], [Corbane 05]. Dans ce contexte, les nouveaux capteurs SAR expérimentaux ou opérationnels peuvent apporter des réponses plus précises [Hallikainen 02]. Beaucoup de modèles hydrologiques pour la prévision des débits en haute montagne sont des modèles globaux fondés sur un réseau de mesures ponctuelles très sensibles aux variations climatologiques [Paquet 01]. L'apport essentiel de l'imagerie SAR repose sur une cartographie tout temps, donc une spatialisation de la mesure qui permet une discrétisation des modèles hydrologiques à l'échelle du bassin versant en complément du réseau au sol existant [Gailhard 05]. Les propriétés polarimétriques d'un milieu naturel ont permis d'établir en bande L et C des procédures multi-temporelles de cartographie de la neige sèche en milieux alpins [Martini 05a], [Martini 05b].

Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit, portent sur l'analyse de l'information radar polarimétrique afin de cartographier un couvert de neige sèche et de caractériser son comportement altitudinal au moyen de paramètres polarimétriques pertinents.

Ce mémoire s'organise autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une présentation des notions de polarimétrie radar essentielles à la bonne compréhension des développements mathématiques qui seront présents tout au long de ce manuscrit. Les représentations cohérentes et incohérentes caractérisant le comportement polarimétrique d'un diffuseur sont décrites sous des formes matricielles. Deux théorèmes de décomposition permettant d'analyser le mécanisme de rétrodiffusion global d'un milieu sont présentés. Le premier, généralement utilisé pour l'étude de milieux naturels recouverts de végétation, se base sur un modèle de diffusion. Le second est obtenu par une décomposition aux valeurs et vecteurs propres à partir de laquelle des paramètres polarimétriques, permettant une analyse et une interprétation du phénomène de diffusion, sont calculés.

Dans le deuxième chapitre, les sites d'étude et les données SAR polarimétriques utilisées sont présentés. Ce chapitre décrit avec précision les caractéristiques d'acquisition des données SAR mais aussi les différentes méthodes de mesures terrain sans lesquelles l'analyse de données radar serait incomplète. Une technique de géo-référencement, utilisant un modèle numérique de terrain (MNT), est décrite. Cette étape est nécessaire à la comparaison d'images optiques Landsat, généralement liées à une projection au sol et d'images SAR, définies dans le plan d'incidence oblique.

Afin d'analyser et d'interpréter la réponse rétrodiffusée par un couvert de neige, un modèle de diffusion polarimétrique est proposé dans le troisième chapitre. Les propriétés physiques et électromagnétiques d'un tel milieu sont tout d'abord présentées, puisque nécessaires à l'étape de modélisation. Le modèle de diffusion se base sur la théorie du transfert radiatif vectoriel. Une résolution analytique de l'équation du transfert radiatif permet de décrire le comportement électromagnétique du phénomène de diffusion et de rendre compte des différents mécanismes de diffusion intervenant à l'ordre un. Afin de mettre en évidence l'importance de l'influence de certains paramètres physiques ou radar, une étude est menée pour différentes configurations de mesures.

---

Le quatrième chapitre est consacré à la discrimination de la neige en milieux alpins. Une analyse multi-temporelle et multi-fréquentielle de paramètres polarimétriques déterminants est menée afin de mettre en évidence des variations spécifiques d'un paramètre en présence de neige. Du fait de la grande diversité de l'environnement en milieux alpins, il apparaît alors nécessaire de mettre au point au préalable des procédures de classification des milieux sous jacents comme les sols nus et les forêts, à partir des données automnales, en l'absence de neige.

-Une première approche séquentielle, multi-temporelle et multi-fréquentielle de discrimination de la neige est développée. L'étape initiale consiste à classer les milieux naturels sous jacents à partir des données automnales en bande L, au moyen de paramètres polarimétriques obtenus lors de la décomposition aux valeurs et vecteurs propres. La neige sèche est alors localisée séparément sur chaque milieu à partir de méthodes adaptées et appliquées sur les données SAR en bande C. Les forêts enneigées sont détectées au moyen de variations temporelles du paramètre  $\bar{\alpha}$ . Les surfaces enneigées sont, quant à elle, estimées à partir d'une nouvelle méthode qui optimise les variations du contraste polarimétrique entre l'été et l'hiver.

-Une seconde approche mono-fréquentielle est développée pour s'adapter aux nouveaux capteurs SAR travaillant avec une seule bande de fréquence. Dans un premier temps, les techniques de classification des milieux naturels sous jacents, utilisées en bande L, sont appliquées aux données radar en bande C. Des méthodes adaptées au comportement polarimétrique spécifique des milieux naturels en bande C sont aussi proposées. La neige est alors localisée au moyen des mêmes méthodes que celles utilisées dans l'approche multi-fréquentielle.

Le dernier chapitre présente une analyse des variations été-hiver des paramètres polarimétriques en fonction de l'altitude afin de caractériser le comportement altitudinal d'un couvert neigeux. L'évolution linéaire des variations temporelles en fonction de l'altitude permet de rendre compte de fluctuations autour d'un comportement moyen qui permet de caractériser le comportement altitudinal d'un couvert neigeux.

Ce mémoire se termine par une conclusion et par une présentation des différentes perspectives offertes dans le cadre de la continuité de ce travail.



# CHAPITRE I.

## INTRODUCTION A LA POLARIMETRIE RADAR

---

### I.1 Introduction

La télédétection radar polarimétrique est l'étude de la réponse électromagnétique d'une cible ou d'un milieu naturel à un signal polarisé incident. Ainsi, une cible est caractérisée par les variations de la polarisation de l'onde électromagnétique qu'elle diffuse par rapport à l'onde qui l'éclaire. Ces variations sont intimement liées à ses propriétés bio et géo-physiques telles que sa constante diélectrique, sa taille, sa géométrie, etc. La polarimétrie radar cherche à définir des paramètres caractéristiques d'un diffuseur à partir de la connaissance de son comportement polarimétrique.

Ce chapitre introduit les bases mathématiques de la théorie de la polarimétrie utilisées ultérieurement pour l'analyse et l'interprétation des différentes composantes intervenant dans la diffusion par un couvert neigeux.

La première partie de ce chapitre traite des différentes représentations vectorielles utilisées pour définir la polarisation d'une onde électromagnétique. Deux représentations sont exposées : l'une cohérente sous la forme du vecteur de Jones, l'autre incohérente sous la forme du vecteur de Stokes.

La deuxième partie de ce chapitre présente les deux conventions des systèmes de coordonnées dans lesquelles la propagation de l'onde est généralement représentée lors de son étude : la convention FSA (Forward Scattering Alignment), généralement utilisée lors de la modélisation de la réponse électromagnétique d'un milieu et la convention BSA (Back Scattering Alignment), couramment employée en polarimétrie radar.

Dans une troisième partie sont introduites des représentations matricielles reliant la polarisation d'une onde diffusée à celle d'une onde incidente et caractérisant le comportement polarimétrique d'un diffuseur. Dans le cas cohérent, la matrice de Sinclair permet de relier les vecteurs de Jones incident et diffusé. Dans le cas d'un milieu aléatoire, comme la plupart des milieux naturels, il est alors nécessaire d'utiliser des matrices incohérentes, qui décrivent les propriétés statistiques de la scène au moyen de moments d'ordre deux. La matrice de Kennaugh est une de ces matrices et relie le vecteur de Stokes incident au vecteur de Stokes diffusé. En modélisation, la matrice de Mueller modifiée est plus largement utilisée et relie le vecteur de Stokes modifié incident au vecteur de Stokes modifié diffusé. Les propriétés caractéristiques d'une cible peuvent aussi être définies au

moyen de deux autres représentations incohérentes, la matrice de covariance et la matrice de cohérence.

C'est à partir de ces deux dernières matrices que se basent les théorèmes de décomposition présentés dans la quatrième partie. L'analyse et l'interprétation des données polarimétriques radar nécessitent l'utilisation d'outils polarimétriques spécifiques, qui permettent ainsi de mettre en évidence différents mécanismes de diffusion. Le théorème proposé par A. Freeman [Freeman 98] se base sur un modèle de diffusion et est plus particulièrement approprié pour les milieux naturels recouverts de végétation. Le théorème de décomposition développé par S. R. Cloude et E. Pottier se base sur une décomposition aux valeurs et vecteurs propres de la matrice de cohérence. Des paramètres polarimétriques extraits de cette décomposition rendent possible une interprétation physique des mécanismes de diffusion.

## I.2 Polarisation d'une onde

### I.2.1 Polarisation d'une onde électromagnétique plane

Une onde électromagnétique plane est définie par un vecteur champ électrique et un vecteur champ magnétique, mutuellement orthogonaux. Ces deux vecteurs étant reliés l'un à l'autre par les équations de Maxwell, l'onde électromagnétique peut être représentée seulement par les variations du champ électrique en fonction du temps. Dans le cas d'une onde plane monochromatique, définie dans un repère orthonormé  $(0, \hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$  et se propageant dans une direction colinéaire à  $\hat{z}$ , le champ électrique  $\xi$  a pour composantes :

$$\xi(z, t) = \begin{cases} \xi_x = \xi_{ox} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ \xi_y = \xi_{oy} \cos(\omega t - kz + \delta_y) \\ \xi_z = 0 \end{cases} \quad (\text{I-1})$$

où  $\omega$  est la pulsation de l'onde et  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  est le nombre d'onde.

$\delta_x$  et  $\delta_y$  représentent les phases absolues des composantes à  $t = 0$  et  $z = 0$ .

A un instant  $t$  donné, l'extrémité du vecteur champ électrique décrit une trajectoire spatiale de forme hélicoïdale.

### I.2.2 Ellipse de polarisation et état de polarisation

L'état de polarisation de l'onde est défini par la trajectoire du vecteur champ électrique dans le plan  $(o, \hat{x}, \hat{y})$  au cours du temps. Les composantes transverses du champ électrique vérifient alors l'équation d'une ellipse donnée par [Ulaby 90], [Germond 01] :

$$\left( \frac{\xi_x}{\xi_{ox}} \right)^2 - 2 \frac{\xi_x \xi_y}{\xi_{ox} \xi_{oy}} \cos(\delta_y - \delta_x) + \left( \frac{\xi_y}{\xi_{oy}} \right)^2 = \sin(\delta_y - \delta_x)^2 \quad (\text{I-2})$$

La figure I-1 représente l'ellipse de polarisation qui permet de définir l'état de polarisation d'une onde électromagnétique à une abscisse  $z = z_0$ .

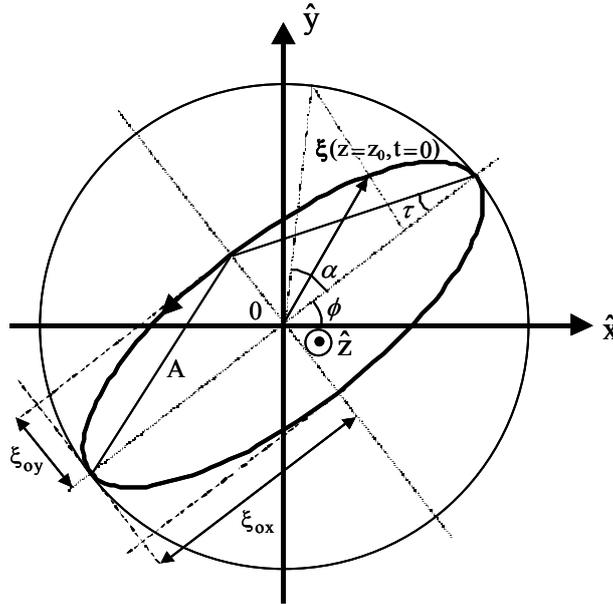


Figure I-1 Ellipse de polarisation à l'abscisse  $z = z_0$

L'état de polarisation de l'onde électromagnétique (figure I-1) est totalement défini par [Huynen 70], [Pottier 92], [Boerner 92] :

- l'angle d'orientation  $\phi$ , formé par l'axe des x croissants et par le grand axe de l'ellipse, appartenant à l'intervalle  $[-\pi/2, \pi/2]$ .
- l'ellipticité  $\tau$  représentant l'ouverture de l'ellipse et comprise dans le domaine  $[-\pi/4, \pi/4]$ . Le signe de  $\tau$  indique le sens de parcours de l'ellipse. La polarisation est dite *main droite* si l'ellipse est parcourue dans le sens horaire lorsqu'un observateur regarde l'onde dans la direction de propagation. Lorsque  $\tau$  est nul, la polarisation est *linéaire*, alors que  $\tau = \pm\pi/4$  traduit une polarisation circulaire. Une valeur de  $\tau$  quelconque indique une polarisation elliptique.
- l'amplitude  $A$ , fonction de la longueur des demi-axes de l'ellipse, définie par  $A = \sqrt{\xi_{0x}^2 + \xi_{0y}^2}$ .
- la phase absolue du vecteur champ électrique  $\xi$  à  $t = 0$  est représentée par  $\alpha$ .

De façon générale il existe trois états de polarisation principaux :

- la polarisation linéaire,
- la polarisation elliptique gauche et droite,
- la polarisation circulaire gauche et droite, cas particulier de la polarisation elliptique.

### I.2.3 Le vecteur de Jones

En utilisant l'aspect monochromatique de l'onde, il est possible de définir une expression simple de l'enveloppe complexe,  $\underline{\xi}(z)$ , du champ électrique de la façon suivante :

$$\xi(z, t) = \text{Re}(\underline{\xi}(z)e^{j\omega t}) \quad (\text{I-3})$$

Le vecteur  $\underline{\xi}(z)$  est à valeurs complexes et ses composantes sont indépendantes du temps. Comme cela a été vu précédemment les caractéristiques de l'ellipse de polarisation sont indépendantes de la position  $z_0$  le long de l'axe de propagation. Une représentation réduite du champ électrique peut alors être définie sous une forme complexe indépendante du temps et de l'espace, appelée vecteur de Jones. Son expression est donnée par [Boerner 90], [Boerner 91], [Pottier 92] :

$$\mathbf{E} = \underline{\xi}(z=0) = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_x| e^{j\delta_x} \\ |E_y| e^{j\delta_y} \end{bmatrix} \quad (\text{I-4})$$

Le vecteur de Jones contient toute l'information sur l'amplitude, la phase et l'état de polarisation d'une onde monochromatique transverse électromagnétique.

Tout état de polarisation représenté par son vecteur de Jones est exprimé dans une base orthogonale  $(\hat{x}, \hat{y})$  appelée base de polarisation, qui sert de référence à la définition des paramètres de l'ellipse de polarisation :

$$\mathbf{E}_{(\hat{x}, \hat{y})} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} \quad (\text{I-5})$$

$$\mathbf{E}_{(\hat{x}, \hat{y})} = A e^{-j\alpha} \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \tau \\ j \sin \tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} \quad (\text{I-6})$$

$\phi$  étant l'angle de rotation de l'ellipse et  $\tau$  l'angle d'ouverture.

Le tableau I-1 représente quelques exemples de vecteurs de Jones associés à des états de polarisation canoniques. Ces vecteurs sont de normes unitaires et sont représentés dans la base de polarisation horizontale-verticale  $(\hat{x}, \hat{y})$ .

Etat de polarisation	Ellipticité $\tau$ ( $^\circ$ )	Orientation $\phi$ ( $^\circ$ )	$\mathbf{E}_{(\hat{x}, \hat{y})}$
Linéaire vertical	$0^\circ$	$90^\circ$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
Linéaire horizontal	$0^\circ$	$0^\circ$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
Circulaire gauche	$+45^\circ$	Indéterminée	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$
Circulaire droite	$-45^\circ$	Indéterminée	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$

Tableau I-1 Exemples de vecteurs de Jones associés à des états de polarisation canoniques

## I.2.4 Le vecteur de Stokes et le vecteur de Stokes modifié

### I.2.4.1 Le vecteur de Stokes

Le vecteur de Jones traité précédemment caractérise parfaitement les propriétés polarimétriques d'une onde déterministe. Toutefois il arrive que l'onde reçue soit affectée par des perturbations dues aux caractères aléatoires d'un milieu naturel ou à des instabilités du système de mesure. Il est alors nécessaire de caractériser les variations temporelles ou spatiales du vecteur de Jones de façon statistique au moyen de moments d'ordre deux.

De cette façon il est possible de construire la matrice de covariance  $\mathbf{J}$  du vecteur de Jones définie par [Huynen 70] :

$$\mathbf{J} = \left\langle \mathbf{E}_{(\hat{x}, \hat{y})} \mathbf{E}_{(\hat{x}, \hat{y})}^{*T} \right\rangle = \begin{bmatrix} \langle E_x E_x^* \rangle & \langle E_x E_y^* \rangle \\ \langle E_y E_x^* \rangle & \langle E_y E_y^* \rangle \end{bmatrix} \quad (\text{I-7})$$

où  $\langle \rangle$  représente l'opérateur moyenne. Les termes diagonaux de  $\mathbf{J}$  sont les moments d'ordre deux des composantes du vecteur de Jones, les éléments croisés représentant les inter-corrélations.

Le vecteur de Stokes est défini par la projection de la matrice de covariance sur le groupe des matrices de Pauli [Cloude 86] :

$$\mathbf{g} = [g_0 \ g_1 \ g_2 \ g_3]^T \text{ avec } g_i = \text{tr}(\mathbf{J} \boldsymbol{\sigma}_i) \quad (\text{I-8})$$

où  $\text{tr}$  représente l'opérateur trace, et  $\boldsymbol{\sigma}_i$  une matrice du groupe des matrices de Pauli suivant :

$$\boldsymbol{\sigma}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\sigma}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\sigma}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\sigma}_3 = \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{I-9})$$

Le vecteur de Stokes peut alors être décrit par les paramètres du vecteur de Jones  $E_x$ ,  $E_y$  et  $\delta = \delta_y - \delta_x$  de la façon suivante [Tsang 85], [Ulaby 90], [Pottier 92] :

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_0 = |E_x|^2 + |E_y|^2 \\ g_1 = |E_x|^2 - |E_y|^2 \\ g_2 = 2 \text{Re}(E_x E_y^*) \\ g_3 = -2 \text{Im}(E_x E_y^*) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_x|^2 + |E_y|^2 \\ |E_x|^2 - |E_y|^2 \\ 2 |E_x| |E_y| \cos \delta \\ -2 |E_x| |E_y| \sin \delta \end{bmatrix} \quad (\text{I-10})$$

Le vecteur de Stokes est une représentation incohérente de l'état de polarisation d'une onde plane électromagnétique. Ses composantes sont réelles et ne tiennent pas compte de la phase absolue  $\alpha$ . La dénomination incohérente vient du fait que les phases interviennent sous forme relative par l'intermédiaire de  $\delta$ , déphasage entre les deux composantes du champ électrique.

Dans une base de polarisation horizontale-verticale  $(\hat{h}, \hat{v})$  le vecteur de Stokes s'écrit donc :

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_0 = |E_h|^2 + |E_v|^2 \\ g_1 = |E_h|^2 - |E_v|^2 \\ g_2 = 2 \text{Re}(E_h E_v^*) \\ g_3 = -2 \text{Im}(E_h E_v^*) \end{bmatrix} \quad (\text{I-11})$$

$g_0$  est proportionnel à l'intensité totale de l'onde.  $g_1$  représente la différence entre les intensités des composantes horizontale et verticale.  $g_2$  et  $g_3$  sont liés à la corrélation entre les composantes  $\hat{h}$  et  $\hat{v}$  du champ électrique. Ces quatre composantes réelles ne sont pas indépendantes les unes des autres puisque dans le cas d'une onde complètement polarisée [Pottier 92]:

$$g_0^2 = g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 \quad (\text{I-12})$$

Le degré de polarisation de l'onde est défini par :

$$\gamma = \frac{\sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2}}{g_0} \quad (\text{I-13})$$

Lorsque la polarisation est constante au cours du temps, le degré de polarisation de l'onde  $\gamma$  est égal à 1.

Dans le cas d'une onde partiellement polarisée une partie de l'intensité de l'onde n'est pas polarisée et (I-12) devient :

$$g_0^2 \geq g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 \quad (\text{I-14})$$

#### I.2.4.2 Le vecteur de Stokes modifié

Pour la modélisation, il est plus commode d'utiliser le vecteur de Stokes modifié, en effet, il donne accès aux intensités des composantes de polarisation horizontale et verticale de façon séparée.

L'information sur la phase relative entre canaux reste inchangée. Le vecteur de Stokes modifié s'écrit [Ulaby 90] :

$$\tilde{\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} I_v \\ I_h \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_v|^2 \\ |E_h|^2 \\ 2\text{Re}(E_h E_v^*) \\ -2\text{Im}(E_h E_v^*) \end{bmatrix} \quad (\text{I-15})$$

Ces paramètres caractérisent complètement l'état de polarisation d'une onde [Karam 83].

Le vecteur de Stokes modifié est relié au vecteur de Stokes par la relation [Tsang 85] [Eom 84] :

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{I}} \quad (\text{I-16})$$

### I.2.5 Addition incohérente des vecteurs de Stokes

Lorsque plusieurs ondes indépendantes se combinent, les composantes du vecteur de Stokes de l'onde résultante sont la somme des composantes du vecteur de Stokes de chacune des ondes prises individuellement. Par indépendance, on entend que les différentes ondes composant l'onde résultante n'ont aucune relation permanente de phase entre elles [Tsang 85].

Considérons un champ électrique qui est la somme cohérente de champs provenant de N sources différentes tel que [Tsang 85] :

$$\mathbf{E} = \sum_{n=1}^N \mathbf{E}_n \quad (\text{I-17})$$

Cette expression écrite en fonction du premier élément du vecteur de Stokes modifié donne [Tsang 00] :

$$I_v = \sum_n I_{v_n} + \sum_n \sum_m \langle E_{v_n} E_{v_m}^* \rangle \quad (\text{I-18})$$

S'il n'existe aucune corrélation entre les champs diffusés par la n-ième et la m-ième sources le deuxième terme est nul. Le vecteur de Stokes total est donc la somme des vecteurs de Stokes diffusés par chaque source. La même relation existe pour les autres composantes du vecteur de Stokes. Ainsi :

$$\begin{aligned} I_v &= \sum_n I_{v_n} \\ I_h &= \sum_n I_{h_n} \\ U &= \sum_n U_n \\ V &= \sum_n V_n \end{aligned} \quad (\text{I-19})$$

La phase de l'onde diffusée par un diffuseur dépend de la position de ce dernier dans le milieu étudié. C'est pourquoi l'addition incohérente des vecteurs de Stokes n'est valide que si la distribution des diffuseurs est suffisamment aléatoire pour que les ondes diffusées aient aussi une phase aléatoire.

## I.3 Convention des systèmes de coordonnées

Dans le but d'exprimer des relations entre l'onde incidente et l'onde diffusée lors de l'interaction avec une cible, il est nécessaire de définir un système de coordonnées et les conventions s'y rapportant. Deux conventions majeures sont utilisées dans la littérature, la convention FSA (Forward Scattering Alignment) utilisée principalement en modélisation électromagnétique pour résoudre des problèmes en configuration bistatique et la convention BSA (Back Scattering Alignment) utilisée en télédétection radar où la configuration de travail est monostatique. Dans les deux cas, les ondes électromagnétiques incidente et diffusée sont exprimées dans des systèmes de coordonnées locales centrés respectivement sur les antennes de transmission et de réception [Ulaby 90].

### I.3.1 Système de coordonnées en convention FSA

En convention FSA les vecteurs unitaires dans les directions verticale et horizontale, respectivement  $\hat{v}$  et  $\hat{h}$ , sont toujours définis par rapport à la direction de propagation de l'onde, colinéaire au vecteur  $\hat{k}$ . Le système de coordonnées est défini par le trièdre direct  $(\hat{k}, \hat{v}, \hat{h})$ . La direction de propagation de l'onde incidente est la même que celle de l'onde diffusée, alors  $\hat{k}_i = \hat{k}_s$ .

Les vecteurs unitaires dans le plan d'incidence sont donnés par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}\hat{k}_i &= \cos \phi_i \sin \theta_i \hat{x} + \sin \phi_i \sin \theta_i \hat{y} + \cos \theta_i \hat{z} \\ \hat{h}_i &= -\sin \phi_i \hat{x} + \cos \phi_i \hat{y} \\ \hat{v}_i &= \cos \phi_i \cos \theta_i \hat{x} + \sin \phi_i \cos \theta_i \hat{y} - \sin \theta_i \hat{z}\end{aligned}\quad (\text{I-20})$$

Dans le cas monostatique ( $\theta_s = \theta_i$  et  $\phi_s = \phi_i + \pi$ ) en convention FSA les relations entre les vecteurs unitaires incidents et diffusés deviennent  $\hat{k}_s = -\hat{k}_i$ ,  $\hat{v}_s = \hat{v}_i$ ,  $\hat{h}_s = -\hat{h}_i$ .

De même les vecteurs unitaires dans le plan de réception sont définis comme suit :

$$\begin{aligned}\hat{k}_s &= \cos \phi_s \sin \theta_s \hat{x} + \sin \phi_s \sin \theta_s \hat{y} + \cos \theta_s \hat{z} \\ \hat{h}_s &= -\sin \phi_s \hat{x} + \cos \phi_s \hat{y} \\ \hat{v}_s &= \cos \phi_s \cos \theta_s \hat{x} + \sin \phi_s \cos \theta_s \hat{y} - \sin \theta_s \hat{z}\end{aligned}\quad (\text{I-21})$$

La figure I-2 illustre la base de polarisation en convention FSA.

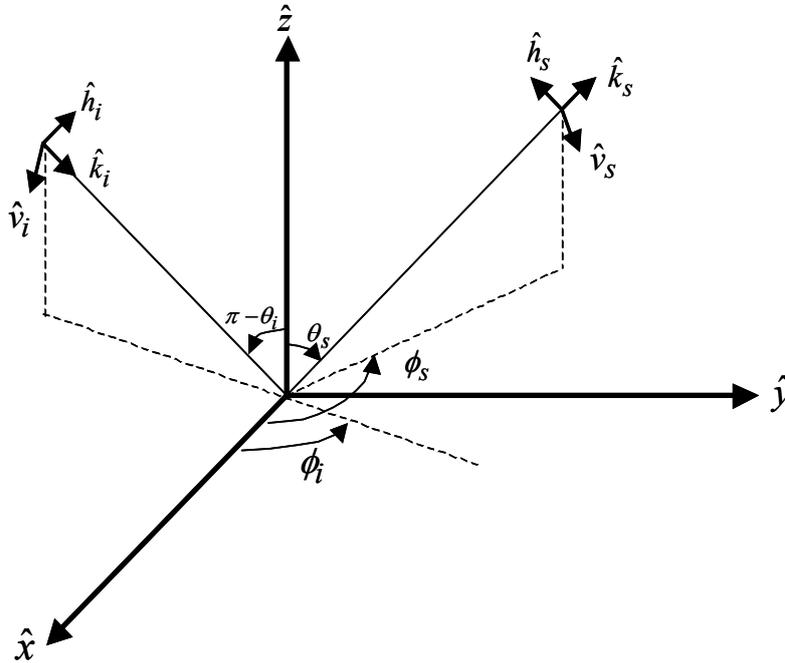


Figure I-2 Système de coordonnées en convention FSA

### I.3.2 Système de coordonnées en convention BSA

La base de polarisation à l'émission pour la convention BSA reste la même qu'en convention FSA. Par contre la direction de propagation de l'onde à la réception en BSA est opposée à la direction de propagation de l'onde diffusée en FSA. Les relations entre les vecteurs unitaires incidents et retrodiffusés deviennent dans ce cas monostatique  $\hat{k}_b = -\hat{k}_i$ ,  $\hat{v}_b = \hat{v}_i$ ,  $\hat{h}_b = \hat{h}_i$ .

La base de polarisation en réception est définie par :

$$\begin{aligned}\hat{k}_b &= -\hat{k}_s = -[\cos\phi_s \sin\theta_s \hat{x} + \sin\phi_s \sin\theta_s \hat{y} + \cos\theta_s \hat{z}] \\ \hat{h}_b &= -\hat{h}_s = \sin\phi_s \hat{x} - \cos\phi_s \hat{y} \\ \hat{v}_b &= \hat{v}_s = \cos\phi_s \cos\theta_s \hat{x} + \sin\phi_s \cos\theta_s \hat{y} - \sin\theta_s \hat{z}\end{aligned}\tag{I-22}$$

La base de polarisation en convention BSA est représentée sur la figure I-3.

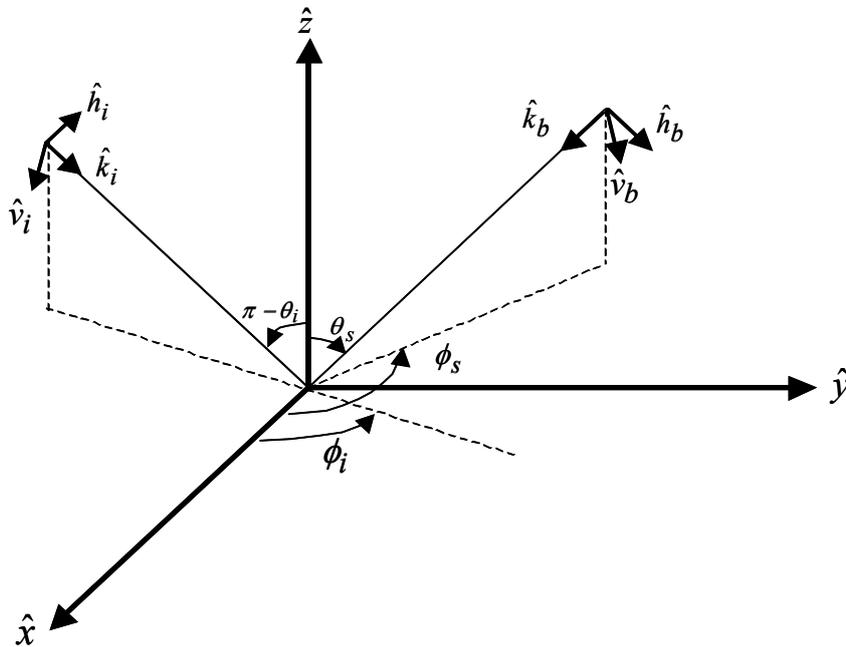


Figure I-3 Système de coordonnées en convention BSA

La convention BSA est utilisée en polarimétrie afin de faciliter l'interprétation des mesures radar. En effet cette convention oriente le repère dans lequel s'exprime l'onde de façon à avoir dans le cas monostatique la même base de polarisation  $(\hat{v}, \hat{h})$  à l'émission et à la réception.

Le passage de la matrice de diffusion  $\mathbf{S}$  de la convention FSA vers la convention BSA est donné par l'expression :

$$\mathbf{S}_{\text{FSA}} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{S}_{\text{BSA}}\tag{I-23}$$

## I.4 Représentation polarimétrique d'une cible radar

Il existe plusieurs représentations polarimétriques d'une cible radar selon que cette dernière est déterministe ou distribuée. En outre les études polarimétriques reposent sur l'analyse de ces représentations matricielles. Ainsi le choix de l'utilisation d'une de ces représentations dépend des outils nécessaires à l'étude.

### I.4.1 Représentation matricielle cohérente

Lors de l'interaction cohérente entre une onde électromagnétique incidente et une cible radar, la polarisation du champ diffusé décrit par le vecteur de Jones diffusé  $\mathbf{E}_s$  est différente de celle du champ incident décrit par son vecteur de Jones  $\mathbf{E}_i$ . Ce changement d'état de polarisation, lié aux propriétés caractéristiques de la cible, peut être représenté sous la forme d'un opérateur matriciel  $\mathbf{S}$  nommé matrice de diffusion ou matrice de Sinclair.

La relation s'écrit [Pottier 92], [Boerner 95] :

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{S} \mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \mathbf{E}_i \quad (\text{I-24})$$

La matrice de diffusion cohérente est une matrice (2×2) à éléments complexes. Elle contient toute l'information sur les propriétés de diffusion de la scène observée, pour une fréquence et une position spatiale [Borgeaud 87].

$S_{hh}, S_{vv}$  sont appelés les éléments co-polarisés et  $S_{vh}, S_{hv}$  les éléments de polarisation croisée. Les indices  $h$  et  $v$  sont relatifs à l'état de polarisation à l'émission (à droite) et à la réception (à gauche). En configuration monostatique les termes de polarisation croisée sont égaux [Ulaby 90], [Cloude 96]. La matrice de diffusion devient symétrique,  $S_{hv} = S_{vh}$  en convention BSA.

La puissance associée à une cible radar, ou *span*, est définie par :

$$span = |S_{hh}|^2 + |S_{hv}|^2 + |S_{vh}|^2 + |S_{vv}|^2 \quad (\text{I-25})$$

Le tableau I-2 donne les matrices de diffusion cohérentes de quelques cibles canoniques dans la base de polarisation  $(\hat{x}, \hat{y})$ . Les matrices sont normalisées de façon à présenter une puissance unitaire.

L'angle  $\psi$  représente l'orientation de l'axe de symétrie principal de la cible canonique autour de l'axe de visée du radar. Parmi les cibles canoniques présentées, seule la sphère possède un terme en polarisation croisée nul quelle que soit l'angle d'orientation.

Cible canonique	$S_{(x,y)}$
Sphère, plan, trièdre	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Dipôle	$\begin{bmatrix} \cos^2 \psi & \frac{1}{2} \sin(2\psi) \\ \frac{1}{2} \sin(2\psi) & \sin^2 \psi \end{bmatrix}$
Dièdre	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos(2\psi) & \sin(2\psi) \\ \sin(2\psi) & -\cos(2\psi) \end{bmatrix}$
Hélice droite	$\frac{1}{2} e^{-j2\psi} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & -1 \end{bmatrix}$
Hélice gauche	$\frac{1}{2} e^{j2\psi} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & -1 \end{bmatrix}$

Tableau I-2 Exemples de matrices de Sinclair associées à des cibles canoniques

## I.4.2 Représentation matricielle incohérente

Lorsque la cible observée est non déterministe, c'est-à-dire lorsque ses caractéristiques polarimétriques fluctuent au cours du temps ou de l'espace, il est essentiel de procéder à une analyse statistique de ces dernières au moyen des moments d'ordre deux.

Son comportement polarimétrique est alors représenté par la matrice de Kennaugh  $\mathbf{K}$  ou la matrice de Mueller modifiée  $\mathbf{M}$ , suivant que l'on travaille respectivement avec le vecteur de Stokes ou le vecteur de Stokes modifié. Ces deux matrices contiennent toute l'information polarimétrique incohérente de la cible. Deux autres représentations incohérentes équivalentes sont souvent utilisées, il s'agit de la matrice de cohérence  $\mathbf{T}$  et de la matrice de covariance  $\mathbf{C}$ .

### I.4.2.1 La matrice de Kennaugh

Pour une cible donnée, la matrice de Kennaugh ou matrice de réflexion de Stokes relie le vecteur de Stokes incident  $\mathbf{g}_i$  au vecteur de Stokes diffusé  $\mathbf{g}_s$ , par la relation linéaire suivante [Ferro-Famil 00] :

$$\mathbf{g}_s = \mathbf{K} \mathbf{g}_i \quad (\text{I-26})$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{\langle |S_{xx}|^2 + 2|S_{xy}|^2 + |S_{yy}|^2 \rangle}{2} & \frac{\langle |S_{xx}|^2 - |S_{yy}|^2 \rangle}{2} & \text{Re}\langle (S_{xx} + S_{yy})S_{xy}^* \rangle & -\text{Im}\langle (S_{yy} - S_{xx})S_{xy}^* \rangle \\ \frac{\langle |S_{xx}|^2 - |S_{yy}|^2 \rangle}{2} & \frac{\langle |S_{xx}|^2 - 2|S_{xy}|^2 + |S_{yy}|^2 \rangle}{2} & \text{Re}\langle (S_{xx} - S_{yy})S_{xy}^* \rangle & \text{Im}\langle (S_{yy} + S_{xx})S_{xy}^* \rangle \\ \text{Re}\langle (S_{xx} + S_{yy})S_{xy}^* \rangle & \text{Re}\langle (S_{xx} - S_{yy})S_{xy}^* \rangle & \langle |S_{xy}|^2 \rangle + \text{Re}\langle S_{xx}S_{yy}^* \rangle & \text{Im}\langle S_{xx}S_{yy}^* \rangle \\ -\text{Im}\langle (S_{yy} - S_{xx})S_{xy}^* \rangle & \text{Im}\langle (S_{yy} + S_{xx})S_{xy}^* \rangle & \text{Im}\langle S_{xx}S_{yy}^* \rangle & \langle |S_{xy}|^2 \rangle - \text{Re}\langle S_{xx}S_{yy}^* \rangle \end{bmatrix} \quad (\text{I-27})$$

Dans le cas monostatique,  $\mathbf{K}$  est une matrice (4x4) symétrique à éléments réels et est formée à partir des éléments de la matrice de diffusion  $\mathbf{S}$  en convention BSA.

Elle contient toute l'information de la cible sous forme de termes de puissance où la phase absolue est éliminée lors de sa détermination.

Le passage de la matrice de diffusion  $\mathbf{S}$  à la matrice de Kennaugh  $\mathbf{K}$  est défini comme suit [Pottier 90], [Germond 01] :

$$\mathbf{K} = \frac{1}{2} \langle \mathbf{V}^T \mathbf{S} \otimes \mathbf{S}^* \mathbf{V} \rangle \text{ avec } \mathbf{V} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -j \\ 0 & 0 & 1 & j \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{I-28})$$

Le symbole  $\otimes$  représente l'opérateur de Kronecker.

La matrice de Kennaugh peut aussi être paramétrée à partir de 9 coefficients réels appelés coefficients de Huynen [Huynen 70].

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} A_0 + B_0 & C & H & F \\ C & A_0 + B & E & G \\ H & E & A_0 - B & D \\ F & G & D & -A_0 + B_0 \end{bmatrix} \quad (\text{I-29})$$

#### I.4.2.2 La matrice de Mueller modifiée

En modélisation la matrice de Mueller modifiée est préférée à la matrice de Kennaugh et s'exprime en convention FSA. La matrice de Mueller modifiée relie le vecteur de Stokes modifié incident au vecteur de Stokes modifié diffusé par la cible.

$$\tilde{\mathbf{I}}_s = \mathbf{M} \tilde{\mathbf{I}}_i \quad (\text{I-30})$$

$\mathbf{M}$  est aussi une matrice symétrique (4x4) à éléments réels formés à partir de ceux de la matrice de diffusion [Ulaby 90], [Cloude 96]:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \langle |S_{vv}|^2 \rangle & \langle |S_{vh}|^2 \rangle & \text{Re}\langle S_{vv}S_{vh}^* \rangle & -\text{Im}\langle S_{vv}S_{vh}^* \rangle \\ \langle |S_{hv}|^2 \rangle & \langle |S_{hh}|^2 \rangle & \text{Re}\langle S_{hv}S_{hh}^* \rangle & -\text{Im}\langle S_{hv}S_{hh}^* \rangle \\ 2\text{Re}\langle S_{vv}S_{hv}^* \rangle & 2\text{Re}\langle S_{vh}S_{hh}^* \rangle & \text{Re}\langle S_{vv}S_{hh}^* + S_{vh}S_{hv}^* \rangle & -\text{Im}\langle S_{vv}S_{hh}^* - S_{hv}S_{hv}^* \rangle \\ 2\text{Im}\langle S_{vv}S_{hv}^* \rangle & 2\text{Im}\langle S_{vh}S_{hh}^* \rangle & \text{Im}\langle S_{vv}S_{hh}^* + S_{vh}S_{hv}^* \rangle & \text{Re}\langle S_{vv}S_{hh}^* - S_{hv}S_{hv}^* \rangle \end{bmatrix} \quad (\text{I-31})$$

Le passage de la matrice de Kennaugh à la matrice de Mueller modifiée est donné par la relation suivante :

$$\mathbf{M}_{\text{FSA}} = \mathbf{B} \mathbf{U}^{-1} \mathbf{K}_{\text{BSA}} \mathbf{U} \quad (\text{I-32})$$

où  $\mathbf{U}$  est la matrice de passage donnée par (I-16) et  $\mathbf{B}$  la matrice de passage qui permet de passer de la convention BSA à la convention FSA.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I-33})$$

Pour plus de commodité, la matrice de Mueller modifiée sera nommée par la suite matrice de Mueller.

### I.4.2.3 Le vecteur cible

Le vecteur cible est obtenu par projection de la matrice de diffusion  $\mathbf{S}$  sur un groupe de matrices formant une base orthogonale d'un groupe spécial unitaire [Boerner 95], [Cloude 96]. Ce vecteur contient toute l'information polarimétrique cohérente de la cible observée.

$$\mathbf{k} = \frac{1}{2} \text{Trace}(\mathbf{S} \boldsymbol{\Psi}) = [k_0, k_1, k_2, k_3]^T \quad (\text{I-34})$$

où  $\boldsymbol{\Psi}$  représente un ensemble de matrices qui définissent une base de projection.

Les deux bases de projection les plus utilisées et à partir desquelles dépendent les représentations matricielles incohérentes abordées par la suite, sont  $\boldsymbol{\Psi}_L$  et  $\boldsymbol{\Psi}_P$ . Elles correspondent respectivement à l'ordonnancement lexicographique des éléments de la matrice  $\mathbf{S}$  et à la base des matrices de Pauli modifiées [Cloude 96] :

$$\{\boldsymbol{\Psi}_L\} = \left\{ \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 2 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{I-35})$$

$$\{\boldsymbol{\Psi}_P\} = \left\{ \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{I-36})$$

A chaque base correspond un vecteur cible donné par :

$$\mathbf{k}_L = [S_{hh} \quad S_{hv} \quad S_{vh} \quad S_{vv}]^T \quad (\text{I-37})$$

$$\mathbf{k}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv} \quad S_{hh} - S_{vv} \quad S_{hv} + S_{vh} \quad j(S_{hv} - S_{vh})]^T \quad (\text{I-38})$$

En configuration monostatique  $S_{vh} = S_{hv}$ , les vecteurs cible se réduisent à trois éléments :

$$\mathbf{k}_L = [S_{hh} \quad \sqrt{2} S_{hv} \quad S_{vv}]^T \quad (\text{I-39})$$

$$\mathbf{k}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv} \quad S_{hh} - S_{vv} \quad 2 S_{hv}]^T \quad (\text{I-40})$$

Ces vecteurs correspondent entre eux par la relation :

$$\mathbf{k}_L = \mathbf{A} \mathbf{k}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{k}_p \quad (\text{I-41})$$

Leur norme est égal au *span* de la cible.

#### I.4.2.4 Les matrices de cohérence et de covariance

La matrice de covariance et la matrice de cohérence sont deux autres représentations d'une cible radar utilisées en polarimétrie du fait de leur propriétés mathématiques remarquables. Elles sont toutes deux des matrices (3x3) complexes [Boerner 92], [Cloude 96], [Ferro-Famil 00].

La matrice de covariance  $\mathbf{C}$  est obtenue à partir du vecteur cible  $\mathbf{k}_L$  comme suit :

$$\mathbf{C} = \langle \mathbf{k}_L \mathbf{k}_L^{*T} \rangle = \begin{bmatrix} \langle S_{hh} S_{hh}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle \\ \sqrt{2} \langle S_{hv} S_{hh}^* \rangle & 2 \langle S_{hv} S_{hv}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{vv} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{vv} S_{vv}^* \rangle \end{bmatrix} \quad (\text{I-42})$$

De même, à partir du vecteur cible  $\mathbf{k}_p$  on peut définir la matrice de cohérence  $\mathbf{T}$  complexe :

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \langle \mathbf{k}_p \mathbf{k}_p^{*T} \rangle \\ &= \begin{bmatrix} \langle (S_{hh} + S_{vv})(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & \langle (S_{hh} + S_{vv})(S_{hh} - S_{vv})^* \rangle & \langle 2S_{hv}^*(S_{hh} + S_{vv}) \rangle \\ \langle (S_{hh} - S_{vv})(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & \langle (S_{hh} - S_{vv})(S_{hh} - S_{vv})^* \rangle & \langle 2S_{hv}^*(S_{hh} - S_{vv}) \rangle \\ \langle 2S_{hv}(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & \langle 2S_{hv}(S_{hh} - S_{vv})^* \rangle & \langle 4S_{hv}S_{hv}^* \rangle \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{I-43})$$

Ces deux matrices sont hermitiennes et équivalentes. La relation de passage de l'une à l'autre est donnée par :

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} \mathbf{T} \mathbf{A}^{*T} \quad (\text{I-44})$$

La matrice de cohérence  $\mathbf{T}$  peut être paramétrée en fonction des neuf coefficients de Huynen [Huynen 70] comme suit :

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 2A_0 & C - jD & H + jG \\ C + jD & B_0 + B & E + jF \\ H - jG & E - jF & B_0 - B \end{bmatrix} \quad (\text{I-45})$$

Ces coefficients ont été introduits par Huynen dans les années 1970 de façon à dégager les propriétés caractéristiques d'une cible radar.

Chaque paramètre possède une signification physique se rapportant aux propriétés de la cible :

- $A_0$  est le générateur de symétrie de la cible. Ce coefficient est aussi lié au mécanisme de diffusion de surface. De manière générale, toute cible artificielle possède une part importante de symétrie,

- $B_0+B$  est le générateur d'irrégularité de la cible lié au mécanisme de double diffusion,
- $B_0-B$  est le générateur de non symétrie de la cible. Ce coefficient est aussi lié au mécanisme de diffusion de volume,
- $C$  est le facteur de forme de la cible qui prend une valeur élevée pour une cible de forme linéaire et symétrique,
- $D$  est le facteur de forme locale de la cible,
- $E$  représente la torsion de la cible,
- $F$  est associé à l'hélicité de la cible,
- $G$  est un paramètre de couplage des parties symétriques et non symétriques de la cible,
- $H$  est lié à l'orientation de la cible.

Cette interprétation phénoménologique est très bien adaptée à l'analyse de cibles ponctuelles, mais perd quelque peu de sa pertinence lors de l'étude de milieux naturels en télédétection radar. Les trois générateurs de la structure de la cible sont liés à la nature du mécanisme de rétrodiffusion, mais d'autres paramètres, dépendant de la géométrie de la cible sont difficilement interprétables lors de l'observation d'un milieu naturel comme la forêt ou des champs agricoles. De plus les paramètres de Huynen étant liés par les quatre équations de cible données en (I-46), ils doivent être considérés dans leur globalité.

$$\begin{aligned} 2A_0(B_0 + B) &= C^2 + D^2 & 2A_0E &= CH - DG \\ 2A_0(B_0 - B) &= G^2 + H^2 & 2A_0F &= CG - DH \end{aligned} \quad (I-46)$$

La valeur d'un paramètre ne peut alors être interprétée qu'en considérant les ordres de grandeurs des autres paramètres, ce qui rend difficile une classification automatique.

## I.5 Théorèmes de décomposition polarimétrique

Les théorèmes de décomposition ont été mis au point afin d'analyser les propriétés polarimétriques de représentations incohérentes résultant d'une moyenne spatiale ou temporelle. De manière générale, deux types de décomposition polarimétrique peuvent être discernés :

- les décompositions basées sur des propriétés mathématiques de la matrice traitée, comme l'orthogonalité des vecteurs propres,
- et celles basées sur un modèle de diffusion. Dans ce cas ci, la décomposition revient à déterminer le poids et certains paramètres des différentes composantes du modèle.

Dans cette partie sont abordées la décomposition de Freeman, basée sur un modèle à trois composantes et celle de Cloude et Pottier, basée sur les valeurs et vecteurs propres de la matrice de cohérence.

### I.5.1 Décomposition polarimétrique suivant un modèle de diffusion

La décomposition polarimétrique de Freeman [Freeman 98] se base sur un modèle de diffusion composite utilisé pour décrire le comportement polarimétrique du signal rétrodiffusé par des diffuseurs naturels, principalement des zones forestières. Ce modèle a pour but d'évaluer

l'importance relative des trois mécanismes de diffusion qui participent à la rétrodiffusion globale et ainsi permettre de définir certaines propriétés physiques caractéristiques du milieu observé.

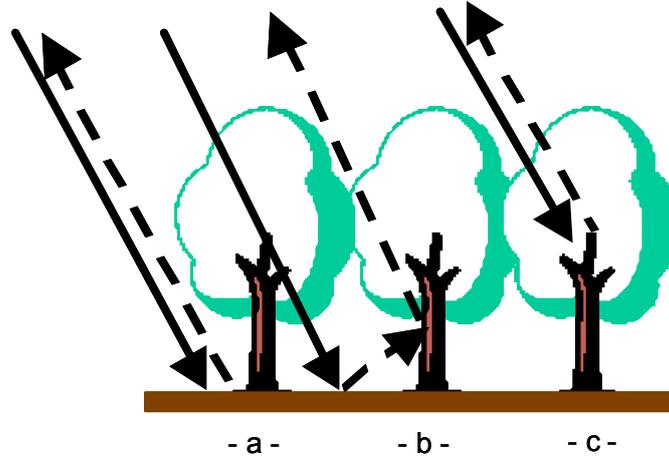


Figure I-4 Représentation des mécanismes de diffusion : diffusion de surface (a), double rebond (b), diffusion de volume (c)

### I.5.1.1 La diffusion de volume

La canopée est considérée comme l'élément participant à la diffusion de volume. Ce mécanisme est modélisé par un nuage de particules cylindriques orientées aléatoirement autour de l'axe de visée du radar. La matrice de diffusion dans le cas d'une particule orientée horizontalement est donnée par :

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \text{ avec } |a| = |S_v| \gg |b| = |S_h| \quad (\text{I-47})$$

Si la particule est orientée autour de l'axe de visée du radar avec un angle  $\phi$  par rapport à la direction de polarisation verticale, la matrice de diffusion s'exprime alors par :

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} b \sin^2 \phi + a \cos^2 \phi & (a-b) \cos \phi \sin \phi \\ (a-b) \cos \phi \sin \phi & b \cos^2 \phi + a \sin^2 \phi \end{bmatrix} \quad (\text{I-48})$$

Dans le cas monostatique, la matrice de diffusion est symétrique et  $S_{hv} = S_{vh}$ .

Le vecteur cible de la particule est alors défini dans la base lexicographique par :

$$\mathbf{k}(\phi) = \begin{bmatrix} a \cos^2 \phi + b \sin^2 \phi \\ \sqrt{2}(b-a) \sin \phi \cos \phi \\ a \sin^2 \phi + b \cos^2 \phi \end{bmatrix} \quad (\text{I-49})$$

La matrice de covariance correspondante  $\mathbf{C}_v$  est obtenue par le calcul de la moyenne  $\langle \mathbf{k}(\phi) \mathbf{k}(\phi)^{*T} \rangle$  sur toutes les valeurs de l'angle  $\phi$ , uniformément réparties sur l'intervalle  $[0, 2\pi]$ . En considérant les particules anisotropes comme des dipôles, les valeurs de  $a$  et  $b$  sont fixées tel que  $a = 1$  et  $b = 0$ .

La matrice de covariance modélisant la diffusion de volume dans la canopée est, après normalisation par rapport à  $\langle |S_{vv}|^2 \rangle$  :

$$\mathbf{C}_v = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{2}{3} & 0 \\ \frac{1}{3} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I-50})$$

### I.5.1.2 La double réflexion

Le mécanisme de double réflexion, engendré par la réflexion sol-tronc, est modélisé par un dièdre dont les surfaces de réflexion sont considérées comme des matériaux de constantes diélectriques différentes, correspondant au sol et aux troncs. Les coefficients de réflexion des troncs sont respectivement  $R_{Th}$  et  $R_{Tv}$  pour les polarisations horizontale et verticale. Le sol, quant à lui, est modélisé par les coefficients de réflexion de Fresnel,  $R_{Sh}$  et  $R_{Sv}$ . Dans le but de rendre le modèle plus général, des termes complexes de propagation  $e^{j2\gamma_v}$  et  $e^{j2\gamma_h}$ , tenant compte de possibles déphasages et atténuations de l'onde lors de son trajet du radar vers la cible et inversement, sont rajoutés.

La matrice de diffusion est définie par :

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} e^{j2\gamma_v} R_{Sv} R_{Tv} & 0 \\ 0 & e^{j2\gamma_h} R_{Sh} R_{Th} \end{bmatrix} \quad (\text{I-51})$$

La matrice de covariance, utilisée pour la double réflexion et normalisée par rapport à  $\langle |S_{vv}|^2 \rangle$ , est donnée par :

$$\mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha^* & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ avec } \alpha = e^{j2(\gamma_h - \gamma_v)} \frac{R_{Sh} R_{Th}}{R_{Sv} R_{Tv}} \quad (\text{I-52})$$

### I.5.1.3 La diffusion de surface

Le mécanisme de diffusion de surface correspond à la diffusion du sol et est modélisé par le modèle de réflexion de Bragg au premier ordre. La matrice de diffusion de surface s'exprime comme suit

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} R_v & 0 \\ 0 & R_h \end{bmatrix} \quad (\text{I-53})$$

La matrice de covariance associée au mécanisme de diffusion de surface s'exprime par :

$$\mathbf{C}_s = \begin{bmatrix} |\beta|^2 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ avec } \beta = \frac{R_h}{R_v} \quad (\text{I-54})$$

Puisque le phénomène de diffusion global du milieu est considéré comme étant la somme pondérée des différents mécanismes de diffusion décrit ci-dessus, la matrice de covariance modélisant le milieu est calculée comme suit :

$$\mathbf{C} = f_v \mathbf{C}_v + f_d \mathbf{C}_d + f_s \mathbf{C}_s = \begin{bmatrix} f_v + f_d |\alpha|^2 + f_s |\beta|^2 & 0 & \frac{1}{3} f_v + f_d \alpha + f_s \beta \\ 0 & \frac{2}{3} f_v & 0 \\ \frac{1}{3} f_v + f_d \alpha^* + f_s \beta & 0 & f_v + f_d + f_s \end{bmatrix} \quad (\text{I-55})$$

Par identification le terme pondérateur associé à la diffusion de volume est donné par :

$$f_v = \frac{3}{2} \langle |S_{hv}|^2 \rangle_{mes} \quad (\text{I-56})$$

Il reste à résoudre le système d'équation suivant, formé à partir des éléments de la matrice de covariance  $\mathbf{C}$  :

$$\begin{aligned} \langle |S_{hh}|^2 \rangle_{mes} - \frac{3}{2} \langle |S_{hv}| \rangle_{mes} &= f_s \beta^2 + f_d |\alpha|^2 \\ \langle |S_{vv}|^2 \rangle_{mes} - \frac{3}{2} \langle |S_{hv}|^2 \rangle_{mes} &= f_s + f_d \\ \langle |S_{hh} S_{vv}^*| \rangle_{mes} - \frac{1}{2} \langle |S_{hv}|^2 \rangle_{mes} &= f_s \beta + f_d \alpha \end{aligned} \quad (\text{I-57})$$

Ce système est composé de trois équations et de quatre inconnues. Il existe donc une infinité de solution. Un critère, basé sur le signe de la partie réelle de  $S_{hh} S_{vv}^*$ , est proposé par [Van Zyl 89] afin de déterminer lequel du double rebond ou de la diffusion de surface est le mécanisme dominant. Si  $Re \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle_{mes}$  est positif alors le mécanisme dominant est la diffusion de surface et  $\alpha = 1$ . Au contraire si  $Re \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle_{mes}$  est négatif le double rebond est dominant et  $\beta = 1$ .

Finalement l'importance de chaque mécanisme est déterminé par rapport au *span* de la matrice mesurée, en évaluant la puissance relative de chacun des termes.

$$span = \langle |S_{hh}|^2 \rangle_{mes} + 2 \langle |S_{hv}|^2 \rangle_{mes} + \langle |S_{vv}|^2 \rangle_{mes} = \frac{8}{3} f_v + f_s (1 + \beta^2) + f_d (1 + |\alpha|^2) \quad (\text{I-58})$$

$$\begin{aligned} P_v &= \frac{8}{3} f_v \\ P_s &= f_s (1 + \beta^2) \\ P_d &= f_d (1 + |\alpha|^2) \end{aligned} \quad (\text{I-59})$$

Ce théorème de décomposition, proposé par Freeman et appliqué sur des milieux naturels tels que la forêt, permet de décomposer le signal rétrodiffusé en trois mécanismes de diffusion connus qui sont la diffusion de surface, la double réflexion et la diffusion de volume.

## I.5.2 Théorèmes de décomposition polarimétrique aux valeurs/vecteurs propres

La décomposition d'une représentation polarimétrique incohérente ( $3 \times 3$ ) sur la base de ses vecteurs propres permet de décomposer de façon unique une cible distribuée en une somme de trois cibles pures dont les vecteurs cibles sont mathématiquement orthogonaux. Les vecteurs propres sont alors paramétrés et associés à des caractéristiques physiques correspondant aux mécanismes de diffusion.

La matrice de cohérence  $\mathbf{T}$  se décompose dans la base de ses vecteurs propres de la façon suivante :

$$\mathbf{T} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^{-1} = \sum_{k=1}^3 \lambda_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^{*T} \quad (\text{I-60})$$

où  $\mathbf{V}$  et  $\mathbf{\Lambda}$  représentent, respectivement, les matrices ( $3 \times 3$ ) des vecteurs et valeurs propres de  $\mathbf{T}$ . La matrice  $\mathbf{T}$  étant hermitienne semi-définie positive, ses valeurs propres  $\lambda_k$  sont réelles, positives ou nulles. Les vecteurs propres complexes  $\mathbf{v}_k$  sont orthonormaux.

L'idée de la décomposition en valeurs/vecteurs propres est d'utiliser la diagonalisation de la matrice  $\mathbf{T}$ , qui est en général de rang 3, en une somme non cohérente de trois matrices de cohérence,  $\mathbf{T}_k$ , chacune étant pondérée par sa valeur propre associée [Cloude 96], [Cloude 97] :

$$\mathbf{T} = \sum_{k=1}^3 \lambda_k \mathbf{T}_k \quad (\text{I-61})$$

Les matrices  $\mathbf{T}_k$  étant de rang 1 correspondent à un mécanisme de diffusion déterministe caractérisé par une simple matrice de diffusion. Les valeurs propres permettent de quantifier leur contribution, tandis que la nature du mécanisme est définie par le vecteur propre.

### I.5.2.1 Les valeurs propres

L'ensemble des valeurs propres indique la répartition de la puissance totale sur les différentes composantes de la décomposition. Cette répartition est définie par un élément  $p_k$  représentant la part de puissance associée au mécanisme. L'ensemble des  $p_k$  correspond à une normalisation des valeurs propres  $\lambda_k$  :

$$p_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^3 \lambda_k}, \text{ avec } \sum_k p_k = 1 \text{ et } p_k \leq 1 \quad (\text{I-62})$$

Ces valeurs propres normalisées sont associées à des pseudo-probabilités liées aux propriétés statistiques des phénomènes de rétrodiffusion en milieu naturel. Les pseudo-probabilités vérifient :  $p_1 \geq p_2 \geq p_3$ . Il est possible de décrire l'ensemble des valeurs propres au moyen de deux paramètres réels : l'*entropie* et l'*anisotropie* [Cloude 96], [Cloude 97].

#### I.5.2.1.a L'entropie

L'entropie de la cible,  $H$ , est définie comme l'indicateur du caractère aléatoire du phénomène de rétrodiffusion global.

Elle est obtenue suivant :

$$H = -\sum_{k=1}^3 p_k \ln_3(p_k) \quad (\text{I-63})$$

Une entropie nulle indique que la cible observée est pure et la rétrodiffusion est déterministe. Ceci se traduit par la présence d'une seule valeur propre normalisée non nulle et égale à un. Le caractère complètement aléatoire de la cible observée est défini par une entropie égale à un, indiquant que les pseudo-probabilités sont identiques.

### **I.5.2.1.b L'anisotropie**

L'anisotropie décrit l'importance relative des mécanismes de diffusion secondaires :

$$A = \frac{p_2 - p_3}{p_2 + p_3} \quad (\text{I-64})$$

Lorsque la probabilité du troisième mécanisme est nulle alors l'anisotropie est égale à un alors que deux mécanismes équivalents entraîne une valeur nulle pour l'anisotropie.

### **I.5.2.2 Détermination du nombre de mécanismes dominants**

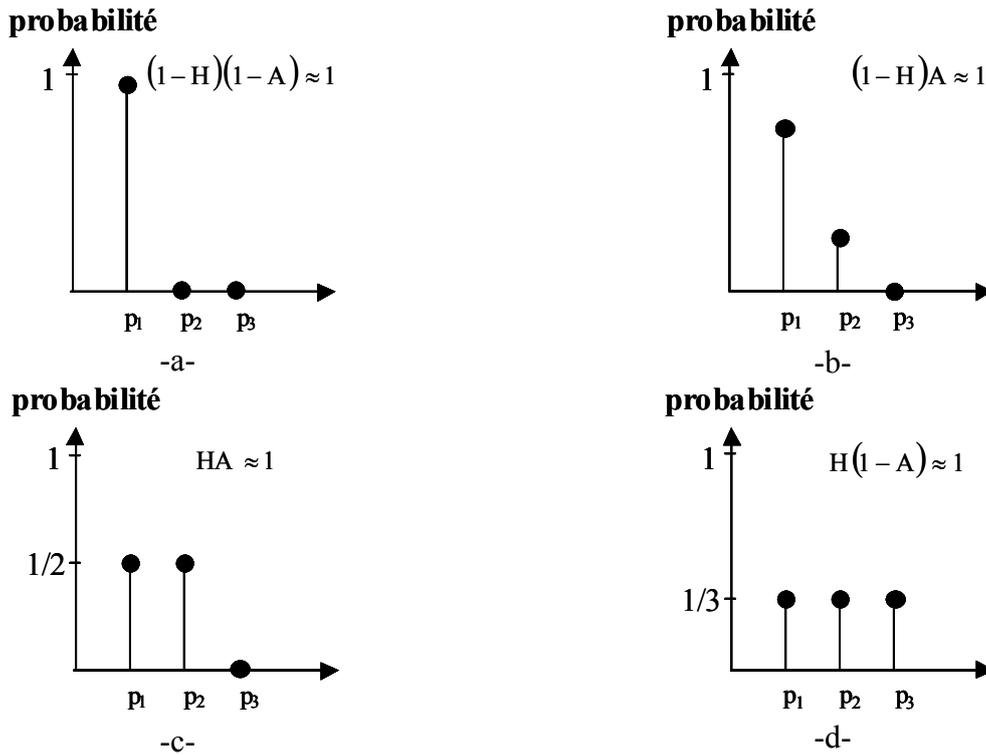
A partir de la décomposition en valeurs et vecteurs propres, il est possible d'évaluer le nombre des mécanismes de diffusion présents dans une même cellule de résolution.

L'observation jointe de l'entropie et de l'anisotropie permet d'estimer la distribution des valeurs propres de la matrice de cohérence et ainsi le nombre de mécanismes de diffusion, au moyen de la relation [Pottier 98] :

$$HA + (1-H)A + H(1-A) + (1-H)(1-A) = 1 \quad (\text{I-65})$$

La somme de ces combinaisons est constante et égale à un. Les quatre termes de (I-65) sont positifs et peuvent être associés à différentes configurations des valeurs propres, comme l'illustre la figure I-5. L'importance d'un des termes de la somme détermine la structure du mécanisme globale de rétrodiffusion.

- a- Lorsque  $(1-H)(1-A)$  est proche de 1, l'entropie et l'anisotropie sont faibles, indiquant que  $p_1$  est grande devant  $p_2$  et  $p_3$ , où  $p_2$  est proche de  $p_3$ . La rétrodiffusion est alors composée d'un mécanisme de diffusion unique.
- b- Lorsque le terme  $A(1-H)$  est proche de 1, le premier mécanisme possède une forte probabilité. L'anisotropie élevée indique que  $p_3$  est quasiment nulle. Le phénomène est alors constitué d'un mécanisme dominant et d'un mécanisme secondaire.
- c- Une valeur de  $HA$  voisine de 1 indique que  $p_1$  n'est pas très grande devant  $p_2$  et  $p_3$ . De plus l'anisotropie élevée signifie que  $p_3$  est quasiment nulle. Le phénomène de rétrodiffusion possède alors deux mécanismes équiprobables.
- d- Une valeur du terme  $H(1-A)$  tendant vers 1 caractérise une diffusion aléatoire et une anisotropie nulle, avec  $p_1$ ,  $p_2$  et  $p_3$  égales à  $1/3$ .



### I.5.2.3 Les vecteurs propres

Un vecteur unitaire incohérent à trois dimensions possède cinq degrés de liberté et peut donc être paramétré au moyen de cinq angles :

$$\mathbf{v} = e^{j\phi} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \beta e^{j\delta} \\ \sin \alpha \sin \beta e^{j\gamma} \end{bmatrix} \quad (\text{I-66})$$

Le terme de phase  $\phi$  n'étant pas observable dans la structure de la matrice de cohérence associée, il n'est pas pris en compte. S. R. Cloude et E. Pottier proposent une interprétation des quatre paramètres restants [Cloude 96], [Cloude 97].

#### I.5.2.3.a L'angle alpha

Avec l'entropie et l'anisotropie ce paramètre est un des plus étudiés lors de la caractérisation polarimétrique d'une cible radar.

Le paramètre  $\alpha$  est associé à la signature polarimétrique de la cible et varie entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ . Il caractérise la nature du mécanisme de diffusion. Il dépend de la constante diélectrique du milieu étudié, de l'angle d'incidence et de la fréquence de l'onde. Ce paramètre n'est pas modifié par les variations de l'angle de rotation du radar. Si  $\alpha$  est nul alors le mécanisme est celui d'une diffusion de surface canonique ( $S_{hh} = S_{vv}$ ). Dans l'autre cas extrême, c'est-à-dire  $\alpha = 90^\circ$ , le mécanisme de rétrodiffusion est celui d'un dièdre ou d'une hélice ( $S_{hh} = -S_{vv}$ ). Dans le cas d'un milieu naturel comme une forêt ou un couvert neigeux, cette valeur indique l'existence d'un mécanisme de double réflexion. Toutes autres valeurs intermédiaires représentent un mécanisme de diffusion anisotrope

( $|S_{hh}| \neq |S_{vv}|$ ). Pour  $\alpha = 45^\circ$ , le mécanisme est celui d'un dipôle canonique. Dans le cas d'un milieu naturel cette valeur indique une diffusion de volume.

L'angle  $\alpha$  peut être défini à partir du vecteur propre  $\mathbf{v}$ .

$$\alpha = \text{atan} \sqrt{\frac{|v_2|^2 + |v_3|^2}{|v_1|^2}} \quad \text{avec} \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (\text{I-67})$$

### I.5.2.3.b L'angle beta

Le paramètre  $\beta$  a été interprété par S. R. Cloude et E. Pottier comme étant un indicateur de l'orientation de l'axe de symétrie principal d'une cible par rapport à l'axe de visée du radar. Enfin  $\delta$  et  $\gamma$  sont liés à l'orientation de l'axe de symétrie principal de la cible observée.

Pour une cible pure, il est possible d'identifier les composantes du vecteur propre à certains des paramètres de Huynen. Ainsi à partir de la définition de la matrice de cohérence en fonction des paramètres de Huynen et de la définition des paramètres d'un vecteur propre unitaire, la relation suivante est établie :

$$\mathbf{v} = e^{j\phi} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \beta e^{j\delta} \\ \sin \alpha \sin \beta e^{j\gamma} \end{bmatrix} = \frac{e^{j\phi}}{\sqrt{2A_0\lambda}} \begin{bmatrix} 2A_0 \\ C + jD \\ H - jG \end{bmatrix} = \frac{e^{j\phi}}{\sqrt{\lambda}} \begin{bmatrix} \sqrt{2A_0} \\ \sqrt{B_0 + B} e^{j \tan^{-1}\left(\frac{D}{C}\right)} \\ \sqrt{B_0 - B} e^{-j \tan^{-1}\left(\frac{G}{H}\right)} \end{bmatrix} \quad (\text{I-68})$$

Les modules des trois composantes des vecteurs propres correspondent aux générateurs de la structure de la cible définis par J. R. Huynen. Les paramètres de la décomposition en fonction des paramètres de Huynen sont :

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{B_0 + B}}{\sqrt{2A_0}} \right) \quad \beta = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{B_0 - B}}{\sqrt{B_0 + B}} \right) \quad \delta = \tan^{-1} \left( \frac{D}{C} \right) \quad \gamma = -\tan^{-1} \left( \frac{G}{H} \right) \quad (\text{I-69})$$

### I.5.2.4 Interprétation statistique de la décomposition

Dans le cas de milieux naturels où la réponse est aléatoire, une analyse statistique de la décomposition aux valeurs et vecteurs propres est proposée par [Cloude 97]. La cible est représentée par trois matrices pures, dont la probabilité d'occurrence est  $p_k$  définie en (I-62), auxquelles correspondent trois vecteurs propres  $\mathbf{v}_k$ . A chacun de ces vecteurs propres est associé un angle  $\alpha_k$ . La cible peut alors être caractérisée par le paramètre moyen  $\bar{\alpha}$  obtenu comme suit :

$$\bar{\alpha} = \sum_{k=1}^3 p_k \alpha_k \quad (\text{I-70})$$

De même que le paramètre  $\alpha$ , le paramètre  $\bar{\alpha}$  est compris entre  $\left[0; \frac{\pi}{2}\right]$  et est invariant par rotation de la cible autour de l'axe de visée du radar.



- Zone 7 : Diffusion par des dipôles avec une faible entropie. Cette région est caractéristique de milieux naturels formés de particules anisotropes dont l'orientation est fortement corrélée entraînant une entropie faible.
- Zone 6 : Double réflexion à faible entropie. Les cibles associées à cette région sont généralement des dièdres métalliques ou diélectriques isolés.
- Zone 5 : Réflexion de surface modérément aléatoire. Ce type de mécanisme de rétrodiffusion peut être rencontré lors de la mesure de surfaces dont la rugosité et la longueur de corrélation varient.
- Zone 4 : Diffusion de volume par des particules anisotropes à entropie modérée. Ce phénomène est rencontré lors de l'étude de régions recouvertes de végétaux qui présentent des particules anisotropes dont l'orientation est moyennement corrélée.
- Zone 3 : Double réflexion à entropie moyenne. Un tel phénomène est observé lors de la mesure d'une forêt en bandes L et P. La double réflexion sur le sol et sur les troncs d'arbres est perturbée par le passage à travers la canopée, entraînant une augmentation du caractère aléatoire.
- Zone 2 : Diffusion de volume à forte entropie. Ce phénomène résulte généralement de la diffusion sur des particules anisotropes orientées de façon totalement aléatoire. Le point extrême de cette classe est caractérisé par une entropie égale à 1 qui décrit une information polarimétrique assimilable à du bruit.
- Zone 1 : Cette zone caractérise une double réflexion avec une très forte entropie. Un tel phénomène de rétrodiffusion est rencontré lors de l'observation de forêt ou de zones recouvertes de végétation possédant des branches et un feuillage développés.

L'appartenance d'une cellule de l'image à une zone du plan  $H-\bar{\alpha}$  permet une interprétation physique du mécanisme de diffusion moyen qui intervient. Ceci permet donc simplement et rapidement d'analyser le comportement polarimétrique des différentes régions de l'image et d'y associer les phénomènes physiques s'y rapportant.

## I.6 Conclusion

L'extraction de l'information polarimétrique d'une cible au moyen de données radar polarimétriques se fait à partir d'une étude minutieuse des variations de polarisation entre l'onde émise et l'onde diffusée. De cette manière, l'utilisation de la polarimétrie en télédétection permet d'estimer la nature physique du phénomène de rétrodiffusion. Pour cela une analyse et une interprétation pertinentes de ces données nécessitent une bonne connaissance de certaines bases mathématiques associées à la théorie de la polarimétrie.

La première partie de ce chapitre présente le vecteur de Jones et le vecteur de Stokes, associés respectivement aux représentations vectorielles cohérente et incohérente d'une onde électromagnétique. Les vecteurs de Jones incident et émis sont reliés respectivement aux états de polarisation des bases à l'émission et à la réception.

Les conventions des systèmes de coordonnées utilisés par la suite sont définis dans la deuxième partie de ce chapitre. Deux conventions majeures sont adoptées selon l'étude menée. La convention

FSA est utilisée en modélisation alors que la convention BSA est principalement employée pour les analyses des signaux radar et donc pour la théorie de la polarimétrie.

La troisième partie présente les représentations polarimétriques matricielles cohérente et incohérente traduisant les variations de polarisation de l'onde engendrées lors de l'interaction de cette dernière avec une cible radar ou un milieu naturel. Ces matrices contiennent toute l'information polarimétrique associée à la cible observée. Dans le cas cohérent la matrice de Sinclair relie le vecteur de Jones incident au vecteur de Jones diffusé. Dans le cas incohérent il existe plusieurs représentations décrivant les propriétés statistiques de la cible au moyen des moments d'ordre deux. L'une de ces représentation est la matrice de Kennaugh qui relie le vecteur de Stokes incident au vecteur de Stokes diffusé. Elle est principalement utilisée dans les études de polarimétrie radar. La matrice de Mueller modifiée, quant à elle, est plus généralement adoptée en modélisation pour décrire les mécanismes de diffusion constituant le phénomène de rétrodiffusion global. Deux autres matrices incohérentes sont largement employées en polarimétrie radar, la matrice de covariance et la matrice de cohérence. Cette dernière est à la base des études présentées par la suite concernant l'extraction de l'information à partir des données radar polarimétriques.

La dernière partie de ce chapitre expose deux théorèmes de décomposition permettant l'analyse et l'interprétation de la réponse d'une scène illuminée par des signaux radar. Le théorème de A. Freeman décompose la réponse du milieu observé en trois mécanismes de diffusion (la diffusion de surface, la double réflexion et la diffusion de volume) et permet d'évaluer leur importance relative par rapport au phénomène de rétrodiffusion global. Le théorème proposé par S. R. Cloude et E. Pottier se base sur une décomposition de la matrice de cohérence aux valeurs et vecteurs propres. A partir de cette décomposition des descripteurs polarimétriques tels que l'entropie  $H$ , l'anisotropie  $A$  et l'angle  $\alpha$  sont calculés. Ces paramètres seront utilisés par la suite pour l'étude des mécanismes de diffusion dans la partie concernant la modélisation d'un couvert neigeux mais aussi pour l'interprétation des données radar.



# CHAPITRE II.

## PRESENTATION DES DONNEES

---

### II.1 Introduction

Ce chapitre introduit les différentes données relatives aux sites test étudiés, Risoul et le col d'Izoard, choisis pour leur représentativité du milieu alpin et qui seront utilisées tout au long de ce mémoire afin de valider les différentes approches proposées.

La première partie de ce chapitre présente les données SAR polarimétriques acquises par le capteur polarimétrique NASA/ JPL/ SIR-C (Spaceborne Imaging Radar-C) sur les Alpes françaises en 1994. Ces données sont multi-temporelles et multi-fréquentielles puisque collectées à deux périodes différentes de l'année en bande L et C.

Ces données sont complétées par des mesures faites sur le terrain qui permettent de connaître les paramètres physiques du milieu considéré (hauteur du couvert neigeux, taux d'humidité, densité des particules, taille et forme des grains de glace) ainsi que par des données optiques correspondant à cette région et acquises par le capteur optique Landsat Thematic Mapper. Une comparaison entre les images SAR et les images optiques nécessite l'élaboration d'une transformation géométrique mettant en correspondance le référentiel d'une image SAR défini par le plan oblique de visée et celui d'une image optique généralement lié à une projection sur un système de coordonnées planes.

Cette étape de géo-référencement est décrite dans la seconde partie de ce chapitre. Un modèle numérique de terrain (MNT), fourni par la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) est utilisé pour ce traitement. Un MNT est tout d'abord projeté sur un référentiel en coordonnées planes commun aux images Landsat. Grâce aux informations, latitude-longitude-hauteur, contenues dans les données SRTM, il est possible de trouver des points d'amer afin de projeter le modèle numérique de terrain dans le plan oblique au moyen d'une transformation géométrique. Cette transformation est alors utilisée pour projeter les images Landsat dans le plan d'incidence oblique ou inversement projeter des résultats de traitement SAR au sol.

Un masque d'ombre est alors élaboré à partir du MNT projeté et des angles d'incidences, afin d'éviter la prise en compte des zones non éclairées par le radar ou correspondant à des incidences rasantes pour lesquelles les traitements sont inadaptés.

## II.2 Les sites d'étude des Alpes

### II.2.1 Les données radar

Les données SAR polarimétriques ont été acquises durant les campagnes de mesures de SIR-C en 1994 sur les Alpes françaises. Les différentes mesures effectuées par le radar ont eu lieu le 12 avril 1994 et le 3 octobre 1994 dans les bandes de fréquence L (1.3 GHz) et C (5.3 GHz) et suivant les quatre canaux de polarisation *HH*, *VV*, *HV* et *VH* (*H* pour horizontale et *V* pour verticale). Les images SAR résultantes ont une résolution spatiale de 20.7 mètres en distance et de 6.19 mètres en azimut. La taille d'un pixel est de 4.37 mètres en azimut et de 13.32 mètres en distance. L'angle d'incidence radar au centre de l'image est de l'ordre de 50°. Les caractéristiques du système radar relatives aux données utilisées dans ce mémoire sont répertoriées dans le tableau II-1. La date du 12 avril 1994 correspond à la fin de l'hiver et donc à une période d'enneigement pour le site. La date du 3 octobre 1994 correspond à la fin de l'été et donc à une absence de neige.

Paramètres	Capteur SIR-C
Fréquences	Bandes L (1.3 GHz) et C (5.3 GHz)
Polarisations	HH,HV,VH, VV
Altitude orbitale	227 km
Angle d'observation	49.849° (Octobre) et 50.022° (Avril)
Résolution en azimut	6.19 m
Résolution en distance	20.7 m
Orbite	Ascendante
Heure d'acquisition (GMT)	06 h05 (Octobre) et 05h54 (Avril)

Tableau II-1 Caractéristiques du système radar SIR-C

Deux sites des Alpes françaises ont été sélectionnés afin de tester les méthodes proposées. Ils correspondent aux régions de Risoul et du col d'Izoard, toutes deux situées au nord ouest de Gap (département des Hautes Alpes) à la limite des massifs du Queyras et du Parpaillon selon la division du CEN (Centre d'Etude de la Neige, Météo France, Grenoble), comme l'illustre la figure II-1. Le choix de ces sites est motivé par la possibilité de recoupement entre les données du 12 avril 1994 et celles du 03 octobre 1994, par la représentativité de l'environnement alpin ainsi que par la présence de mesures de terrain collectées à proximité.

La variabilité du relief et la diversité du milieu naturel rendent l'étude du couvert neigeux complexe. En effet ces régions alpines se composent de sommets rocheux, de zones de forêts (mélèzes et conifères principalement) et de champs agricoles dans les vallées. En hiver la limite inférieure de neige se situe à une altitude de 1600 mètres. La neige recouvre alors une partie des forêts mais les vallées, à une altitude plus basse, restent libres de neige.

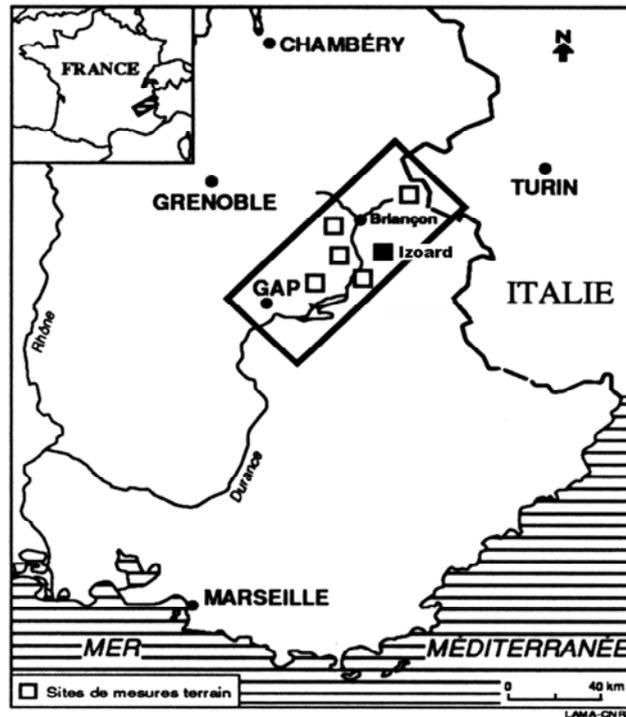
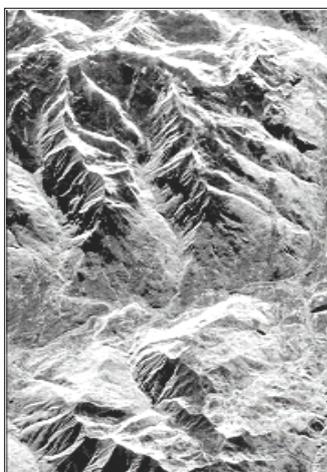


Figure II-1 Localisation des sites d'étude

En raison de la forte topographie de ces régions alpines, une partie de cette étude a été orientée sur une zone de moindre pente se situant à une altitude de 2526 mètres appelé le Pic du Clocher, localisée près de la station de Risoul. Cette zone comporte une partie sans végétation qui permet d'étudier la réponse d'un couvert neigeux sur un sol nu à une onde incidente polarisée. Une analyse plus approfondie sera abordée dans le chapitre dédié à la modélisation où une comparaison sera faite entre les données radar et les résultats du modèle.

Des images de *span* (puissance totale rétrodiffusée), correspondant aux deux régions d'étude citées précédemment, sont représentées figure II-2 pour la bande C et en condition d'enneigement.



-a- Risoul



-b- Izoard

Figure II-2 Images du Span en bande C des sites de -a- Risoul et -b- Izoard

## II.2.2 Les mesures terrain

Des mesures du profil nivologique du couvert neigeux ont été effectuées le 12 avril 1994 par EDF et Météo-France. Les caractéristiques physiques du couvert neigeux sont mesurées, soit manuellement, soit par des stations automatiques qui permettent des relevés quotidiens. Durant la période hivernale, des sondages par battage sont réalisés périodiquement dans le manteau neigeux et sont associés à des profils stratigraphiques. Ces mesures, effectuées le plus souvent au-dessus de 2000 mètres, ont pour but d'évaluer la stabilité du manteau neigeux en caractérisant chacune des couches par une dureté, une température, un type de grain de neige, une masse volumique et une teneur en eau liquide. Un trou creusé jusqu'au sol permet de repérer les différentes couches de neige, d'évaluer leur épaisseur et de tester leur dureté. La température et la constante diélectrique de chaque couche sont mesurées au moyen d'une sonde. La densité est obtenue par prélèvement d'une portion de neige dans chaque couche. En complément de ces relevés obtenus manuellement, des stations automatiques "Télé nivomètres" (figure II-3) transmettent au pas horaire les valeurs de hauteur et de densité de la neige au sol par pas de 10 cm ainsi que la température de l'air.



Figure II-3 Télé nivomètre EDF situé au Lac Noir

Les caractéristiques physiques du couvert neigeux dans cette zone sont répertoriées sur un profil stratigraphique effectué par Météo-France le 12 avril 1994, représenté figure II-4. Une graduation verticale en centimètres permet de visualiser l'épaisseur totale du manteau neigeux ainsi que l'épaisseur relative à chaque couche. Le couvert neigeux se compose de plusieurs couches de neige d'épaisseur variée. L'épaisseur totale du couvert est de l'ordre de 2 mètres et sa densité moyenne est d'environ  $350 \text{ kg/m}^3$ . Le relevé est divisé en colonnes relatives aux caractéristiques physiques propres à chaque couche constituant le manteau.

La description des codifications utilisées est la suivante :

- HHH : hauteur en cm
- F1 : forme dominante des grains, F2 : forme secondaire
- Dm : diamètre des grains en mm
- DUR : dureté de la neige (de 4 : neige très dure à 1 : neige tendre)

- HUM : humidité ( 1 : neige sèche, 2 : neige peu humide)
- MV : masse volumique en kg/m<sup>3</sup>.

Les mesures ayant été faites à 8h du matin dans des conditions de basses températures de l'air, la teneur en eau liquide (TEL) dans le couvert neigeux est nulle. Une courbe des températures à lire en négatif est tracée pour l'ensemble du manteau.

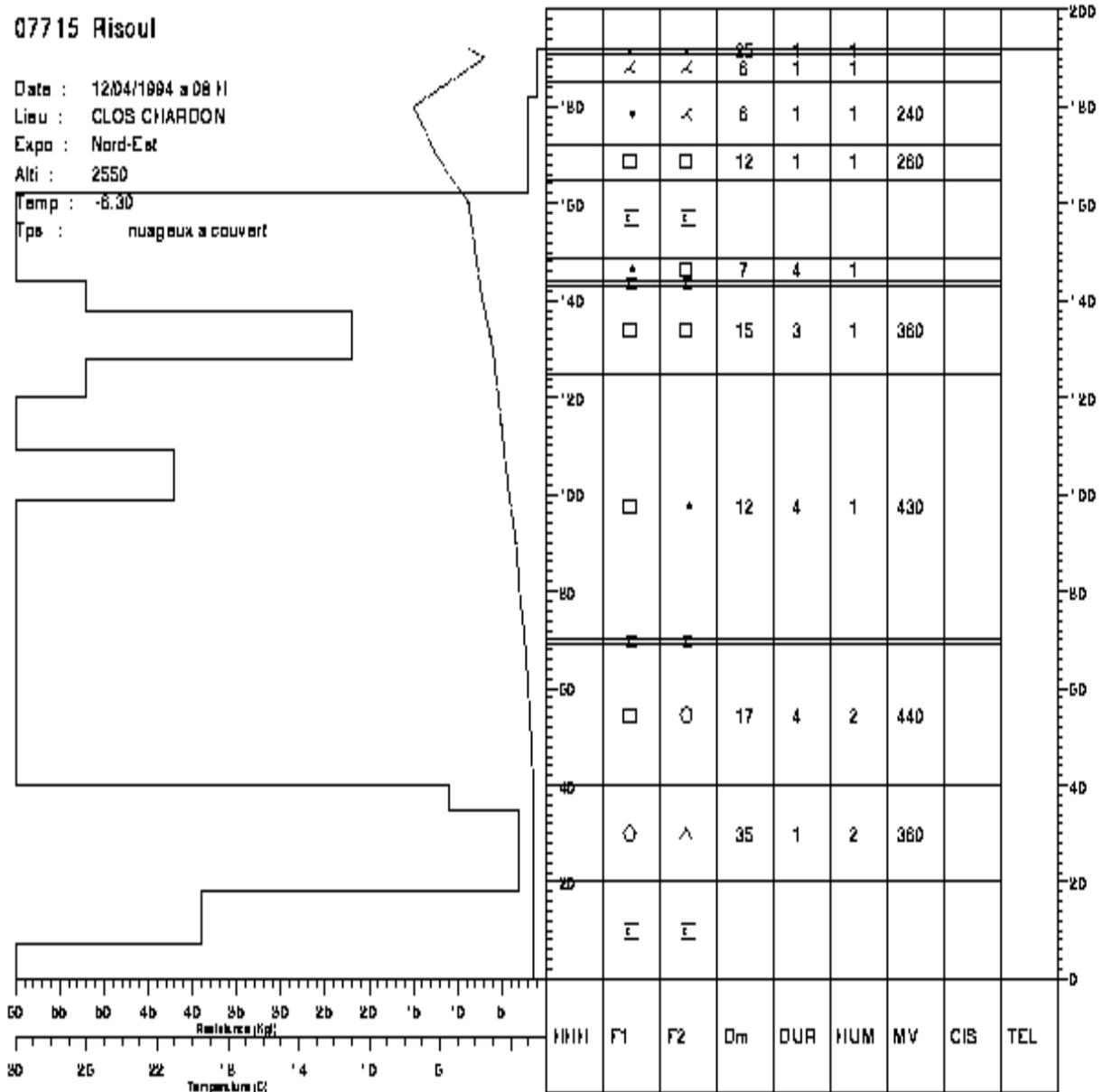


Figure II-4 Profil stratigraphique du couvert neigeux sur Risoul

Pour finir, des résultats de simulation du modèle CROCUS, développé par le Centre d'Etude de la Neige de Grenoble, sont présentés au chapitre V. CROCUS est un modèle d'évolution du manteau neigeux qui simule certaines caractéristiques physiques du couvert pour différents massifs montagneux des Alpes [Brun 89].

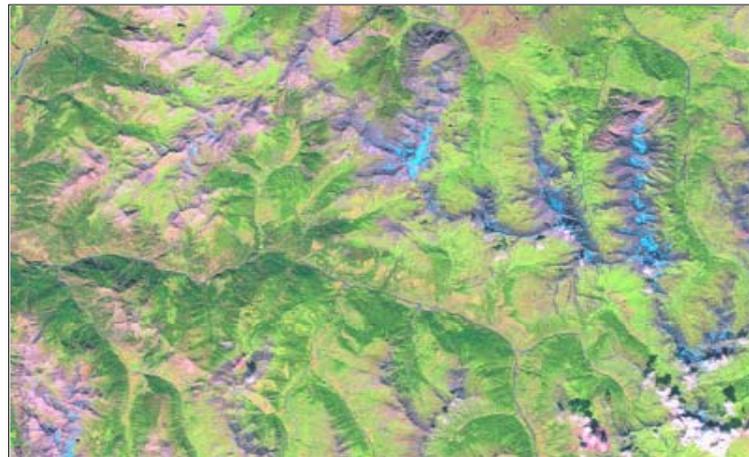
### II.2.3 Les images optiques Landsat

En plus des données SAR polarimétriques, des données optiques ont été acquises par le capteur passif Landsat Thematic Mapper. L'acquisition de l'image Landsat "d'hiver", en condition d'enneigement, est simultanée à celle des données SAR SIR-C du 12 avril 1994, alors que l'image "d'été" de référence date du 22 septembre 1994. La résolution spatiale de ces images optiques est de 28.5 mètres x 28.5 mètres. Il est ainsi possible de visualiser les différentes zones qui constituent l'image SAR telles que les régions forestières, les régions de sol nu ou les régions enneigées. Les images optiques et les images SAR ne peuvent pas être superposées l'une à l'autre, de part leurs caractéristiques d'acquisition différentes, notamment en ce qui concerne l'angle d'incidence. L'utilisation d'un modèle numérique de terrain (MNT) devient alors primordial car il permet de projeter l'image optique dans le plan radar dans le but de localiser au mieux les différentes zones de l'image radar à partir des connaissances extraites des images optiques.

La figure II-5 représente les images optiques Landsat des sites de Risoul et Izoard en "été" en l'absence de neige et en "hiver" en condition d'enneigement. Ces images sont obtenues à partir d'une combinaison colorée entre trois canaux brut RVB où le bleu correspond au vert visible (0.4  $\mu\text{m}$ ), le vert au proche infra-rouge (0.9  $\mu\text{m}$ ) et le rouge au moyen infra-rouge (1.6  $\mu\text{m}$ ).



-a- Risoul en été



-b- Izoard en été



-c- Risoul en hiver



-d- Izoard en hiver

 Sols nus     Champs agricoles     Pâturages     Forêts     Neige

Figure II-5 Images optiques Landsat des sites de Risoul (-a-et -c-) et d'Izoard (-b-et -d-)

## II.3 Le modèle numérique de terrain

### II.3.1 La mission SRTM

La mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) est un projet commun entre la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et la NIMA (National Imagery and Mapping Agency). L'objectif de ce projet était de fournir un modèle numérique de terrain (MNT) de 80 % de la surface terrestre avec la particularité d'inclure 95 % de surfaces habitées. La mission débuta le 11 février 2000, jour où la navette Endeavour fut satellisée sur une orbite de 233 km avec une inclinaison de 57°, pour une durée de onze jours. Les régions d'acquisition s'étendent entre les latitudes 60° nord et 56° sud et comprennent : l'Amérique du nord, l'Amérique du sud, l'Australie, l'Eurasie, l'Afrique, le Pacifique nord et sud et l'Atlantique nord et sud.

La figure II-6 représente les régions couvertes lors de la mission SRTM. La palette des verts, comme le montre la légende en bas à gauche de l'image, est associée aux régions terrestres et la palette des bleus, en bas à droite de l'image, est associée aux régions maritimes. L'intensité de la couleur des traces indique le nombre de survols de la navette sur une zone. Le rouge caractérise les régions non cartographiées.

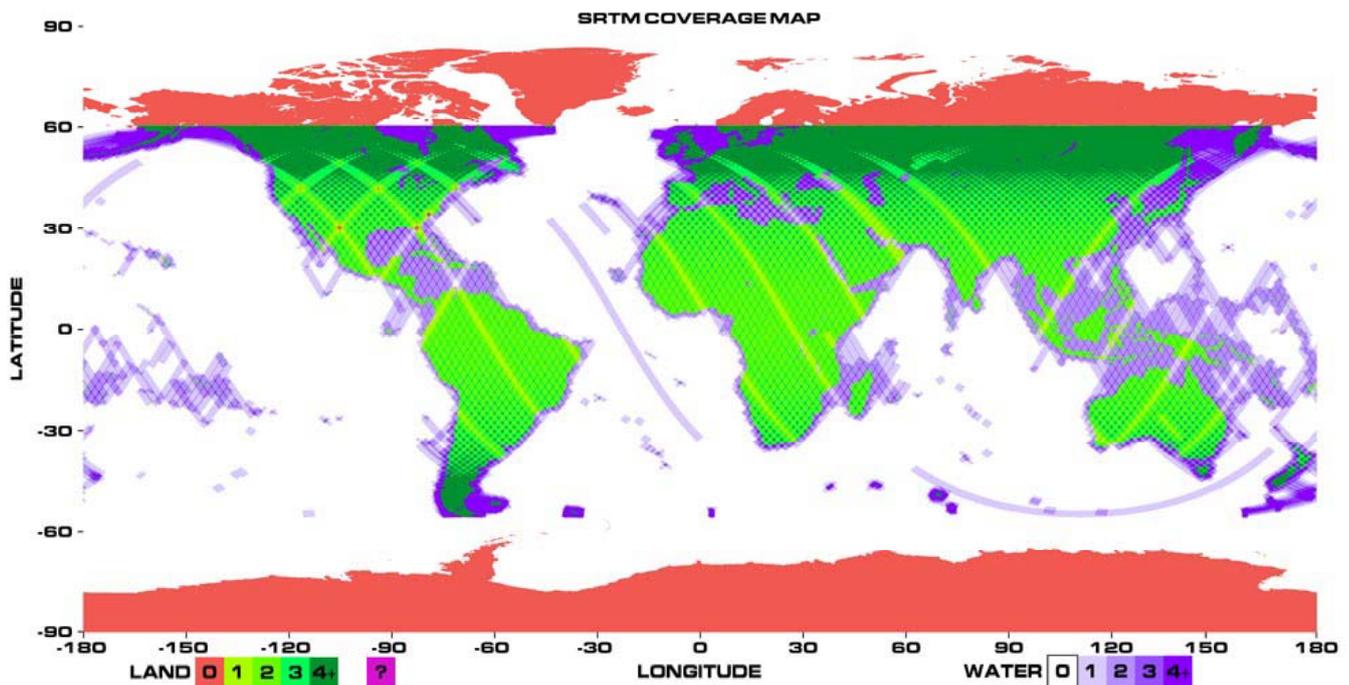


Figure II-6 Carte des régions couvertes par SRTM

L'acquisition de la totalité des données lors d'une seule et même mission présente l'avantage de l'homogénéité de leurs caractéristiques. De plus, la grande quantité de données rassemblées au cours de cette mission a permis de générer une carte topographique à grande échelle de la surface de la Terre avec une précision de qualité sur l'estimation des hauteurs.

### II.3.2 Les caractéristiques du MNT SRTM

Le modèle numérique de terrain a été élaboré à partir de données SAR interférométriques acquises de façon simultanée (mono-passe). Les images nécessaires à la création de l'interférogramme ont été prises, l'une à partir de la navette elle-même et l'autre à partir d'un mât de 60 mètres fixé sur la navette, comme représenté sur la figure II-7. Les capteurs embarqués, SIR-C et X-SAR, ont permis d'acquérir les données en bande C (5 GHz) et X (10 GHz). Leur résolution spatiale varie typiquement de 30 mètres (1 arc seconde), pour les Etats Unis et ses territoires, à 90 mètres pour le reste de la couverture. La précision verticale d'élévation est de 16 mètres



Figure II-7 Illustration de la navette Endeavour

Le tableau II-2 synthétise les caractéristiques des capteurs SAR SIR-C et X-SAR pour la mission SRTM.

Paramètres	Capteur SIR-C / X-SAR
Fréquences	Bandes C (5.3 GHz) et X (10 GHz)
Polarisations	HH,HV,VH, VV
Altitude orbitale	233 km
Angle d'inclinaison	57°
Résolution au sol	30 m / 90 m
Précision verticale	16 m

Tableau II-2 Caractéristiques du système radar SIR-C

Les données SRTM sont distribuées gratuitement par l'USGS (United State Geological Survey) et sont accessibles sur le site : <ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/>  
Elles sont découpées par fichier en quadrillage de 1 degré en longitude et latitude. Le fichier de la région correspondante au site de Risoul et Izoard est alors extrait connaissant ses coordonnées en latitude et longitude.

La figure II-8 représente la carte topographique d'une partie des Alpes. Cette carte est obtenue à partir des données SRTM et les hauteurs sont référencées par rapport au modèle de géoïde mondial EGM 96.

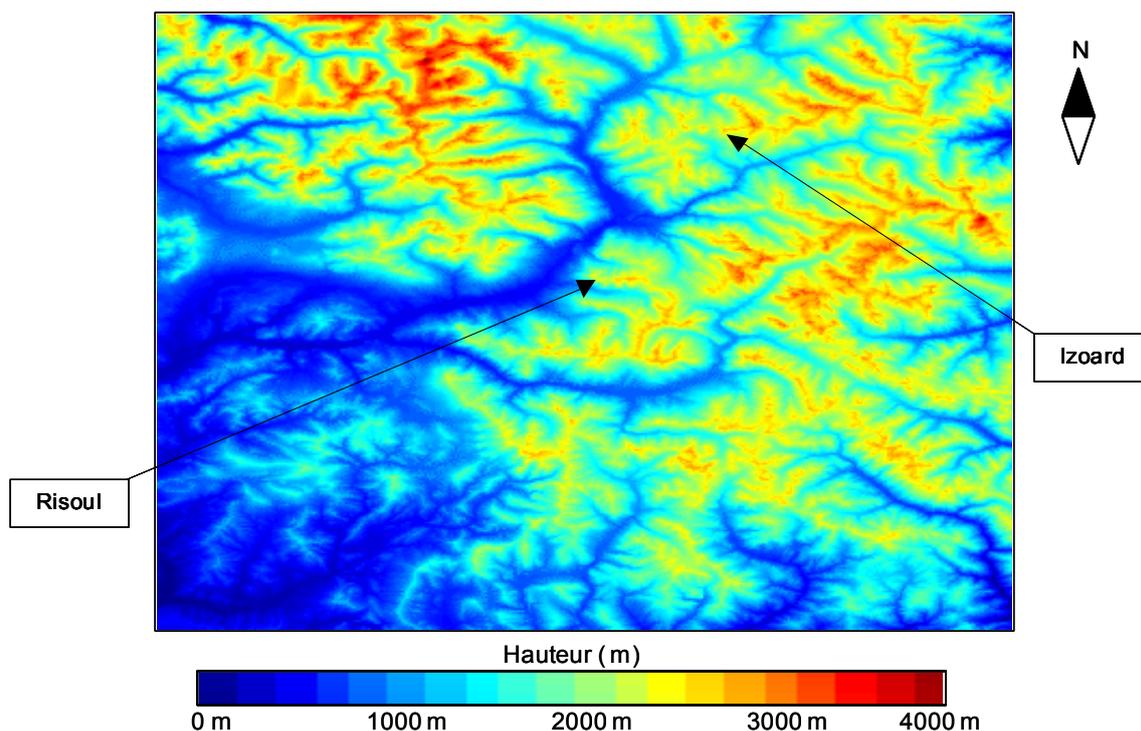


Figure II-8 MNT d'une région des Alpes obtenu à partir des données SRTM

### II.3.3 Utilisation du MNT

Dans le but de comparer avec précision les images SAR avec les images Landsat et afin d'évaluer la validité des résultats obtenus, il est nécessaire de représenter les images optiques dans le même référentiel que les images radar. En effet, les images optiques et radar résultent de mesures et de procédés de fabrication qui leur confèrent des caractéristiques géométriques très différentes.

Les images optiques Landsat sont acquises avec un angle de vue quasi nul. Il est alors relativement aisé de représenter ce type d'image dans un repère au sol correspondant à celui d'une carte géographique. Une image optique peut ainsi être superposée à un modèle numérique de terrain.

Une image radar, quant à elle, est mesurée avec un angle de vue généralement compris entre 20° et 60°, ceci pour des raisons liées aux principes de mesure et de formation des images. De plus, ces images sont représentées dans un repère formé par les axes distance et azimuth, où la direction azimuthale est parallèle à la direction de vol du capteur, tandis que l'axe distance est orthogonal à cette direction et indique la distance minimale capteur-cible. Quelques exemples illustrant les déformations géométriques qu'il est possible d'observer sur une image SAR sont montrés sur la figure II-9.

En télédétection radar, l'analyse des données et la validation des traitements effectués requièrent une représentation des images SAR et des données annexes, telles que des images optiques, dans un même référentiel. Il s'agit, soit de projeter une image SAR dans le repère au sol d'une image optique, soit de déformer l'image optique de façon à ce qu'elle se superpose à l'image radar dans le plan oblique en distance.

Ces deux opérations nécessitent une information d'altitude et de position géographique pour chacun des points des images à recalcr. Il existe un grand nombre de logiciels de traitement d'images qui proposent des fonctions de géo-référencement, basées sur une minimisation de la distance entre des points d'amer sélectionnés sur une image et une projection de ces mêmes points

sélectionnés sur l'autre image. L'utilisation de procédures complexes sur un relief aussi marqué que celui des sites d'études présentés dans la première partie de ce chapitre n'est pas sans poser d'importants problèmes de convergence. En effet la solution consistant à échantillonner un grand nombre de points est limitative car il peut s'avérer assez difficile d'évaluer la position de diffuseurs naturels, majoritaires en zones alpines. Afin de remédier à ce problème, une méthode de recalage utilisant le principe même de l'acquisition SAR et de la géométrie associée a été mise au point.

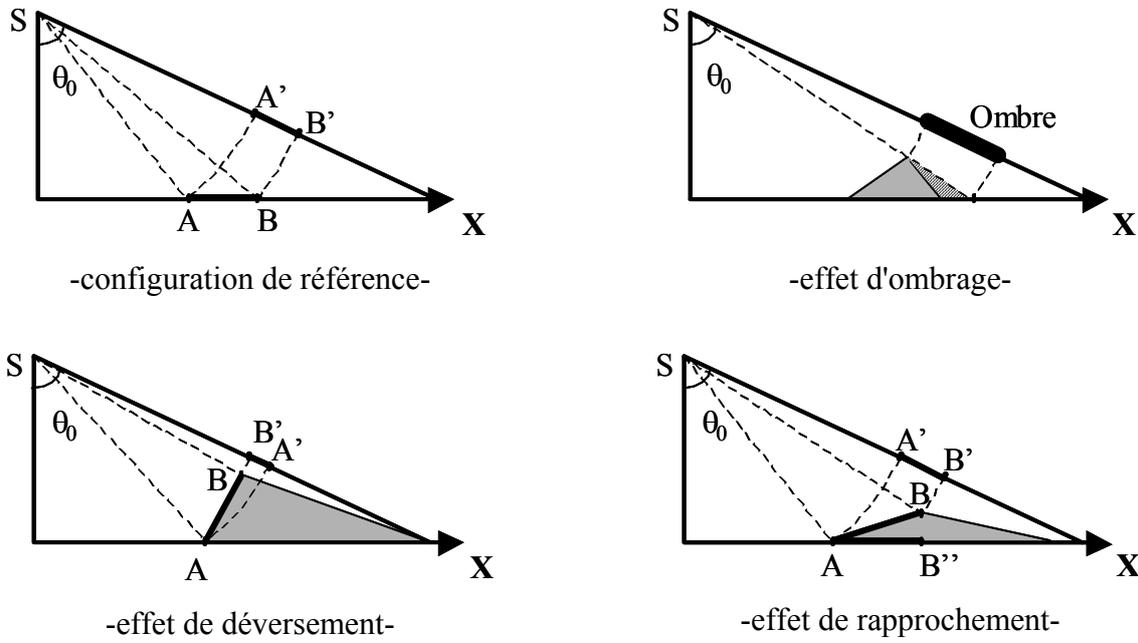


Figure II-9 Déformations géométriques lors de l'acquisition de données SAR

Cette technique vise à déterminer les paramètres caractéristiques d'une mesure SAR équivalente à partir des coordonnées géographiques (latitude, longitude, altitude) et SAR (azimut, distance) d'un nombre réduit de points de référence, typiquement égal à 8 pour une zone 20.30 kilomètres sur 30.35 kilomètres avec une résolution 6.19 mètres en azimut et 20.7 mètres en distance.

Les différentes étapes du traitement sont représentées sur la figure II-10.

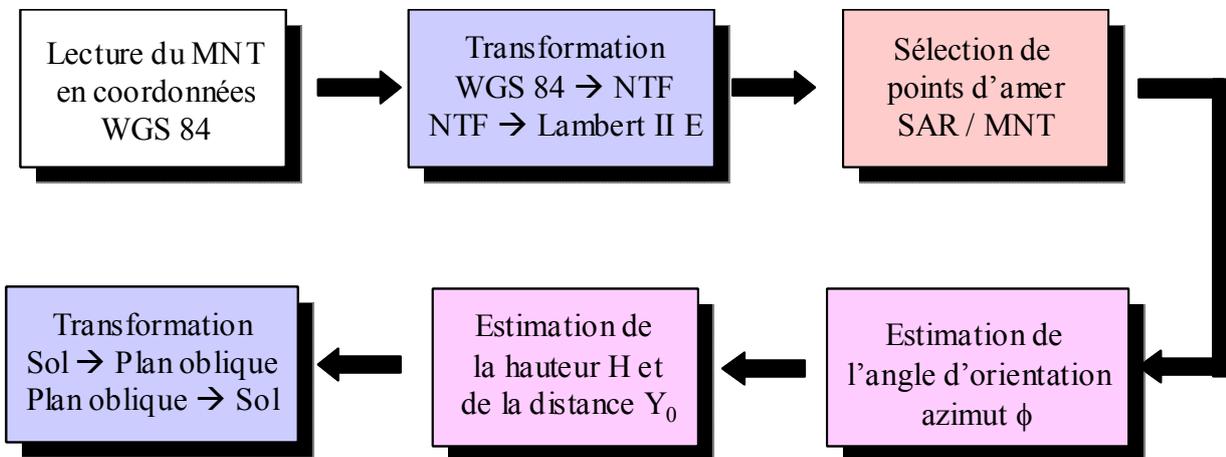


Figure II-10 Schéma bloc des différentes étapes du recalage d'une image optique et d'une image SAR

La première étape consiste à extraire de la base de données SRTM les modèles numériques de terrain contenant les coordonnées géométriques des sites d'étude et à les lire.

Les modèles numériques de terrain fournis par les données SRTM sont exprimés en coordonnées géographiques, latitude-longitude-hauteur, du système mondial World Geodetic System (WGS). Ces MNT sont convertis en coordonnées géographiques dans le système français Nouvelle Triangulation de la France (NTF), puis en coordonnées planes  $(X, Y)$  suivant la projection en Lambert II étendu [Bouteloup], afin de pouvoir servir de support aux images optiques Landsat elles mêmes en coordonnées Lambert II étendu

Un nombre réduit de points d'amer est sélectionné sur le MNT projeté en Lambert II étendu et l'image SAR de référence.

L'étape suivante consiste à déterminer l'angle,  $\phi$ , formé entre l'axe  $Y$  du repère au sol, représenté sur la figure II-11, et la projection au sol de la normale à la direction de vol,  $Y'$ . Cette estimation est réalisée en comparant les distances séparant les points en coordonnées Lambert II étendu à celles mesurées dans la direction azimutale sur l'image SAR.

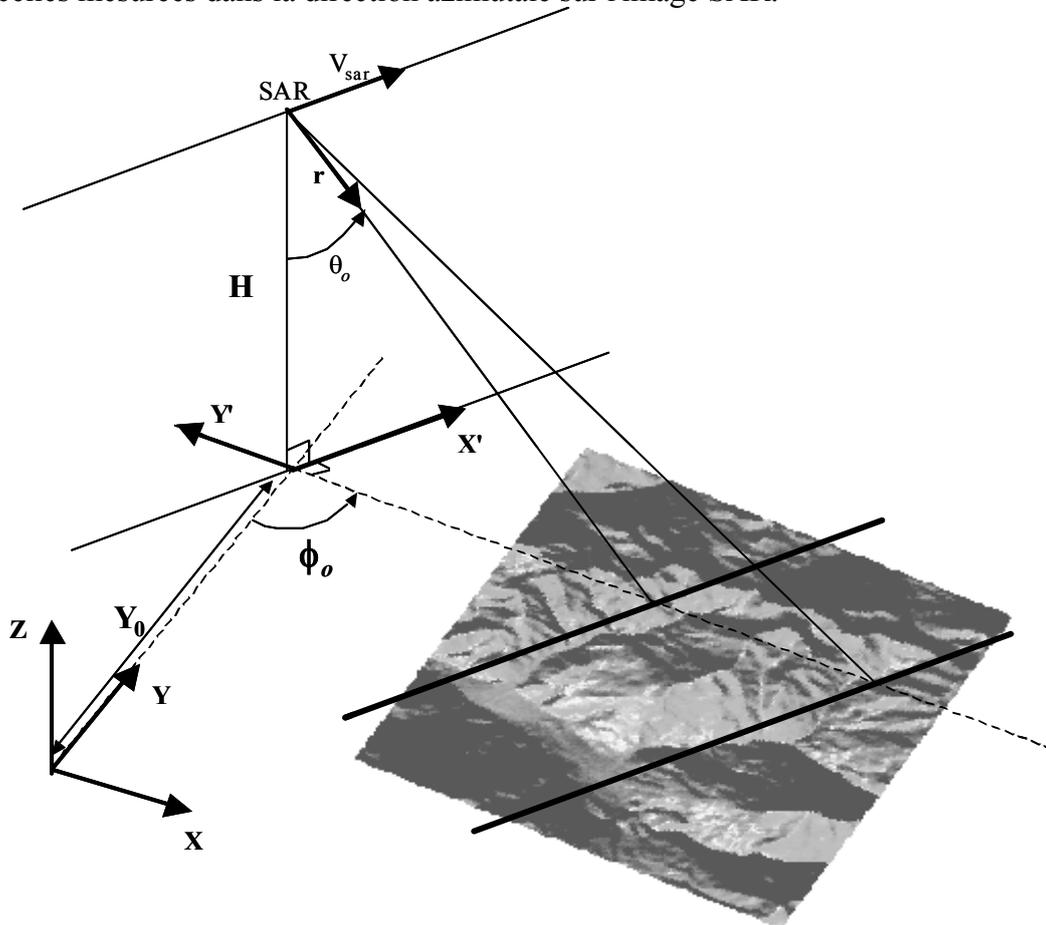


Figure II-11 Géométrie du référentiel radar équivalent par rapport au référentiel au sol

Une fois l'angle  $\phi$  connu, la nouvelle étape consiste à déterminer la distance au sol entre les repères du MNT et de l'image SAR,  $Y_0$ , ainsi que l'altitude du capteur,  $H$ . Cette estimation est réalisée au moyen d'un processus d'optimisation itératif utilisant à la fois les positions en distance des points de l'image SAR, les coordonnées du MNT orientées d'un angle  $\phi$  ainsi que leur hauteur.

Une fois les paramètres  $\phi$ ,  $Y_0$  et  $H$  déterminés, la transformation liant le repère au sol initial et le repère SAR est constituée, au moyen d'une rotation et d'un échantillonnage non linéaire à une dimension. Il est important de noter que les paramètres  $Y_0$  et  $H$  définissent le repère SAR équivalent utilisé lors de la formation de l'image et ne correspondent en général pas aux caractéristiques de vol de SIR-C. En effet, les traitements effectués lors de la synthèse des images SAR, portant sur la correction de la rotondité de la terre ou bien sur celle du centroïde Doppler, doivent être pris en compte lors de la comparaison du référentiel équivalent et de celui de la navette.

La figure II-12 représente un exemple, sur le site de Risoul, d'une image SAR dans le plan d'incidence oblique et des images correspondantes du MNT et de Landsat représentées au sol.

Il est possible de distinguer une nette distorsion entre les deux types de géométrie, accentuée par la présence d'un fort relief.

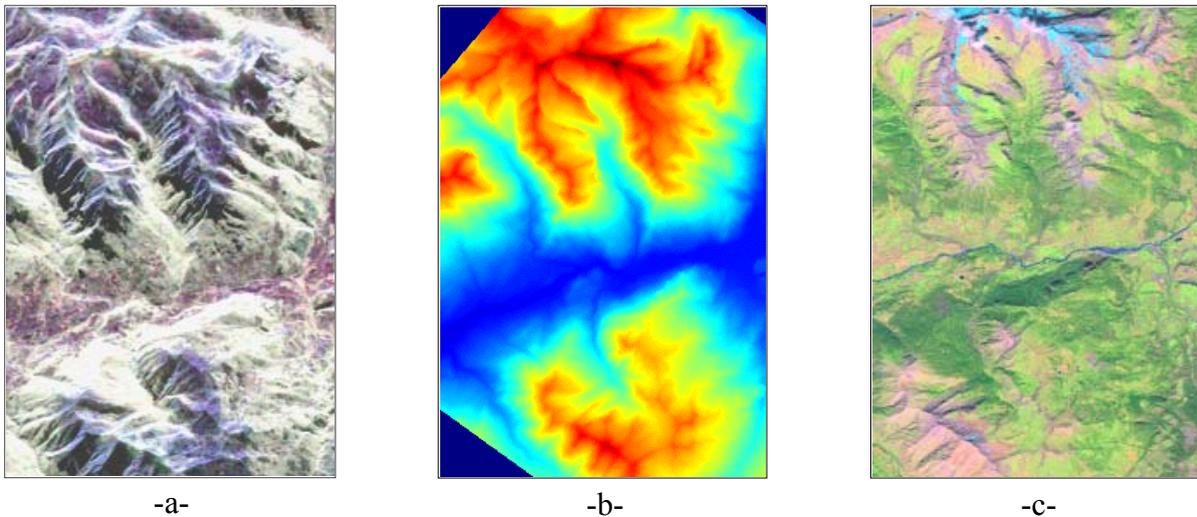


Figure II-12 Trois représentations différentes à partir de trois types de données acquises sur le site de Risoul  
-a- Image SAR RVB de Pauli dans le plan d'incidence radar, -b- image du MNT au sol, -c- image optique Landsat au sol

La figure II-13 représente la projection d'une image d'intensité dans le repère du DEM au sol. Ce procédé, quoique largement utilisé, peut mener à des aberrations ainsi qu'à une perte sensible d'information.

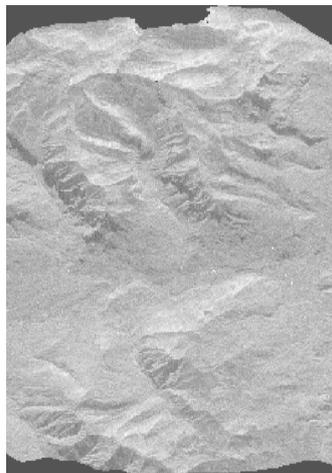


Figure II-13 Image SAR d'intensité projetée dans le repère au sol

En effet, le procédé de projection au sol utilise une interpolation non linéaire des données qui peut engendrer, entre autres, une modification irrémédiable des statistiques de l'information SAR et principalement du nombre de vues équivalentes.

Cette projection est à proscrire lors de la manipulation de données cohérentes, en raison de la présence d'un terme de phase absolue d'aspect très aléatoire qui ne peut être interpolée.

On préfère généralement procéder à la transformation inverse, qui projette des données au sol, qui sont en général lentement variables, depuis le sol vers le plan d'incidence. Ces données peuvent alors être utilisées par des traitements définis dans le plan radar. Les résultats d'estimation de paramètres physiques ou de classification peuvent ensuite être re-projetés au sol avec un minimum d'erreur, pour une meilleure interprétation.

### II.3.4 Les images optiques projetées dans le plan oblique radar

La figure II-14 illustre le MNT et les images optiques Landsat, été et hiver, projetées dans le plan d'incidence oblique radar, des sites de Risoul et d'Izoard.

L'utilisation d'un MNT permet, en plus d'estimer la hauteur et les pentes d'un relief, de calculer les zones d'ombre de l'image SAR ou les zones impropres à l'analyse à cause d'un angle d'incidence trop élevé. L'image représentée sur la figure II-15 montre la répartition de ces zones d'ombre calculées à partir du MNT pour un angle d'incidence limite de  $70^\circ$ . Ce masque d'ombre est alors appliqué sur les images Landsat projetées dans le plan d'incidence oblique.

Le recalage des images optiques Landsat dans le plan d'incidence oblique radar, ainsi que l'ajout d'un masque des zones d'ombre du fait de la forte topographie, permet une comparaison directe des différentes zones d'intérêt des images radar et optiques.

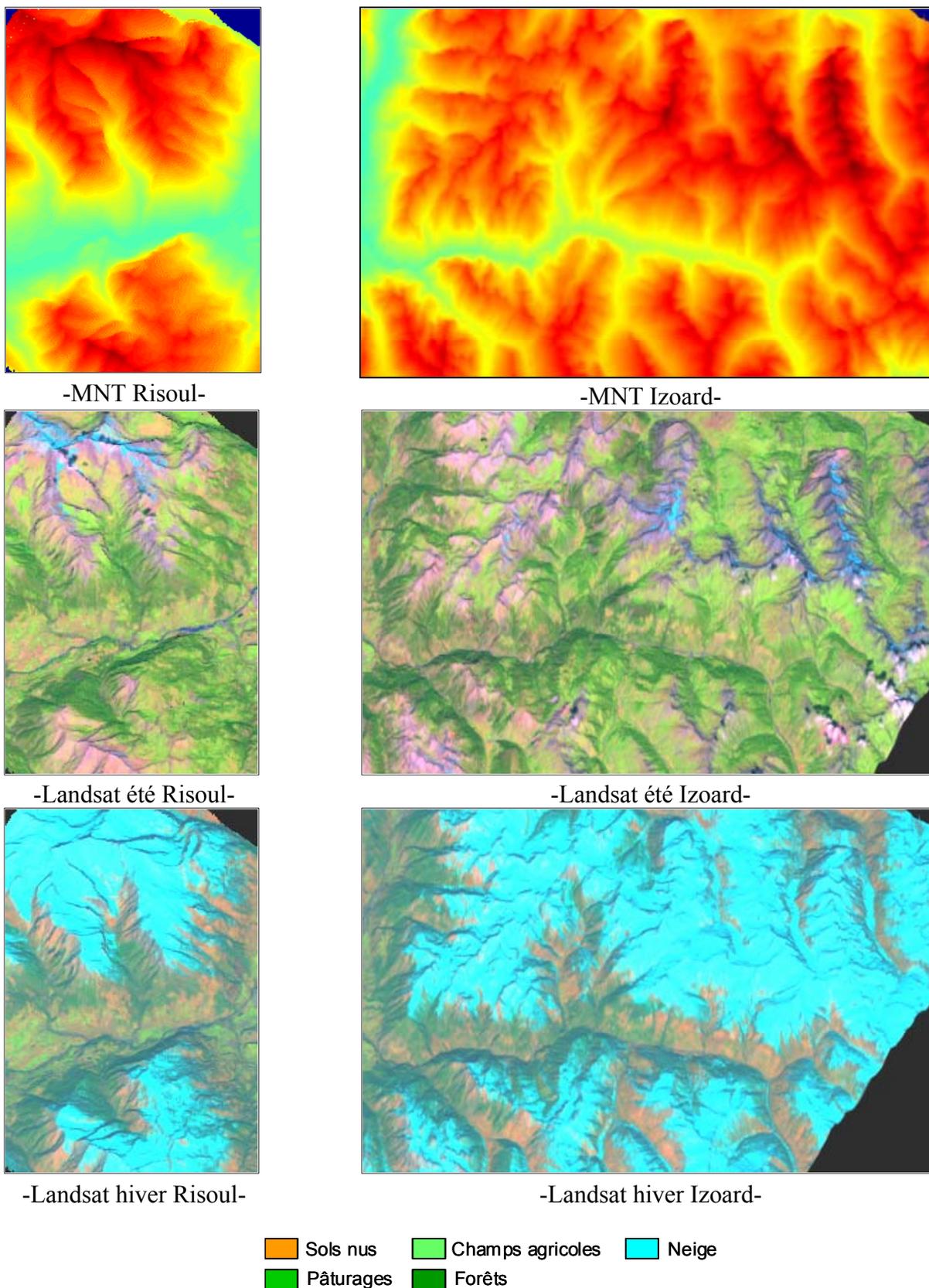


Figure II-14 Projection dans le plan oblique de l'axe de visée radar du MNT et des images optiques Landsat en été et en hiver.

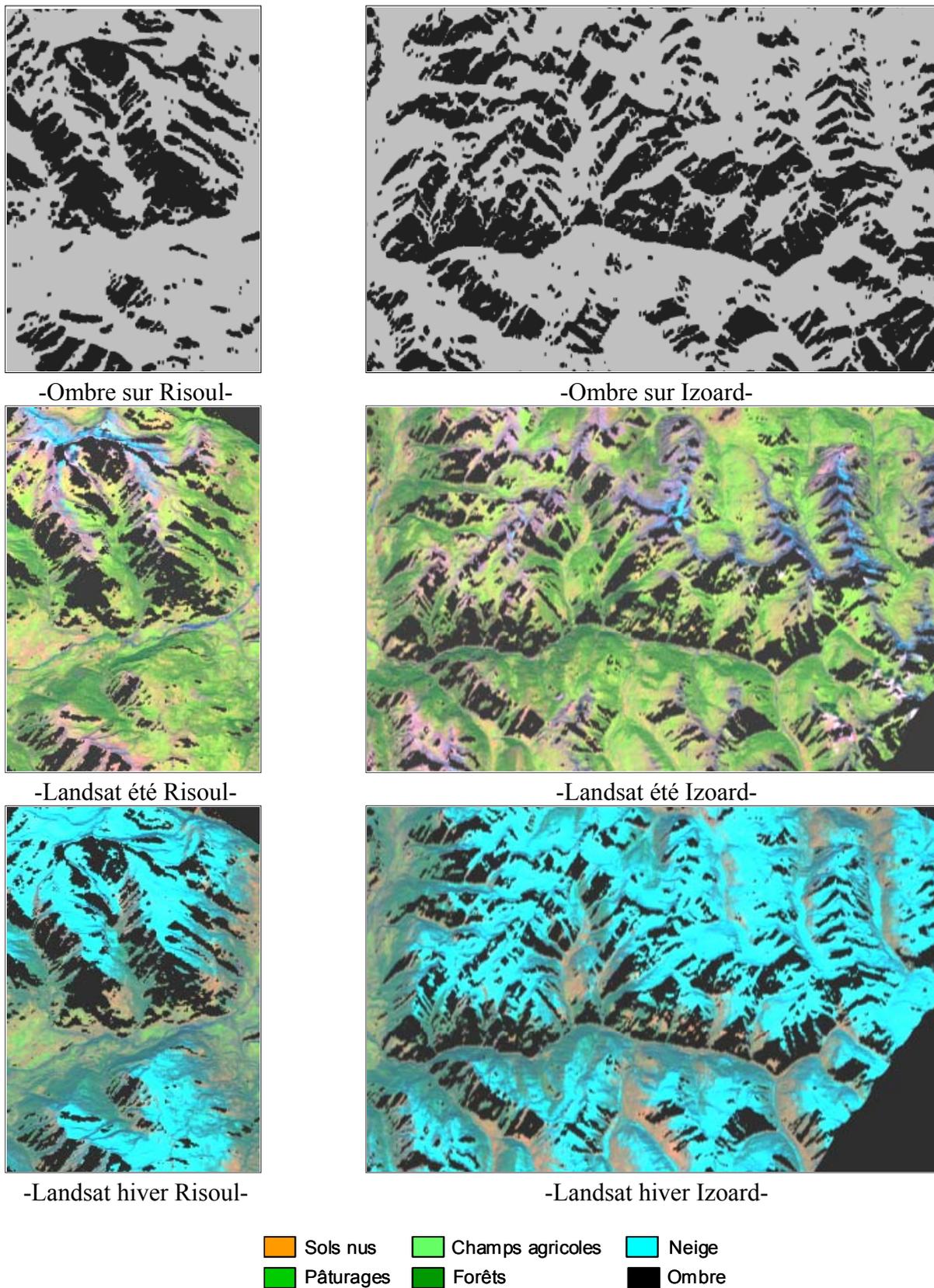


Figure II-15 Représentation de la répartition des zones d'ombre obtenues à partir du MNT

## II.4 Conclusion

La première partie de ce deuxième chapitre présente les sites d'étude et les données relatives à la mission de 1994 qui a permis d'acquérir des données SAR polarimétriques multi-fréquentielles et multi-temporelles des Alpes françaises à partir du système d'imagerie SAR SIR-C. Les données traitées et présentées dans les parties suivantes ont été acquises le 12 avril 1994 en condition d'enneigement et le 3 octobre 1994 sans neige, pour les bandes L et C.

Ces données sont couplées avec des mesures terrain et des images Landsat TM acquises aux mêmes périodes. L'acquisition des mesures terrain peut être faite soit manuellement soit à partir de stations de mesure automatiques transmettant en temps quasi réel des données sur le manteau neigeux et les conditions météorologiques environnementales.

Du fait des différences entre les caractéristiques d'acquisition d'images optiques et SAR, une correction géométrique est nécessaire afin de pouvoir comparer les résultats d'analyse SAR aux données optiques de référence.

Ainsi un MNT (modèle numérique de terrain), obtenu depuis des données acquises durant la mission SRTM en 2000, est alors utilisé dans la seconde partie pour recalibrer les images optiques dans le même référentiel que les images radar. Cette opération nécessite une connaissance des hauteurs, latitudes et longitudes, intégrées dans les données SRTM et de points d'amer qui servent à mettre au point la correction géométrique. Une première transformation concerne le passage des coordonnées géographiques WGS, du MNT, aux coordonnées Lambert II étendu, des images optiques. Une seconde étape vise à estimer l'angle d'orientation azimut, la hauteur et la distance entre les deux repères concernés. Une fois ces variables évaluées, le procédé de projection du repère au sol vers le repère dans le plan d'incidence oblique radar est exécuté.

Les images optiques Landsat sont alors projetées dans le plan d'incidence oblique radar avec un masque d'ombre obtenu pour des angles d'incidence supérieurs à  $70^\circ$ , pour lesquels les traitements ne sont en général pas adaptés.

# CHAPITRE III.

## MODELISATION DE LA DIFFUSION D'UN COUVERT NEIGEUX

---

### III.1 Introduction

Afin de comprendre et d'interpréter au mieux le comportement des paramètres polarimétriques lors de l'analyse des données SAR, il est important de modéliser la réponse du milieu en fonction de ses différents paramètres bio- et géo-physiques.

Ce chapitre présente une méthode de modélisation de la réponse électromagnétique rétrodiffusée par un couvert de neige en milieu alpin.

La connaissance des paramètres caractérisant un couvert de neige est essentielle à l'étape de modélisation. Ainsi les propriétés physiques de la neige sont exposées dans la première partie de ce chapitre. Une couche de neige est un milieu complexe dont les caractéristiques dépendent de la proportion des éléments qui le composent et qui sont: l'air, la glace et l'eau. Généralement un tel milieu est défini par des grandeurs physiques telles que la densité, la teneur en eau liquide, la taille des particules et l'épaisseur du volume. Les propriétés électromagnétiques sont quant à elles décrites par la constante diélectrique du milieu ou la profondeur de pénétration.

Les relations liant les propriétés physiques et électromagnétiques d'un couvert de neige et utilisées dans le modèle électromagnétique sont alors présentées.

La deuxième partie de ce chapitre développe une technique de modélisation de la réponse électromagnétique d'un couvert neigeux. La méthode proposée se base sur l'équation vectorielle du transfert radiatif. La résolution analytique de cette équation permet de mettre en évidence différents mécanismes de diffusion intervenant lors de l'interaction d'une onde électromagnétique avec un couvert de neige. Chaque mécanisme est alors décomposé et analysé afin de mieux comprendre le phénomène de diffusion global.

La dernière partie de ce chapitre s'intéresse à la caractérisation polarimétrique d'un sol recouvert de neige. Afin d'interpréter au mieux le comportement polarimétrique global du couvert, chaque mécanisme est, au préalable, analysé indépendamment. L'intensité relative associée à chacun d'eux ainsi que des paramètres polarimétriques tels que l'angle  $\bar{\alpha}$  et l'entropie H sont calculés en fonction de la fréquence d'observation, de l'angle d'incidence, des paramètres caractéristiques du sol et du couvert neigeux. Les intensités permettent de connaître l'importance relative de chaque mécanisme

constituant la réponse rétrodiffusée totale. La nature du mécanisme de diffusion est définie au moyen des indicateurs polarimétriques. L'observation jointe de la puissance relative et de la nature des mécanismes de diffusion permet une meilleure interprétation de la réponse rétrodiffusée globale. Finalement le comportement polarimétrique du phénomène de diffusion total est étudié et commenté en tenant compte des observations faites à partir de l'analyse préliminaire de chaque mécanisme de base.

## III.2 Caractérisation du couvert neigeux

Un couvert neigeux est caractérisé principalement par sa densité, sa teneur en eau, sa température et sa structure cristalline. Il s'agit ici de présenter les paramètres essentiels nécessaires à la modélisation d'une couche de neige.

### III.2.1 Composition de la neige

Des chutes de neige consécutives constituent un empilement de couches que l'on nomme le manteau neigeux. Il s'agit d'un milieu hétérogène constitué de trois composantes qui sont [Marbouty 83], [Mätzler 87], [Mätzler 96] :

- la glace,
- l'air,
- l'eau sous forme de vapeur ou liquide suivant le type de neige.

La figure III-1 représente un exemple de répartition des ces composantes dans un échantillon de neige.

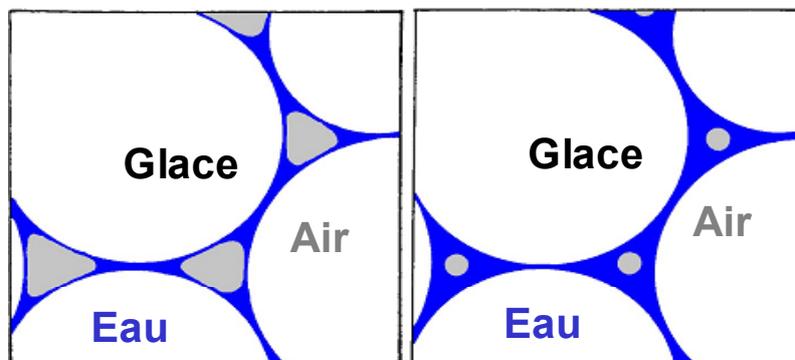


Figure III-1 Représentation de la répartition des trois composantes de la neige.

#### III.2.1.1 Les particules de glace

Les cristaux de neige se développent à partir de particules de glace élémentaires, de formes hexagonales. La forme des cristaux est évolutive et dépend essentiellement des températures environnantes qui influent sur leur type de croissance. Plusieurs classifications de la forme des cristaux existent, cependant la plus retenue est celle établie par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) représentée sur la figure III-2 [Pahaut 91].

<b>Plaquettes</b>	1				
<b>Etoiles</b>	2				
<b>Colonnes</b>	3				
<b>Aiguilles</b>	4				
<b>Dendrites spatiales</b>	5				
<b>"Boutons de manchette"</b>	6				
<b>Particules irrégulières</b>	7				
<b>Neige roulée</b>	8				
<b>Granules de glace</b>	9				
<b>Grêle</b>	0				

Figure III-2 Tableau de classification des cristaux de neige fraîche selon l'Organisation Mondiale de la Météorologie

Le manteau neigeux se présente comme une superposition de strates de neige composées de cristaux. Dans chaque couche les cristaux subissent des modifications spécifiques en fonction des conditions atmosphériques environnantes et des phénomènes thermodynamiques et mécaniques à l'intérieur du manteau [Durand 93], [Sergent 93-a]. C'est ce qu'on appelle le processus de métamorphisme de la neige [Sergent 98].

Ce processus entraîne la transformation des cristaux en terme de taille et de forme. La figure III-3 représente la symbolique de divers types de grains pouvant être rencontrés dans un couvert de neige [Sergent 98].

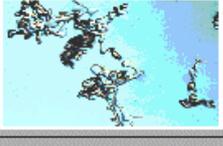
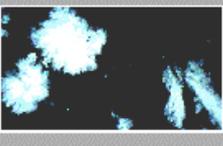
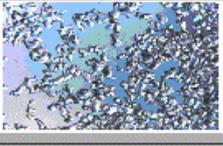
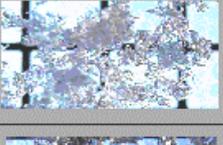
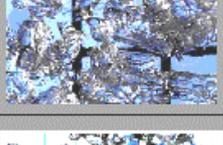
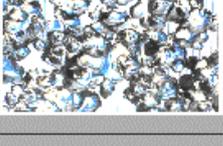
NEIGE RECENTE	+	<b>NEIGE FRAICHE</b> Cristaux intacts, facilement identifiables (dépôt non venté)	
	/	<b>PARTICULES RECONNAISSABLES</b> Fragments de cristaux dont la forme initiale est reconnaissable. Un émoussé des angles vifs et des crêtes peut être observé.	
	△	<b>NEIGE ROULÉE</b> Particules plus ou moins sphériques de grande dimension (1 à 3 mm) semblables à des boules de mimosas. Elles sont constituées de très petites particules sphériques de glace agglomérées sur un cristal de neige fraîche, parfois encore identifiable.	
NEIGE EVOLUEE	●	<b>GRAINS FINS</b> Petits grains plus ou moins arrondis dont le diamètre est voisin de 0,2 à 0,4 mm. Les formes initiales ne sont plus identifiables.	
	□	<b>GRAINS A FACES PLANES</b> Petits grains anguleux caractérisés par la présence de quelques facettes, lisses ou striées de 0,4 à 0,6 mm.	
	∧	<b>GOBELTS OU GIVRE DE PROFONDEUR</b> Cristaux assez gros, pouvant atteindre plusieurs mm. Sans cohésion entre eux. Présence de nombreuses facettes striées présentant une structure en gradins.	
	○	<b>GRAINS RONDS</b> Grains dont la surface présente un net émoussé. Leur forme est franchement arrondie. Leur diamètre peut varier de 0,5 mm à 2 mm. Les plus gros éléments se présentent le plus souvent en agglomérats de plusieurs individus.	
	—○	<b>CROÛTE DE REGEL</b> Couche plus ou moins épaisse (de un à plusieurs dizaines de cm) de grains soudés entre eux par des liaisons de glace provenant du regel d'eau liquide. Ces grains plus ou moins arrondis, suivant le degré d'humidification subi avant le regel, peuvent avoir gardé en partie leur forme d'origine. Néanmoins le grain le plus courant est le grain rond.	

Figure III-3 Symboles des types de grains fixant les différentes étapes du métamorphisme de la neige

### III.2.1.2 La teneur en eau liquide

La présence d'eau liquide dans le mélange joue un rôle déterminant sur l'évolution du manteau neigeux au cours du temps mais aussi sur ses propriétés diélectriques. La neige peut être qualifiée de sèche dans le cas où la teneur en eau liquide est nulle et d'humide dans le cas où de l'eau liquide se forme, sa température est alors de 0°C. La valeur de la teneur en eau liquide régit la

métamorphose de la neige humide, alors que dans le cas de neige sèche c'est la valeur du gradient de température. Ces métamorphismes ont un rôle essentiel sur les variations des paramètres caractéristiques du couvert : la densité, la forme et la taille des cristaux de glace ainsi que des inclusions d'eau liquide.

De la teneur en eau liquide dépend aussi le comportement électromagnétique de la neige. La teneur en eau liquide s'exprime en pourcentage et varie de 0% pour une neige sèche à 100% pour un couvert de neige en période de fonte.

On distingue deux types de teneur en eau liquide : la teneur en eau liquide volumique ou la teneur en eau liquide massique. Leur expressions sont données par :

$$TEL_{\text{massique}} (\%) = \frac{\text{massed'eau liquide}}{\text{masse totale de neige}} \quad (\text{III-1})$$

$$TEL_{\text{volumique}} (\%) = \frac{\text{volumed'eau liquide}}{\text{volume total de neige}} \quad (\text{III-2})$$

La teneur en eau mesurée est généralement volumique.

### III.2.1.3 La densité de la neige

La densité de la neige dépend des portions d'eau et de glace qui la constituent. Dans le cas de la neige sèche, c'est à dire qui ne contient pas d'eau liquide, la densité est donnée par la relation suivante :

$$\rho = \frac{v_g}{0,917} \quad \text{avec} \quad v_g = \frac{m_n}{m_g} \quad (\text{III-3})$$

où  $v_g$  est la fraction de volume occupée par la glace,  $m_n$  et  $m_g$  sont les masses volumiques respectivement de la neige et de la glace.

De manière générale, la densité de la neige est définie comme le rapport de sa masse volumique sur la masse volumique référence de l'eau et s'écrit:

$$\rho = \frac{m_n}{m_e} = \frac{v_e m_e + v_g m_g}{m_e} \quad (\text{III-4})$$

où  $v_e$  est la fraction de volume occupée par l'eau et  $m_e$  sa masse volumique.

Les masses volumiques de la glace et de l'eau sont données par :

$$m_g = 917 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad \text{et} \quad m_e = 1000 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad (\text{III-5})$$

La figure III-4 représente la répartition des masses volumiques d'un couvert de neige en fonction des types de grains qui le constituent [Pahaut 75] [Marbouty 83] [Sergent 93-b]. La masse volumique de la neige peut varier entre 40 kg/m<sup>3</sup>, pour une neige fraîche, froide et légère et 600 kg/m<sup>3</sup> pour une vieille neige de névé.

$\rho$  = Masse volumique ( Kg / M<sup>3</sup> )

P		p										
		<50	50 100	100 150	150 200	200 250	250 300	300 350	350 400	400 450	450 500	> 500
+	%	7	33	49	11							
	50									Nombre de cas : 190		
^	%		2	19	43	22	14					
	50											68
•	%			2	8	20	22	23	17	7	1	
	50											117
○	%					2	6	14	31	33	11	3
	50											249
^	%					11	33	33	18	5		
	50											63

Figure III-4 Répartition des masses volumiques selon les types de grain

La densité est un des paramètres essentiels à la caractérisation d'un couvert de neige. Il est donc nécessaire de connaître ce paramètre soit par mesure soit par estimation à l'aide de modèles.

### III.2.2 La constante diélectrique de la neige

La constante diélectrique moyenne d'un matériau hétérogène constitué de deux ou plusieurs substances est reliée aux constantes diélectriques de chaque substance, à leur fraction volumique, à leur distribution spatiale et à leur orientation relative à la direction du vecteur champ électrique incident. La constante diélectrique de la neige est un paramètre caractéristique du comportement électrique du milieu. Elle permet de déterminer le coefficient d'absorption et de diffusion du couvert neigeux. De nombreuses formules de mélange, proposées dans le passé (Polder-Van Santen, Debye, Tinga, Mätzler...), permettent de calculer la constante diélectrique complexe dans le cas de la neige sèche et de la neige humide [Debye 29], [Polder 46], [Cumming 52], [Colbeck 82], [Mätzler 87]. La constante diélectrique est quasi indépendante de la fréquence et de la température dans la région des micro-ondes dans le cas de neige sèche. Pour la neige humide, elle devient une fonction croissante de la teneur en eau liquide.

#### III.2.2.1 La neige sèche

La neige sèche est formée de glace et d'air. La forme des grains de glace est très variable et leur taille varie de 0.1 mm à quelques mm.

Un encadrement de la partie réelle de sa constante diélectrique peut être déduit à partir des valeurs extrêmes de la fraction volumique de glace  $v_g$  :

$$\epsilon_{air} = 1 \leq \epsilon'_{ns} \leq \epsilon'_{glace} = 3,17 \tag{III-6}$$

La partie réelle de la glace  $\varepsilon'_{glace}$  est quasi indépendante de la température et de la fréquence dans le domaine des micro-ondes. La partie réelle de la constante diélectrique de la neige  $\varepsilon'_{ns}$  peut être modélisée à l'aide d'un ensemble réduit de paramètres.

Mätzler, en se basant sur la formule des mélanges de Polder et Van Santen [Polder 46], a montré que la fraction de volume total  $\nu$  occupée par les particules de glace est le paramètre dominant dans la détermination de la constante diélectrique de la neige. En effet un des résultats des théories sur les milieux effectifs montre que, pour des longueurs d'onde grandes devant la taille des particules, la constante diélectrique dépend uniquement de la fraction volumique et de la forme des grains de glace.

Mätzler a de plus estimé une relation ne dépendant pas des facteurs de forme, qui permet de calculer la constante diélectrique réelle de la neige sèche en fonction de sa densité [Mätzler 87] comme :

$$\varepsilon'_{ns} = 1 + \frac{1,6\rho}{1 - 0,35\rho} \quad (\text{III-7})$$

La partie imaginaire de la constante diélectrique de la neige est obtenue à partir de celle de la glace [Nyfors 83], [Tiuri 84], [Mätzler 96].

$$\varepsilon''_{ns} = \varepsilon''_{glace} (0,52\rho + 0,62\rho^2) \quad (\text{III-8})$$

### III.2.2.2 La neige humide

La présence d'eau liquide dans le mélange modifie fortement les valeurs de la constante diélectrique. Debye a montré que le comportement fréquentiel des constantes diélectriques de la glace et de l'eau est décrit par la formule suivante [Debye 29] :

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 - j\frac{f}{f_o}} \quad (\text{III-9})$$

où  $\varepsilon_s$  et  $\varepsilon_{\infty}$  représentent respectivement la constante diélectrique relative du milieu pour une fréquence nulle et pour une fréquence maximale,  $f_o$  étant la fréquence de relaxation du matériau.

La neige humide montre alors un spectre de relaxation très différent de celui de la glace dans la gamme des micro-ondes [Denoth 84]. En effet alors que la fréquence de relaxation de la glace est de l'ordre de 7 KHz, la fréquence de relaxation de l'eau se trouve dans la gamme des micro-ondes et vaut environ 9 GHz.

Ainsi pour une gamme de fréquence de 3 GHz à 37 GHz et pour une densité de neige comprise entre  $0.09 \text{ g/cm}^3$  et  $0.42 \text{ g/cm}^3$ , le modèle modifié de Debye basé sur des relations empiriques permet de calculer la partie réelle  $\varepsilon'_{ws}$  et la partie imaginaire  $\varepsilon''_{ws}$  de la constante diélectrique de la neige humide [Hallikainen 86].

$$\varepsilon'_{ws} = A + \frac{B m_v^x}{1 + (f/f_o)^2} \quad (\text{III-10})$$

$$\varepsilon''_{ws} = \frac{C(f/f_o)m_v^x}{1+(f/f_o)^2} \quad (\text{III-11})$$

où

$$A = 1 + 1.83\rho + 0.02m_v^{1.015}$$

$$B = 0.073$$

$$C = 0.073$$

$$x = 1.31$$

$$f_o = 9.07 \text{ GHz}$$

La teneur en eau liquide volumique  $m_v$  s'exprime en pourcentage et varie typiquement entre 0% et 12%.

La figure III-5 représente les variations des parties réelle et imaginaire de la constante diélectrique de la neige en fonction de la fréquence et pour différentes valeurs de teneur en eau [Hallikainen 82].

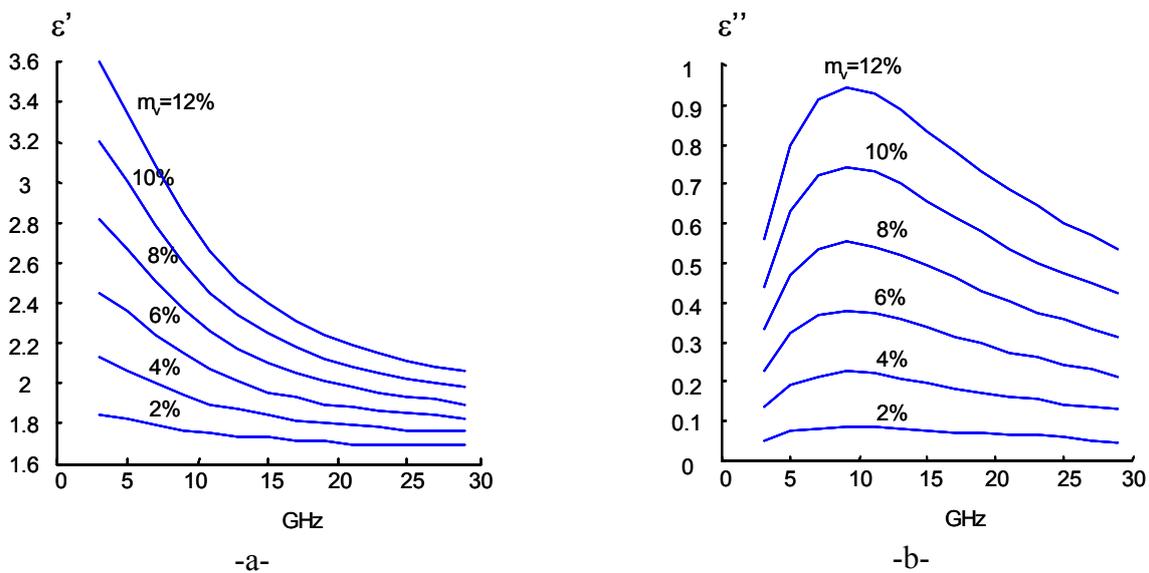


Figure III-5 Partie réelle  $\varepsilon'$  (a) et partie imaginaire  $\varepsilon''$  (b) de la constante diélectrique de la neige, en fonction de la fréquence pour plusieurs teneurs en eau liquide

Afin d'étendre le domaine de validité à un intervalle de fréquence plus large, Mätzler propose une formule de mélange simple calculée à partir de la densité de la neige et de sa teneur en eau liquide [Mätzler 84]:

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_{ns} + \frac{23m_v}{1-j(f/f_o)} \quad (\text{III-12})$$

où  $\varepsilon_{ns}$  est la constante diélectrique de la neige sèche.

Les variations des parties réelle et imaginaire de la constante diélectrique proposées par Mätzler, en bande L et C, sont représentées sur la figure III-6. Leurs variations sont linéaires et il apparaît que la différence entre la partie réelle et la partie imaginaire augmente avec la teneur en eau liquide.

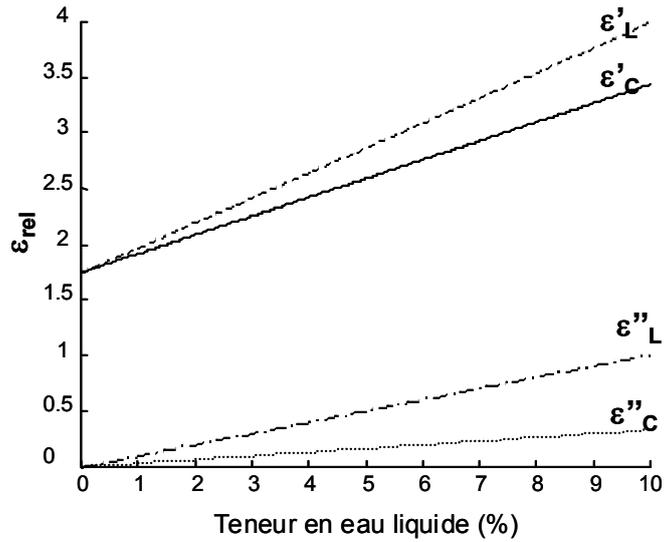


Figure III-6 Variations des parties réelle et imaginaire de la constante diélectrique de la neige humide en fonction de la teneur en eau liquide, en bande L et C

### III.2.3 La profondeur de pénétration

La profondeur de pénétration  $\delta_p$  d'une onde incidente est définie par la distance par rapport à l'interface pour laquelle la puissance incidente est atténuée d'un facteur e.

Si la puissance transmise à une abscisse  $z = 0^+$  juste en dessous de la surface est  $P(0^+)$ , alors la puissance à la profondeur  $z$  est donnée par :

$$P(z) = P(0^+) \exp\left(-\int_0^z \kappa_e(z') dz'\right) \quad (\text{III-13})$$

où  $\kappa_e(z)$  est le coefficient d'extinction du milieu à la profondeur  $z$ . La profondeur de pénétration  $\delta_p$  peut alors être définie à la profondeur  $z = \delta_p$  par :

$$\frac{P(\delta_p)}{P(0^+)} = \frac{1}{e} \quad (\text{III-14})$$

ou par :

$$\int_0^{\delta_p} \kappa_e(z) dz = 1 \quad (\text{III-15})$$

En général  $\kappa_e$  est la somme des coefficients d'absorption et de diffusion,  $\kappa_e = \kappa_a + \kappa_s$ . En bandes L et C, dans le cas de la neige sèche ou humide le coefficient de diffusion est très inférieur au coefficient d'absorption,  $\kappa_s \ll \kappa_a$ . Il est alors possible de dire que  $\kappa_e = \kappa_a = 2\alpha$  où  $\alpha$  est le coefficient d'atténuation du champ. Pour un milieu avec un coefficient d'extinction uniforme, la profondeur de pénétration est donnée par [Ulaby 86] :

$$\delta_p = \kappa_e^{-1} = \frac{1}{2\alpha} \quad (\text{III-16})$$

avec

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left| \operatorname{Im}[\sqrt{\varepsilon}] \right| \quad (\text{III-17})$$

et

$$\kappa_a = \frac{4\pi}{\lambda_0} \sqrt{\left( \frac{\varepsilon_r'}{2} \left[ \left( 1 + \frac{\varepsilon_r''^2}{\varepsilon_r'^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right)} \quad (\text{III-18})$$

La figure III-7 représente l'évolution de la profondeur de pénétration en fonction de la teneur en eau liquide pour les bandes L et C.

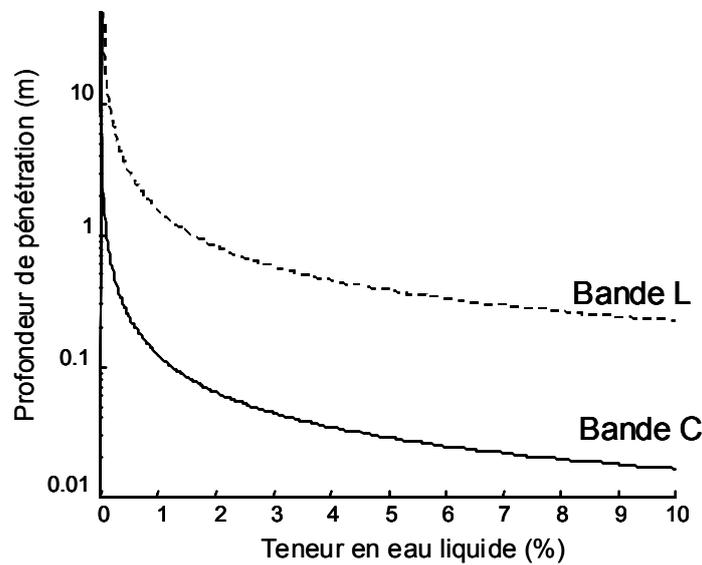


Figure III-7 Profondeur de pénétration en fonction de la teneur en eau liquide pour une densité de  $0.4 \text{ g/cm}^3$ , en bande L et C

Dans le cas assez fréquent où la partie imaginaire de la constante diélectrique du milieu  $\varepsilon_m$  est faible devant sa partie réelle, l'équation devient :

$$\delta_p \cong \frac{\lambda \sqrt{\varepsilon_m'}}{2\pi \varepsilon_m''} \quad (\text{III-19})$$

Le tableau III-1 montre l'importance de l'influence de la teneur en eau liquide sur le comportement fréquentiel de la constante diélectrique de la neige humide, ainsi que sur celui de la profondeur de pénétration.

TEL (%)	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\delta_p$ (m)
0	1.6	$4 \times 10^{-4}$	60
3	1.9	0.08	0.30
5	2.2	0.15	0.18
8	2.6	0.28	0.10

Tableau III-1 Constante diélectrique de la neige en bande C pour une densité de  $0.35 \text{ g.cm}^{-3}$  calculée avec la formule modifiée de Debye

Une nette différence entre la profondeur de pénétration de la neige sèche et de la neige humide est observable. La profondeur de pénétration diminue fortement pour un couvert de neige humide alors que sa constante diélectrique augmente, particulièrement la partie imaginaire qui devient 100 à 1000 fois plus grande. La présence d'eau liquide change fortement le comportement diélectrique de la neige. La partie imaginaire de la constante diélectrique n'est plus négligeable et influence la propagation de l'onde dans le milieu.

#### III.2.4 L'interface air-neige

La caractérisation de l'interface air-neige dépend du type de neige constituant le manteau neigeux.

Dans le cas de la neige sèche, le manteau neigeux présente un contraste diélectrique faible à l'interface air-neige. De plus cette interface possède une rugosité généralement très faible devant la longueur d'onde. Ces deux facteurs conjugués impliquent que l'intensité rétrodiffusée par l'interface supérieure du couvert est négligeable. Par contre, il est important de prendre en compte le phénomène de transmission-réfraction à cette même interface car il occasionne une modification de l'angle de transmission et de la polarisation d'une onde incidente. En effet même si la neige sèche est un milieu peu atténuateur, ses caractéristiques diélectriques différentes de celles de l'air génèrent des changements dissymétriques des canaux de polarisation HH et VV de l'onde incidente.

En présence de neige humide, le contraste diélectrique est beaucoup plus élevé et l'interface est en général plus rugueuse du fait des alternances des processus de fonte et de regel qui ont tendance à agglomérer les grains de glace entre eux. La rétrodiffusion à l'interface air-neige, considérée comme une surface rugueuse, est alors prise en compte.

#### III.2.5 Synthèse

Cette partie, dédiée aux propriétés physiques de la neige, met en évidence les paramètres caractéristiques de ce milieu tels que la densité et la constante diélectrique, dont la valeur est un critère déterminant dans l'étape de modélisation.

La formule de modélisation de la constante diélectrique connaît plusieurs formes selon le domaine de fréquence utilisé. Elle est construite à partir des constantes diélectriques de l'eau et de la glace ainsi que de la densité de la neige. Dans le cas de la neige sèche la constante diélectrique ne dépend pas de la fréquence mais est fonction de la densité. Dans le cas de la neige humide, la constante diélectrique dépend aussi de la fréquence et peut être calculée au moyen de la formule de Debye modifiée pour une fréquence de travail comprise entre 3 GHz et 37 GHz. Une autre expression, proposée par Mätzler pour une gamme de fréquence de travail plus grande, est élaborée à partir de la constante diélectrique de la neige sèche, de la fréquence et de la teneur en eau liquide.

Le modèle de diffusion d'un couvert neigeux, présenté dans la partie suivante, tient compte de la teneur en eau liquide. Ce modèle est donc aussi bien utilisable dans le cas d'une neige sèche ou d'une neige humide. La prise en compte de la teneur en eau liquide dans la neige s'exprimera dans le modèle au travers du coefficient d'extinction  $\kappa_e$  formé à partir de la densité ainsi que des expressions de la constante diélectrique (III-10) et (III-11) définies par Debye.

Lors de l'interaction de l'onde électromagnétique avec le couvert de neige il est nécessaire de tenir compte de la modification de l'angle d'incidence, engendrée par les différences d'indice de l'air et de la neige. Une matrice de transmission, construite à partir des coefficients de réflexion de Fresnel, traduira ce phénomène dans le modèle.

### III.3 Le modèle de diffusion d'un sol recouvert de neige

La rétrodiffusion d'un terrain recouvert de neige dépend de nombreux paramètres tels que :

- la fréquence et la polarisation de l'onde incidente,
- l'angle d'incidence local,
- la hauteur du couvert neigeux, sa densité, sa teneur en eau liquide, sa constante diélectrique, la taille et la forme des particules,
- l'écart type des hauteurs et la longueur de corrélation de l'interface air-neige,
- l'écart type des hauteurs et la longueur de corrélation du sol,
- la constante diélectrique du sol.

La réponse totale d'une couche hétérogène, telle que la neige, est la somme de la diffusion de la surface de neige (interface air-neige), du volume de neige et du sol sous la neige. Dans le cas de la neige sèche, la diffusion de la surface au sommet du pack de neige est négligée en raison de sa faible rugosité et du faible contraste diélectrique entre l'air et la neige. Le faible coefficient d'absorption permet aux micro-ondes de se propager en profondeur et de générer une diffusion de volume à partir du pack de neige et une diffusion de surface à l'interface neige-sol [Shi 93] [Bernier 95].

Pour un couvert de neige humide les micro-ondes sont absorbées dans la couche supérieure limitant la diffusion à une fine couche du pack de neige. Le mécanisme de rétrodiffusion de surface, engendré par l'interface air-neige, est alors dominant. [Mätzler 87].

Les contributions de la limite supérieure (interface air-neige) et de la limite inférieure (interface neige-sol) sont considérées comme des termes de diffusion de surface qui dépendent du contraste diélectrique de part et d'autre de l'interface entre les deux milieux et de la rugosité de l'interface.

### III.3.1 Le transfert radiatif

La méthode du transfert radiatif est une méthode basée sur la conservation du flux d'énergie au travers d'un volume élémentaire. D'abord utilisée en astrophysique, elle a été employée en électromagnétisme, si bien que cette méthode est devenue quasiment incontournable lorsqu'il s'agit de modéliser la réponse électromagnétique d'un milieu diffusant comme la végétation ou la neige. L'équation du transfert radiatif utilisée est vectorielle. Sa solution permet de mettre en évidence les différents mécanismes de diffusion intervenant lors de l'interaction onde-milieu.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la complexité croissante de l'expression de sa solution lorsque les phénomènes de diffusion multiples sont traités.

#### III.3.1.1 L'équation du transfert radiatif scalaire

Le modèle de diffusion d'un couvert neigeux s'appuie sur la théorie du transfert radiatif. Cette théorie se base sur la résolution d'une équation intégral-différentielle considérant la variation d'intensité spécifique observée lorsque l'onde traverse un volume élémentaire, cylindrique de section unitaire et de longueur  $ds$ , contenant des diffuseurs, comme l'illustre la figure III-8-b. L'intensité spécifique  $I$  représente la quantité de puissance émise par une source élémentaire  $da$  par unité d'angle solide  $d\Omega$  comme indiqué sur la figure III-8-a [Ya Qiu Jin 93].

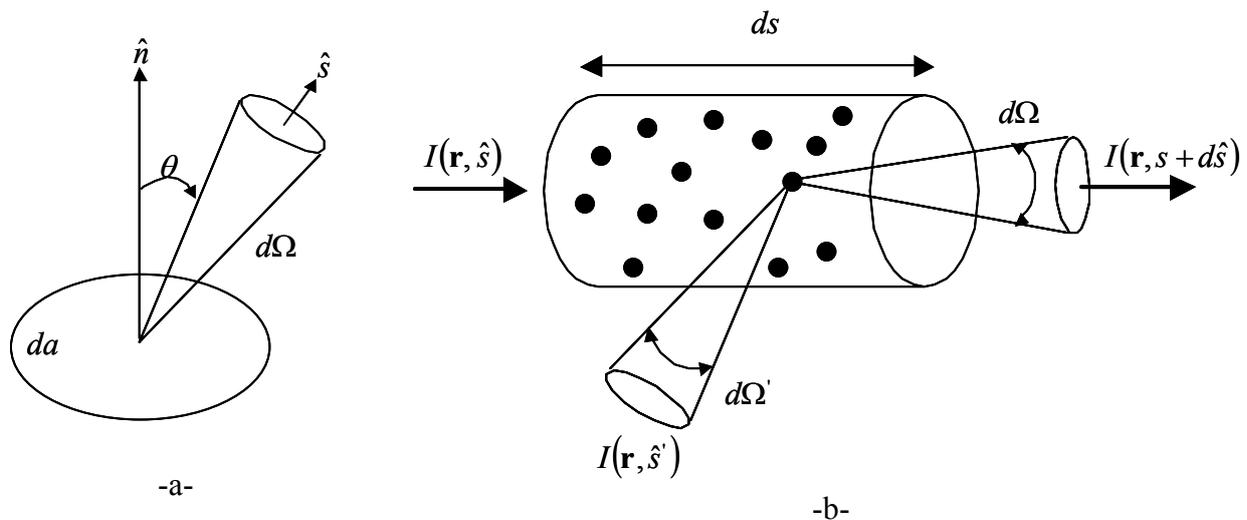


Figure III-8 Configuration géométrique de la définition de l'intensité spécifique

L'énergie, représentée par l'intensité spécifique  $I(\mathbf{r}, \hat{s})$  de direction de propagation  $\hat{s}$  et de vecteur de position  $\mathbf{r}$ , subit des modifications lors de l'interaction avec les diffuseurs. Des pertes d'énergie sont engendrées d'une part par l'absorption des diffuseurs et d'autre part par leur diffusion dans toutes les directions de propagation autres que celle d'intérêt. En contre partie, deux phénomènes peuvent être définis comme des sources d'énergie. Le premier, négligé en télédétection active, est le rayonnement thermique. Le second provient de la contribution de toutes les intensités de directions de propagation  $\hat{s}'$  qui se propagent par diffusion dans la direction de propagation  $\hat{s}$ .

A partir du principe de conservation d'énergie, la variation d'énergie peut s'écrire, en télédétection active, comme [Ishimaru 78], [Tsang 85], [Ulaby 86], [Ulaby 90], [Ya Qiu Jin 93] :

$$dI(\mathbf{r}, \hat{s}) = -\kappa_a I(\mathbf{r}, \hat{s}) ds - \kappa_s I(\mathbf{r}, \hat{s}) ds + \int_{4\pi} \psi(\mathbf{r}, \hat{s}') I(\mathbf{r}, \hat{s}') d\Omega' \quad (\text{III-20})$$

Les premier et deuxième termes à droite de l'égalité représentent respectivement les pertes dues à l'absorption et à la diffusion par les diffuseurs. Les pertes totales s'expriment par le coefficient d'extinction  $\kappa_e$ , défini à partir du coefficient d'absorption  $\kappa_a$  et du coefficient de diffusion  $\kappa_s$  comme :

$$\kappa_e = \kappa_a + \kappa_s \quad (\text{III-21})$$

Ce coefficient permet de définir l'albédo  $\tilde{\omega}$ , variable communément employée en optique, qui rend compte de la proportion des pertes par diffusion par rapport aux pertes totales comme suit :

$$\tilde{\omega} = \frac{\kappa_s}{\kappa_e} = \frac{\kappa_s}{\kappa_a + \kappa_s} \quad (\text{III-22})$$

Le terme intégral de (III-20) contient la fonction de phase  $\psi(\mathbf{r}, \hat{s}')$  qui tient compte de la diffusion dans le milieu. Cette fonction relie les intensités incidentes de directions de propagation  $\hat{s}'$  à l'intensité diffusée dans la direction de propagation  $\hat{s}$ .

### III.3.1.2 L'équation du transfert radiatif vectoriel

Ce bilan d'énergie peut être étendu au cas de la polarimétrie. L'équation du transfert radiatif est alors traitée dans un cas vectoriel pour lequel les variables sont des grandeurs polarimétriques. L'intensité spécifique  $I(\mathbf{r}, \hat{s})$  est remplacée par le vecteur de Stokes modifié  $\tilde{\mathbf{I}}$ , défini dans le chapitre I et les coefficients d'absorption et de diffusion ainsi que la fonction de phase deviennent des grandeurs matricielles. L'équation s'écrit alors :

$$d\tilde{\mathbf{I}}(\mathbf{r}, \hat{s}) = -\mathbf{\kappa}_a \tilde{\mathbf{I}}(\mathbf{r}, \hat{s}) ds - \mathbf{\kappa}_s \tilde{\mathbf{I}}(\mathbf{r}, \hat{s}) ds + \int_{4\pi} \mathbf{P}(\mathbf{r}, \hat{s}') \tilde{\mathbf{I}}(\mathbf{r}, \hat{s}') d\Omega' \quad (\text{III-23})$$

soit

$$\frac{d\tilde{\mathbf{I}}(\mathbf{r}, \hat{s})}{ds} = -\mathbf{\kappa}_e \tilde{\mathbf{I}}(\mathbf{r}, \hat{s}) + \int_{4\pi} \mathbf{P}(\mathbf{r}, \hat{s}') \tilde{\mathbf{I}}(\mathbf{r}, \hat{s}') d\Omega' \quad (\text{III-24})$$

#### III.3.1.2.a La matrice d'extinction

La matrice d'extinction,  $\mathbf{\kappa}_e$ , réunit les pertes par absorption et par diffusion du vecteur intensité qui se propage dans une direction donnée. Elle est construite à partir des éléments de la matrice de diffusion en convention FSA de la manière suivante [Ulaby 90], [Tsang 85], [Ishimaru 80]:

$$\mathbf{\kappa}_e = \begin{bmatrix} -2 \operatorname{Re}(M_{vv}) & 0 & -\operatorname{Re}(M_{vh}) & -\operatorname{Im}(M_{vh}) \\ 0 & -2 \operatorname{Re}(M_{hh}) & -\operatorname{Re}(M_{hv}) & \operatorname{Im}(M_{hv}) \\ -2 \operatorname{Re}(M_{hv}) & -2 \operatorname{Re}(M_{vh}) & -\operatorname{Re}(M_{vv} + M_{hh}) & \operatorname{Im}(M_{vv} - M_{hh}) \\ 2 \operatorname{Im}(M_{hv}) & -2 \operatorname{Im}(M_{vh}) & -\operatorname{Im}(M_{vv} - M_{hh}) & -\operatorname{Re}(M_{vv} + M_{hh}) \end{bmatrix} \quad (\text{III-25})$$

où

$$M_{pq} = \frac{j2\pi N}{k_0} \langle S_{pq} \rangle \quad (\text{III-26})$$

Dans cette expression,  $N$  est la densité volumique des diffuseurs et  $k_0$  le nombre d'onde dans le vide.

♦ **Cas des particules sphériques**

Afin de simplifier les calculs lors de l'étape de modélisation, certaines approximations concernant les caractéristiques du milieu sont généralement effectuées. Dans le cas où les particules diffusantes, considérées sphériques, sont suffisamment petites devant la longueur d'onde incidente, le milieu est modélisé au moyen de l'approximation de Rayleigh. Cette approximation est valide quand le rayon des particules  $a$ , vérifie [Ya Qiu Jin 93]:

$$a \ll \frac{\lambda}{2\pi} \quad (\text{III-27})$$

Les éléments  $S_{pq}$  de la matrice de diffusion sont alors donnés sous une forme simplifiée comme suit :

$$\begin{aligned} S_{vv} &= A [\sin\theta_s \sin\theta_i + \cos\theta_s \cos\theta_i \cos(\phi_s - \phi_i)] \\ S_{vh} &= A \cos\theta_s \sin(\phi_s - \phi_i) \\ S_{hv} &= -A \cos\theta_i \sin(\phi_s - \phi_i) \\ S_{hh} &= A \cos(\phi_s - \phi_i) \end{aligned} \quad (\text{III-28})$$

où  $(\theta, \phi)$  représente la direction de propagation de l'onde dans le milieu comme l'illustre la figure I-3 du système de coordonnées en convention FSA (Chapitre I). Les indices  $s$  et  $i$  sont associés respectivement à l'onde diffusée et à l'onde incidente. Le coefficient  $A$  est défini par :

$$A = k^2 a^3 \frac{\varepsilon_{sn} - 1}{\varepsilon_{sn} + 2} \quad (\text{III-29})$$

Dans cette expression,  $k$  représente le nombre d'onde et  $\varepsilon_{sn}$  la constante diélectrique relative du milieu normalisée par rapport à la constante diélectrique réelle du vide,  $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  Farad/m. Il est facilement observable à partir de (III-29) que le champ rétrodiffusant est proportionnel à  $k^2 a^3$  et l'intensité à  $k^4 a^6$ .

De plus, dans le cas de particules sphériques, les composantes en polarisation croisée sont nulles et les éléments co-polaires de la matrice de diffusion sont égaux,  $\kappa_{svv}(\theta) = \kappa_{shh}(\theta) \equiv \kappa_s$ . Les matrices d'absorption  $\mathbf{\kappa}_a$  et de diffusion  $\mathbf{\kappa}_s$  sont alors des matrices diagonales composées d'éléments identiques. Ces représentations matricielles peuvent ainsi être remplacées par des coefficients scalaires,  $\kappa_a$  et  $\kappa_s$ , définis par [Ya Qiu Jin 93]:

$$\kappa_s = \frac{8}{3} \pi N (k')^4 a^6 \left| \frac{\varepsilon_{sn} - 1}{\varepsilon_{sn} + 2} \right|^2, \quad k' = \text{Re}(k) \quad (\text{III-30})$$

$$\kappa_a = \frac{4}{3} \pi N k' a^3 \varepsilon_{sn}'' \left| \frac{3}{\varepsilon_{sn} + 2} \right|^2 \quad (\text{III-31})$$

avec:

- $k$  le nombre d'onde dans le milieu hôte,
- $N$  la densité volumique des sphères.

♦ **Cas de la neige sèche**

La neige sèche est un milieu constitué de particules de glace enserrées dans de l'air. Le comportement électromagnétique d'un tel milieu peut être modélisé au moyen de l'approximation de Rayleigh [Mätzler 87], [Ulaby 86], [Floricioiu 97], [Kendra 97]. Ainsi en bandes L et C, le rayon des particules doit respectivement être tel que  $a_L \ll 5 \text{ cm}$  et  $a_C \ll 1 \text{ cm}$ . Les particules de glace constituant le manteau neigeux sont de taille et de forme variables et d'orientation aléatoire. Un nuage de particules anisotropes d'orientation aléatoire possède un comportement électromagnétique moyen équivalent à un nuage de particules sphériques, dont les composantes moyennes de polarisation croisée sont nulles. Les expressions matricielles des coefficients d'absorption et de diffusion peuvent être alors considérées comme des scalaires, comme définis dans (III-30) et (III-31).

Dans le cas de la neige sèche, la constante diélectrique du milieu est obtenue à partir des formules de mélange à deux composantes dont le milieu hôte est l'air avec des inclusions de glace de constante diélectrique  $\varepsilon_g = \varepsilon_g' + j\varepsilon_g''$  [Mätzler 87], [Tiuri 84]. Un détail des formules de mélange est donné dans la partie III.2.2 concernant les propriétés physiques de la neige.

**III.3.1.2.b La matrice de phase**

Le champ électromagnétique de l'onde sphérique diffusée, résultant de l'interaction de l'onde incidente avec une particule du milieu, est défini par:

$$\begin{bmatrix} E_h^s \\ E_v^s \end{bmatrix} = \frac{e^{-jkr}}{r} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix} \quad (\text{III-32})$$

L'intensité de l'onde sphérique diffusée au travers de l'aire illuminée  $A$  est reliée à l'intensité de l'onde plane incidente par unité d'angle solide  $d\Omega$  au moyen de la relation suivante [Ulaby 86]:

$$\tilde{\mathbf{I}}^s = \frac{1}{4\pi} \mathbf{P} \tilde{\mathbf{I}}^i d\Omega \quad (\text{III-33})$$

La matrice  $\mathbf{P}$  est définie comme étant la matrice de phase, sans dimension.

L'angle solide  $d\Omega$  délimite un cône dans l'espace où  $dA$  est l'aire découpée par le cône sur une sphère de rayon  $r$  dont le centre est au sommet du cône [Tsang 00]. Dans le cas où la surface découpée  $A$  est plane comme le montre la figure III-8-a, l'angle solide est alors défini par :

$$d\Omega = \frac{A \cos\theta}{r^2} \quad (\text{III-34})$$

L'intensité  $\tilde{\mathbf{I}}^s$ , diffusée dans une direction  $\hat{s}$ , est obtenue à partir de la somme de toutes les contributions des intensités incidentes  $\tilde{\mathbf{I}}^i$  provenant de toutes les directions  $\hat{s}'$ , en intégrant sur tous les angles solides tel que [Ulaby 86]:

$$\tilde{\mathbf{I}}^s = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} \mathbf{P} \tilde{\mathbf{I}}^i d\Omega \quad (\text{III-35})$$

De plus il a été défini dans le chapitre I que dans le cas où l'onde diffusée est considérée comme plane, le vecteur de Stokes diffusé est lié au vecteur de Stokes incident par la matrice de Mueller  $\mathbf{M}$ . La matrice de phase  $\mathbf{P}$  est alors donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{P} = \frac{4\pi \langle \mathbf{M} \rangle}{A \cos \theta} \quad (\text{III-36})$$

Une des hypothèses fondamentales du transfert radiatif est que dans le cas d'un milieu constitué de particules aléatoirement distribuées, les ondes diffusées par les particules ont des phases aléatoires, autorisant ainsi une sommation incohérente des ondes diffusées. Les éléments du vecteur de Stokes total résultent de la somme respective des éléments des vecteurs de Stokes associés aux ondes diffusées [Tsang 85]. Ainsi pour un milieu formé de  $N$  particules par unité de volume, la matrice de phase s'exprime sous la forme :

$$\mathbf{P} = N \frac{4\pi \langle \mathbf{M} \rangle}{A \cos \theta} \quad (\text{III-37})$$

♦ **Cas des particules sphériques**

Dans le cas où les particules sont sphériques, la matrice de phase  $\mathbf{P}$  prend la forme suivante :

$$\mathbf{P} = \frac{3}{8\pi} \kappa_s \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & 0 \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & 0 \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} \end{bmatrix} \quad (\text{III-38})$$

où  $\kappa_s$  est le coefficient de diffusion défini par (III-30) et les éléments  $P_{ij}$  sont calculés à partir de (III-28) comme :

$$\begin{aligned} P_{11} &= (\sin^2 \theta_s \sin^2 \theta_i + \cos^2 \theta_s \cos^2 \theta_i \cos^2(\phi_s - \phi_i)) + 2 \sin \theta_s \sin \theta_i \cos \theta_s \cos \theta_i \cos(\phi_s - \phi_i) \\ P_{12} &= (\cos^2 \theta_s \sin^2(\phi_s - \phi_i)) \\ P_{13} &= (\cos^2 \theta_s \cos \theta_i \sin(\phi_s - \phi_i) \cos(\phi_s - \phi_i) + \cos \theta_s \sin \theta_s \sin \theta_i \sin(\phi_s - \phi_i)) \\ P_{21} &= (\cos^2 \theta_i \sin^2(\phi_s - \phi_i)) \\ P_{22} &= (\cos^2(\phi_s - \phi_i)) \\ P_{23} &= -(\cos \theta_s \sin(\phi_s - \phi_i) \cos(\phi_s - \phi_i)) \\ P_{31} &= (-2 \sin \theta_s \sin \theta_i \cos \theta_i \sin(\phi_s - \phi_i) - 2 \cos \theta_s \cos^2 \theta_i \sin(\phi_s - \phi_i) \cos(\phi_s - \phi_i)) \\ P_{32} &= 2 \cos \theta_s \sin(\phi_s - \phi_i) \cos(\phi_s - \phi_i) \\ P_{33} &= (\cos \theta_s \cos \theta_i (\cos^2(\phi_s - \phi_i) - \sin^2(\phi_s - \phi_i)) + \sin \theta_s \sin \theta_i \cos(\phi_s - \phi_i)) \\ P_{44} &= (\sin \theta_s \sin \theta_i \cos(\phi_s - \phi_i) + \cos \theta_s \cos \theta_i) \end{aligned} \quad (\text{III-39})$$

La direction de l'intensité incidente est déterminée par  $(\theta_i, \phi_i)$  et par  $(\theta_s, \phi_s)$  pour l'intensité diffusée.

Dans le cas particulier de la rétrodiffusion, où  $\phi_s = \phi_i + \pi$ , la matrice de phase des particules sphériques s'écrit alors :

$$\mathbf{P} = \frac{3}{8\pi} \kappa_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{III-40})$$

### III.3.1.2.c Le coefficient de rétrodiffusion

La SER (Surface Equivalente Radar) caractérise l'aptitude d'un objet à renvoyer plus ou moins d'énergie lorsqu'il est illuminé par une onde radar. La SER, plus généralement appelée coefficient de rétrodiffusion, est calculée à partir de l'intensité de l'onde sphérique diffusée,  $\tilde{\mathbf{I}}_s$ , et de celle de l'onde plane incidente,  $\tilde{\mathbf{I}}_i$ , et a pour expression :

$$\sigma_{pq}^0 = \frac{4\pi r^2}{A} \frac{|E_p^s|^2}{|E_q^i|^2} \quad (\text{III-41})$$

où  $E_q^i$  est le champ incident.

L'intensité diffusée par l'onde sphérique est définie par unité d'angle solide et s'écrit :

$$|E_p^i|^2 = I_p^s d\Omega = I_p^s \frac{A \cos\theta_s}{r^2} \quad (\text{III-42})$$

et

$$|E_q^i|^2 = I_q^i \quad (\text{III-43})$$

Le coefficient de rétrodiffusion est alors formulé au moyen de l'expression suivante :

$$\sigma_{pq}^0 = 4\pi \cos\theta_s \frac{I_p^s}{I_q^i} \quad (\text{III-44})$$

### III.3.1.3 Solution itérative de l'équation du transfert radiatif vectoriel

L'équation vectorielle du transfert radiatif peut être résolue aussi bien de façon numérique que de façon analytique. La résolution analytique présente l'avantage de mettre en évidence les différents mécanismes de diffusion intervenant lors de l'interaction de l'onde incidente avec le milieu.

La méthode choisie est une méthode itérative qui permet une résolution analytique de l'équation du transfert radiatif vectoriel [Ulaby 90], [Ferro-Famil 00], [Tsang 85], [Ulaby 86]. Elle consiste à développer le vecteur de Stokes modifié diffusé en série d'ordres de perturbation :

$$\tilde{\mathbf{I}}(\mathbf{r}, \hat{s}) = \tilde{\mathbf{I}}^{(0)}(\mathbf{r}, \hat{s}) + \tilde{\mathbf{I}}^{(1)}(\mathbf{r}, \hat{s}) + \tilde{\mathbf{I}}^{(2)}(\mathbf{r}, \hat{s}) + \dots \quad (\text{III-45})$$

Puisque le phénomène de diffusion est traité de façon itérative, les ordres de perturbation correspondent un à un avec le processus de diffusion multiple. Ainsi la solution à l'ordre zéro  $\tilde{\mathbf{I}}^{(0)}(\mathbf{r}, \hat{s})$  représente l'intensité incidente atténuée, la solution à l'ordre un  $\tilde{\mathbf{I}}^{(1)}(\mathbf{r}, \hat{s})$  représente les mécanismes de diffusion simple, la solution à l'ordre deux  $\tilde{\mathbf{I}}^{(2)}(\mathbf{r}, \hat{s})$  représente les mécanismes de diffusion double.

### III.3.1.3.a Formulation de la méthode itérative

Soit  $\tilde{\mathbf{I}}^i(\theta_i, \phi_i)$  l'intensité incidente arrivant sur l'interface entre l'air et un milieu hétérogène, la neige dans cette étude. En raison de la différence d'indice entre l'air et la neige, l'angle d'arrivée de l'onde dans le couvert neigeux est l'angle réfracté. La figure III-9 représente la propagation de cette intensité dans le couvert neigeux.

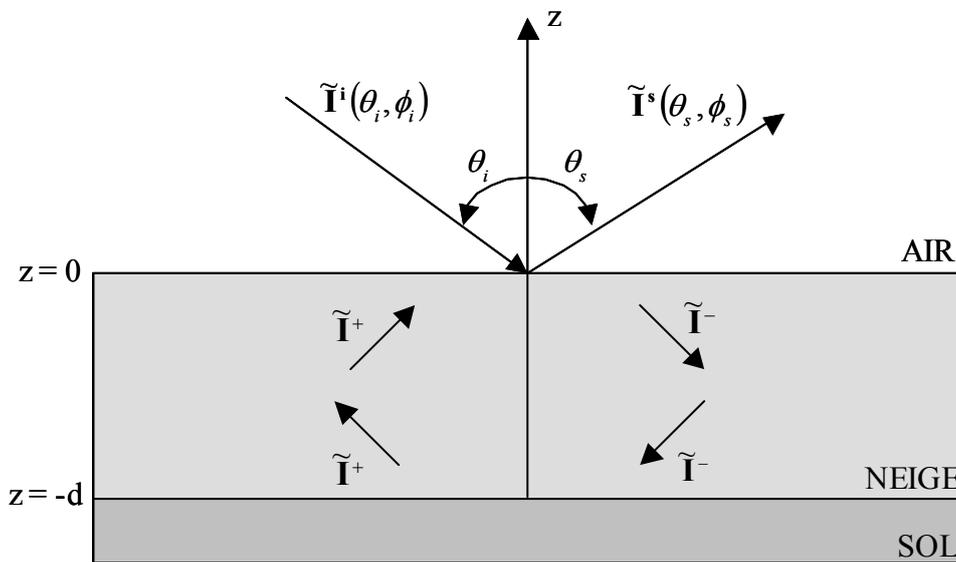


Figure III-9 Configuration géométrique du problème de la méthode itérative

Les limites du couvert sont représentées par deux interfaces air-neige et neige-sol. L'axe  $z$  matérialise la profondeur, où le sol se situe à une profondeur de  $z = -d$  et l'interface air-neige à une profondeur de  $z = 0$ .

Dans le but de faciliter la résolution de l'équation du transfert radiatif vectoriel, l'intensité incidente se propageant dans le couvert neigeux est partagée en deux termes,  $\tilde{\mathbf{I}}^+$  et  $\tilde{\mathbf{I}}^-$  respectivement associés aux intensités ascendante et descendante par rapport à l'axe  $z$ .

En considérant que la longueur différentielle  $ds$  s'écrit en fonction de la profondeur  $z$  comme  $ds = dz/\cos\theta$ , l'équation du transfert radiatif décrite en (III-24) devient :

$$\mu_s \frac{d\tilde{\mathbf{I}}^+(z, \mu_s, \phi_s)}{dz} = -\kappa_e \tilde{\mathbf{I}}^+(z, \mu_s, \phi_s) + \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mathbf{P}(\mu_s, \phi_s, \mu', \phi') \tilde{\mathbf{I}}^+(z, \mu', \phi') d\mu' d\phi' + \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mathbf{P}(\mu_s, \phi_s, -\mu', \phi') \tilde{\mathbf{I}}^-(z, -\mu', \phi') d\mu' d\phi' \quad (\text{III-46})$$

et

$$\begin{aligned}
 -\mu_s \frac{d\tilde{\mathbf{I}}^-(z, -\mu_s, \phi_s)}{dz} = & -\kappa_e \tilde{\mathbf{I}}^-(z, -\mu_s, \phi_s) + \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mathbf{P}(-\mu_s, \phi_s, \mu', \phi') \tilde{\mathbf{I}}^+(z, \mu', \phi') d\mu' d\phi' \\
 & + \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mathbf{P}(-\mu_s, \phi_s, -\mu', \phi') \tilde{\mathbf{I}}^-(z, -\mu', \phi') d\mu' d\phi'
 \end{aligned} \tag{III-47}$$

La direction de propagation est donnée par les angles  $\theta$  et  $\phi$ . Dans les équations (III-46) et (III-47)  $\mu_s = \cos\theta_s$  et  $-\mu_s = \cos(\pi - \theta_s)$ .

Afin de pouvoir traiter par la suite les termes de diffusion indépendamment, les fonctions sources notées  $\mathbf{F}^+(z, \mu_s, \phi_s)$  et  $\mathbf{F}^-(z, -\mu_s, \phi_s)$  sont définies comme :

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}^+(z, \mu_s, \phi_s) = & \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mathbf{P}(\mu_s, \phi_s, \mu', \phi') \tilde{\mathbf{I}}^+(z, \mu', \phi') d\mu' d\phi' \\
 & + \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mathbf{P}(\mu_s, \phi_s, -\mu', \phi') \tilde{\mathbf{I}}^-(z, -\mu', \phi') d\mu' d\phi'
 \end{aligned} \tag{III-48}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}^-(z, -\mu_s, \phi_s) = & \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mathbf{P}(-\mu_s, \phi_s, \mu', \phi') \tilde{\mathbf{I}}^+(z, \mu', \phi') d\mu' d\phi' \\
 & + \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mathbf{P}(-\mu_s, \phi_s, -\mu', \phi') \tilde{\mathbf{I}}^-(z, -\mu', \phi') d\mu' d\phi'
 \end{aligned} \tag{III-49}$$

La solution générale de l'équation du transfert radiatif vectoriel est donnée par [Ferro-Famil 00] et [Kendra 95] :

$$\begin{aligned}
 \tilde{\mathbf{I}}^+(z, \mu_s, \phi_s) = & e^{\frac{-\kappa_e(z+d)}{\mu_s}} \tilde{\mathbf{I}}^+(z = -d, \mu_s, \phi_s) + \int_{-d}^z e^{\frac{-\kappa_e(z-z')}{\mu_s}} \mathbf{F}^+(z', \mu_s, \phi_s) dz' \\
 \tilde{\mathbf{I}}^-(z, -\mu_s, \phi_s) = & e^{\frac{\kappa_e z}{\mu_s}} \tilde{\mathbf{I}}_0 \delta(\mu_s - \mu_0) \delta(\phi_s - \phi_0) + \int_z^0 e^{\frac{\kappa_e(z-z')}{\mu_s}} \mathbf{F}^-(z', -\mu_s, \phi_s) dz'
 \end{aligned} \tag{III-50}$$

La procédure itérative calcule en premier lieu la solution à l'ordre zéro, qui ne considère pas les termes de diffusion représentés par l'intégrale dans (III-24). La solution à l'ordre zéro est alors utilisée comme une fonction pour calculer la solution à l'ordre un.

### III.3.1.3.b Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont évaluées pour la configuration géométrique du problème illustré sur la figure III-9. En faisant l'hypothèse que l'interface air-neige est diffuse et en considérant l'interface neige-sol comme une surface rugueuse, les conditions aux limites de l'équation du transfert radiatif sont décrites, pour une intensité incidente  $\tilde{\mathbf{I}}_0 \delta(\mu_i - \mu_0) \delta(\phi_i - \phi_0)$ , par les relations suivantes [Ulaby 90], [Ferro-Famil 00] :

$$\tilde{\mathbf{I}}^-(z = 0, -\mu_s, \phi_s) = \tilde{\mathbf{I}}_0 \delta(\mu_s - \mu_0) \delta(\phi_s - \phi_0) \tag{III-51}$$

$$\tilde{\mathbf{I}}^+(z = -d, \mu_s, \phi_s) = \int_0^{2\pi} \int_0^1 \frac{1}{4\pi\mu_s} \mathbf{R}(\mu_s, \phi_s, -\mu', \phi') \tilde{\mathbf{I}}^-(z = -d, -\mu', \phi') d\mu' d\phi' \tag{III-52}$$

où  $\mathbf{R}$  représente la matrice de réflectivité du sol. Les fonctions Dirac, notées  $\delta$ , imposent à l'intensité  $\tilde{\mathbf{I}}^-(z=0)$  entrant dans le couvert neigeux la même direction de propagation que celle de l'intensité incidente  $\tilde{\mathbf{I}}_0$ .

### III.3.1.3.c La solution à l'ordre zéro

A l'ordre zéro les sources de diffusion sont considérées comme nulles, les diffuseurs n'intervenant pas dans ce mécanisme de diffusion. En réinjectant (III-51) et (III-52) dans les expressions de (III-50), la solution à l'ordre zéro est donnée, pour les intensités descendante et ascendante, par :

$$\tilde{\mathbf{I}}^{-(0)}(z, -\mu_s, \phi_s) = e^{\frac{\kappa_e z}{\mu_s}} \tilde{\mathbf{I}}_0 \delta(\mu_s - \mu_0) \delta(\phi_s - \phi_0) \quad (\text{III-53})$$

$$\tilde{\mathbf{I}}^{+(0)}(z, \mu_s, \phi_s) = e^{-\frac{\kappa_e(z+d)}{\mu_s}} \frac{\mathbf{R}(\mu_s, \phi_s, -\mu_0, \phi_0)}{4\pi\mu_s} e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_s}} \tilde{\mathbf{I}}_0 \quad (\text{III-54})$$

En configuration monostatique  $\mu_s = \mu_0$  et  $\phi_s = \phi_0 + \pi$ . Le terme d'intensité descendante  $\tilde{\mathbf{I}}^{-(0)}$  devient nul. L'expression de l'intensité rétrodiffusée est alors donnée par  $\tilde{\mathbf{I}}^{+(0)}$  en  $z=0$  par :

$$\tilde{\mathbf{I}}^{s(0)}(z=0, \mu_0, \phi_0) = e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \frac{\mathbf{R}(\mu_0, \phi_0 + \pi, -\mu_0, \phi_0)}{4\pi\mu_0} e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \tilde{\mathbf{I}}_0 \quad (\text{III-55})$$

Une interprétation physique de cette solution peut être déduite en lisant l'équation de la droite vers la gauche. L'intensité incidente  $\tilde{\mathbf{I}}_0$  de l'onde entrante dans le milieu subit une atténuation sur une distance  $d/\mu_0$ , épaisseur oblique du milieu homogène. Cette atténuation est exprimée par le coefficient d'extinction  $\kappa_e$ . L'onde est ensuite réfléchiée par un sol rugueux, symbolisé par la matrice de réflexion  $\mathbf{R}$ , dans la direction d'observation. Enfin l'onde rétrodiffusée est à nouveau atténuée sur le trajet de retour de distance  $d/\mu_0$ .

La solution à l'ordre zéro décrit l'atténuation de l'onde incidente sur un trajet aller-retour au travers du milieu.

### III.3.1.3.d La solution à l'ordre un avec un sol lisse

Pour obtenir la solution à l'ordre un, les fonctions sources de diffusion données par (III-48) et (III-49) sont calculées au moyen de la solution à l'ordre zéro. L'interface neige-sol est considérée comme lisse à l'ordre un afin de rendre plus abordable la résolution analytique. L'intégration sur le volume est alors calculée aisément grâce à la présence des fonctions de Dirac. En considérant l'interface neige-sol comme une surface lisse, la solution à l'ordre zéro devient :

$$\tilde{\mathbf{I}}^{-(0)}(z, -\mu_s, \phi_s) = e^{\frac{\kappa_e z}{\mu_s}} \tilde{\mathbf{I}}_0 \delta(\mu_s - \mu_0) \delta(\phi_s - \phi_0) \quad (\text{III-56})$$

$$\tilde{\mathbf{I}}^{+(0)}(z, \mu_s, \phi_s) = e^{-\frac{\kappa_e(z+d)}{\mu_0}} \mathbf{R}_p(\mu_0, \phi_0) e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \tilde{\mathbf{I}}_0 \delta(\mu_s - \mu_0) \delta(\phi_s - \phi_0) \quad (\text{III-57})$$

En réinjectant (III-56) et (III-57) dans la solution générale du transfert radiatif proposée en (III-50), les expressions de  $\tilde{\mathbf{I}}^{+(1)}$  et de  $\tilde{\mathbf{I}}^{-(1)}$  sont données par :

$$\begin{aligned}
 \tilde{\mathbf{I}}^{+(1)}(z, \mu_s, \phi_s) = & e^{-\frac{\kappa_e(z+d)}{\mu_0}} \mathbf{R}_p(\mu_0, \phi_0) e^{\frac{-\kappa_e d}{\mu_0}} \tilde{\mathbf{I}}_0 \delta(\mu_s - \mu_0) \delta(\phi_s - \phi_0) \\
 & + e^{-\frac{\kappa_e(z+d)}{\mu_s}} \mathbf{R}_p(\mu_s, \phi_s) \frac{1}{\mu_s} \int_{-d}^0 e^{\frac{\kappa_e(-d-z')}{\mu_s}} \mathbf{P}(-\mu_s, \phi_s, \mu_0, \phi_0) e^{-\frac{\kappa_e(z'+d)}{\mu_0}} \mathbf{R}_p(\mu_0, \phi_0) e^{\frac{-\kappa_e d}{\mu_0}} \tilde{\mathbf{I}}_0 dz' \\
 & + e^{-\frac{\kappa_e(z+d)}{\mu_s}} \mathbf{R}_p(\mu_s, \phi_s) \frac{1}{\mu_s} \int_{-d}^0 e^{\frac{\kappa_e(-d-z')}{\mu_s}} \mathbf{P}(-\mu_s, \phi_s, -\mu_0, \phi_0) e^{\frac{\kappa_e z'}{\mu_0}} \tilde{\mathbf{I}}_0 dz' \\
 & + \frac{1}{\mu_s} \int_{-d}^z e^{-\frac{\kappa_e(z-z')}{\mu_s}} \mathbf{P}(\mu_s, \phi_s, \mu_0, \phi_0) e^{-\frac{\kappa_e(z'+d)}{\mu_0}} \mathbf{R}_p(\mu_s, \phi_s) e^{\frac{-\kappa_e d}{\mu_0}} \tilde{\mathbf{I}}_0 dz' \\
 & + \frac{1}{\mu_s} \int_{-d}^z e^{-\frac{\kappa_e(z-z')}{\mu_s}} \mathbf{P}(\mu_s, \phi_s, -\mu_0, \phi_0) e^{\frac{\kappa_e z'}{\mu_0}} \tilde{\mathbf{I}}_0 dz'
 \end{aligned} \tag{III-58}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{\mathbf{I}}^{-(1)}(z, -\mu_s, \phi_s) = & e^{\frac{\kappa_e z}{\mu_s}} \tilde{\mathbf{I}}_0 \delta(\mu_s - \mu_0) \delta(\phi_s - \phi_0) \\
 & + \frac{1}{\mu_s} \int_{-z}^0 e^{\frac{\kappa_e(z-z')}{\mu_s}} \mathbf{P}(-\mu_s, \phi_s, \mu_0, \phi_0) e^{-\frac{\kappa_e(z'+d)}{\mu_0}} \mathbf{R}_p(\mu_s, \phi_s) e^{\frac{-\kappa_e d}{\mu_0}} \tilde{\mathbf{I}}_0 dz' \\
 & + \frac{1}{\mu_s} \int_{-z}^0 e^{\frac{\kappa_e(z-z')}{\mu_s}} \mathbf{P}(-\mu_s, \phi_s, -\mu_0, \phi_0) e^{\frac{\kappa_e z'}{\mu_0}} \tilde{\mathbf{I}}_0 dz'
 \end{aligned} \tag{III-59}$$

Dans le cas général où les particules diffusantes ne sont pas sphériques, le coefficient d'extinction  $\kappa_e$  s'exprime sous la forme d'une matrice non diagonale définie par (III-25), rendant compliquée la résolution de l'intégrale de l'exponentielle matricielle. Afin de pouvoir résoudre cette intégrale une méthode, basée sur la décomposition aux valeurs et vecteurs propres de  $\mathbf{\kappa}_e$ , est développée par Tsang et al. [Tsang 85]

Dans le cas présent où les particules sont considérées comme sphériques et en configuration monostatique,  $\mu_s = \mu_0$  et  $\phi_s = \phi_0 + \pi$ , l'expression de l'intensité rétrodiffusée à l'ordre un est la somme de la solution à l'ordre un pour une surface lisse et de la solution à l'ordre zéro pour une surface rugueuse. Il est possible de distinguer la participation de quatre mécanismes dans le phénomène de rétrodiffusion total. Une identification aisée de ces composantes de diffusion est possible à partir de la solution à l'ordre un :

$$\begin{aligned}
 \frac{\tilde{\mathbf{I}}^{s(1)}(0, \mu_0, \phi)}{\tilde{\mathbf{I}}_0} = & e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \frac{\mathbf{R}(\mu_0, \phi_0 + \pi, -\mu_0, \phi_0)}{4\pi\mu_0} e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \\
 & + \frac{1}{\mu_0} e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \mathbf{R}_p(\mu_0, \phi_0) \frac{1 - e^{-\frac{2\kappa_e d}{\mu_0}}}{2\kappa_e} \mathbf{P}(-\mu_0, \phi_0 + \pi, \mu_0, \phi_0) \mathbf{R}_p(\mu_0, \phi_0) e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \\
 & + \frac{1}{\mu_0} d e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \mathbf{P}(\mu_0, \phi_0 + \pi, \mu_0, \phi_0) \mathbf{R}_p(\mu_0, \phi_0) e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \\
 & + \frac{1}{\mu_0} e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \mathbf{R}_p(\mu_0, \phi_0) d e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \mathbf{P}(-\mu_0, \phi_0 + \pi, -\mu_0, \phi_0) \\
 & + \frac{1}{\mu_0} \frac{1 - e^{-\frac{2\kappa_e d}{\mu_0}}}{2\kappa_e} \mathbf{P}(\mu_0, \phi_0 + \pi, -\mu_0, \phi_0)
 \end{aligned} \tag{III-60}$$

L'identification terme à terme de (III-60) permet de relier la théorie de la diffusion aux mécanismes physiques. Le premier terme de l'équation, donné par l'approximation à l'ordre zéro, définit l'intensité rétrodiffusée par le sol et atténuée lors du trajet aller-retour. Le deuxième terme correspond au mécanisme de triple rebond. L'intensité incidente est atténuée sur son parcours jusqu'au sol puis réfléchi en direction d'une particule, rétrodiffusée par la particule vers le sol qui la réfléchit dans la direction d'observation où elle est à nouveau atténuée sur son trajet de retour. Les troisième et quatrième termes représentent le mécanisme de double rebond sol-particule et particule-sol en tenant compte des effets d'atténuation lors des trajets dans le couvert. Le dernier terme définit la rétrodiffusion directe des particules dans la direction d'observation.

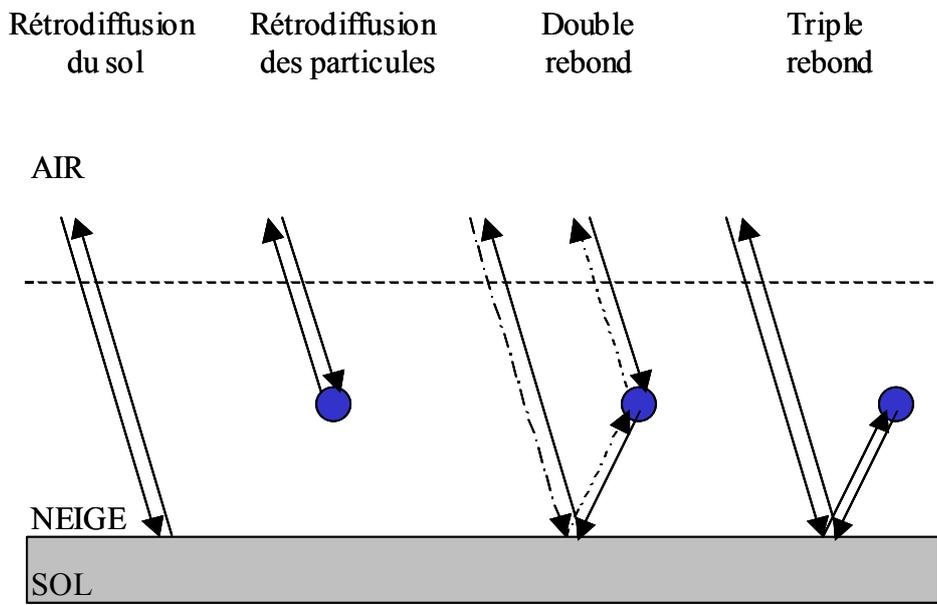


Figure III-10 Mécanismes de diffusion de la solution à l'ordre un de l'équation du transfert radiatif vectoriel

III.3.1.3.e Solution à l'ordre un avec un sol rugueux

Dans cette partie une méthode semi-analytique est proposée pour résoudre l'équation du transfert radiatif à l'ordre un en considérant l'interface neige-sol rugueuse. A l'ordre un, la prise en compte d'une surface rugueuse diffusant dans tout l'espace rend complexe la résolution analytique des équations du fait de la double intégrale sur les angles de diffusion  $\theta$  et  $\phi$ . Pour ce faire, la solution à l'ordre zéro dans le cas d'un sol rugueux, donnée par (III-53) et (III-54), est réinjectée dans l'équation de la solution générale (III-50). La solution à l'ordre un se présente alors sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 \frac{\mathbf{I}^{+(1)}(z, \mu_s, \phi_s)}{\tilde{\mathbf{I}}_0} &= e^{-\frac{\kappa_e(z+d)}{\mu_s}} \frac{\mathbf{R}(\mu_s, \phi_s, \mu_0, \phi_0)}{4\pi\mu_s} e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \\
 &+ e^{-\frac{\kappa_e(z+d)}{\mu_s}} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \frac{\mathbf{R}(\mu_s, \phi_s, \mu, \phi)}{4\pi\mu_s} \int_{-d}^0 e^{-\frac{\kappa_e(d+z')}{\mu}} \left[ \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mathbf{P}(-\mu, \phi, \mu', \phi') \right. \\
 &\cdot \left. e^{-\frac{\kappa_e(z'+d)}{\mu'}} \frac{\mathbf{R}(\mu', \phi', \mu_0, \phi_0)}{4\pi\mu'} e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} d\mu' d\phi' dz' \right] d\mu d\phi \\
 &+ e^{-\frac{\kappa_e(z+d)}{\mu_s}} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \frac{\mathbf{R}(\mu_s, \phi_s, \mu, \phi)}{4\pi\mu_s} \int_{-d}^0 e^{-\frac{\kappa_e(d+z')}{\mu}} \mathbf{P}(-\mu, \phi, -\mu_0, \phi_0) e^{-\frac{\kappa_e z'}{\mu_0}} dz' d\mu d\phi \\
 &+ \int_{-d}^z e^{-\frac{\kappa_e(z-z')}{\mu_s}} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mathbf{P}(\mu_s, \phi_s, \mu', \phi') e^{-\frac{\kappa_e(z'+d)}{\mu'}} \frac{\mathbf{R}(\mu', \phi', \mu_0, \phi_0)}{4\pi\mu'} e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} d\mu' d\phi' dz \\
 &+ \int_{-d}^z e^{-\frac{\kappa_e(z-z')}{\mu_s}} \mathbf{P}(\mu_s, \phi_s, -\mu_0, \phi_0) e^{-\frac{\kappa_e z'}{\mu_0}} dz'
 \end{aligned} \tag{III-61}$$

Le premier terme de l'équation, considéré comme étant la rétrodiffusion directe du sol, et le dernier terme de l'équation, assimilé à la rétrodiffusion des particules, sont traités comme précédemment. Le terme de triple rebond n'est plus pris en compte dans la suite de cette étude étant donné sa faible contribution en puissance dans le phénomène de rétrodiffusion total [Ferro-Famil 00]. Bien que le terme de double rebond participe faiblement à la puissance rétrodiffusée totale [Ferro-Famil 00], son rôle dans le comportement polarimétrique du milieu doit être considéré. Afin de pouvoir programmer ce mécanisme, il est nécessaire de simplifier son écriture. Une méthode exclusivement analytique ne permet pas de résoudre facilement la double intégration présente dans les termes de double rebond au vu de la complexité des expressions. C'est pourquoi une méthode de résolution basée sur la quadrature gaussienne est proposée. Elle permet de discrétiser l'intervalle rendant ainsi réalisable le calcul de la diffusion d'une surface rugueuse sur toutes les particules du couvert. La procédure choisie est une procédure de Gauss-Legendre [Abramovitz 70]. La fonction à intégrer est calculée pour  $N$  angles d'incidence,  $\theta_i$ , avec  $\phi = 0$  et  $\phi = \pi$ . A partir des  $N$  échantillons, il est possible de trouver un jeu de coefficients  $\varpi_i$  qui pondèrent la fonction à intégrer aux points d'abscisses  $x_i = \cos \theta_i$ .

La solution à l'ordre un de l'équation du transfert radiatif considérant une interface neige-sol rugueuse se présente alors sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 \frac{\mathbf{I}^{+(1)}(z, \mu_s, \phi_s)}{\tilde{\mathbf{I}}_0} = & e^{-\frac{\kappa_e(z+d)}{\mu_s}} \frac{\mathbf{R}(\mu_s, \phi_s, \mu_0, \phi_0)}{4\pi\mu_s} e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \\
 & + e^{-\frac{\kappa_e(z+d)}{\mu_s}} \left[ \sum_{i=0}^N \varpi_i \frac{\mathbf{R}(\mu_s, \phi_s, x_i, 0)}{4\pi\mu_s} \int_{-d}^0 e^{-\frac{\kappa_e(d+z')}{x_i}} \mathbf{P}(-x_i, 0, -\mu_0, \phi_0) e^{-\frac{\kappa_e z'}{\mu_0}} dz' \right. \\
 & \left. + \sum_{i=0}^N \varpi_i \frac{\mathbf{R}(\mu_s, \phi_s, x_i, \pi)}{4\pi\mu_s} \int_{-d}^0 e^{-\frac{\kappa_e(d+z')}{x_i}} \mathbf{P}(-x_i, \pi, -\mu_0, \phi_0) e^{-\frac{\kappa_e z'}{\mu_0}} dz' \right] \\
 & + \int_{-d}^z e^{-\frac{\kappa_e(z-z')}{\mu_s}} \left[ \sum_{i=0}^N \varpi_i \mathbf{P}(\mu_s, \phi_s, x_i, 0) e^{-\frac{\kappa_e(z'+d)}{x_i}} \frac{\mathbf{R}(x_i, 0, \mu_0, \phi_0)}{4\pi x_i} e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \right. \\
 & \left. + \sum_{i=0}^N \varpi_i \mathbf{P}(\mu_s, \phi_s, x_i, \pi) e^{-\frac{\kappa_e(z'+d)}{x_i}} \frac{\mathbf{R}(x_i, \pi, \mu_0, \phi_0)}{4\pi x_i} e^{-\frac{\kappa_e d}{\mu_0}} \right] dz' \\
 & + \int_{-d}^z e^{-\frac{\kappa_e(z-z')}{\mu_s}} \mathbf{P}(\mu_s, \phi_s, -\mu_0, \phi_0) e^{-\frac{\kappa_e z'}{\mu_0}} dz'
 \end{aligned} \tag{III-62}$$

L'analyse des mécanismes de rétrodiffusion, dans le cas de l'interface neige-sol rugueuse, menée dans différentes configurations se base sur cette équation.

### III.3.1.3.f *Prise en compte de l'interface air-neige*

Comme il a été commenté précédemment, il est nécessaire de tenir compte des modifications de l'onde lors de sa pénétration dans le couvert neigeux. L'interface air-neige est considérée comme une surface plane. Ainsi la transmission de l'onde à l'interface s'exprime au moyen d'une matrice de transmission formée à partir des coefficients de Fresnel définis en convention FSA comme suit [Ulaby 86] :

$$r_{hh} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \tag{III-63}$$

$$r_{vv} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \tag{III-64}$$

où  $n_1$  représente l'indice du milieu supérieur et  $n_2$  l'indice du milieu inférieur.

Un coefficient de réflectivité est alors donné par :

$$\sigma_{ppqq} = r_{pp} r_{qq}^* \quad (\text{III-65})$$

La matrice de transmittivité  $\mathbf{T}_{12}$  au travers d'une interface plane du milieu 1 vers le milieu 2 s'exprime alors comme :

$$\mathbf{T}_{12} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \begin{bmatrix} 1 - |r_v|^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - |r_h|^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g & -h \\ 0 & 0 & h & g \end{bmatrix} \quad (\text{III-66})$$

où  $\varepsilon_1 = n_1^2$  est la constante diélectrique du milieu supérieur et  $\varepsilon_2 = n_2^2$  la constante diélectrique du milieu inférieur.

Les termes  $g$  et  $h$  sont donnés par :

$$g = \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_i} \operatorname{Re} \left[ (1 + r_v)(1 + r_h^*) \right]$$

$$h = \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_i} \operatorname{Im} \left[ (1 + r_v)(1 + r_h^*) \right] \quad (\text{III-67})$$

avec  $g = h = 0$  quand  $\theta$  est plus grand que l'angle critique.

Afin de tenir compte dans l'équation du transfert radiatif de la transmission de l'onde à l'interface air-neige lors des trajets aller et retour, il est nécessaire de multiplier chaque terme de (III-62) à droite par la matrice  $\mathbf{T}_{12}$  (trajet aller, transmission air vers neige) et à gauche par la matrice  $\mathbf{T}_{21}$  (trajet retour, transmission neige vers air).

### III.3.2 Modèle de diffusion de surface

Dans la littérature, de nombreuses méthodes sont développées pour modéliser la réponse rétrodiffusée par une surface rugueuse. Cette partie présente brièvement les deux méthodes utilisées pour modéliser la diffusion du sol dans l'équation du transfert radiatif.

#### III.3.2.1 Description d'une surface rugueuse

Les paramètres descriptifs d'une surface sont généralement liés à sa géométrie et à ses propriétés diélectriques.

##### ♦ L'écart type des hauteurs

La rugosité d'une surface est décrite au moyen de ses hauteurs  $z$  et suit une distribution  $p(z)$ . L'écart type des hauteurs de la surface est alors défini par  $\sigma$ , relatif à la rugosité du sol et dont l'expression peut être obtenue à partir de la variance  $\sigma^2$  de ses hauteurs.

◆ **La longueur de corrélation**

Une surface est aussi décrite par la corrélation existant entre deux hauteurs. Le paramètre permettant de définir cette corrélation est la longueur de corrélation,  $L_c$ , calculée à partir de la densité de probabilité jointe de deux hauteurs et de la fonction d'autocorrélation obtenue à partir de cette dernière. Dans le cas général d'une surface isotrope en chaque point, la fonction d'autocorrélation, suivant une loi gaussienne, ne dépend que de la distance horizontale  $\xi$  entre deux points  $x_1$  et  $x_2$  et s'exprime de la façon suivante [Ulaby 86] :

$$\rho(\xi) = e^{-\frac{\xi^2}{L_c}} \quad (\text{III-68})$$

◆ **L'écart type des pentes**

La rugosité de surface est totalement définie par son écart type des hauteurs et sa longueur de corrélation. Un autre paramètre souvent utilisé pour caractériser une surface est l'écart type des pentes formulé à partir de  $\sigma$  et  $L_c$  tel que :

$$\sigma_{p_g} = \frac{\sigma\sqrt{2}}{L_c} \quad (\text{III-69})$$

Une surface est d'autant plus rugueuse que l'écart type de ses pentes est élevé.

**III.3.2.2 La méthode de Kirchhoff – Approximation scalaire**

La méthode de l'approximation scalaire est préférée à celle de la phase stationnaire car ses coefficients de diffusion co-polaires ne sont pas égaux [Ulaby 86].

◆ **Coefficient de diffusion**

Le coefficient de diffusion dans le cas de l'approximation scalaire peut être exprimé par la somme d'une composante cohérente,  $\sigma_{pq}^s$ , d'une composante non cohérente  $\sigma_{pqn}^s$  et d'une composante diffuse,  $\sigma_{pqd}^s$ .

$$\sigma_{pq}^s = \sigma_{pq}^s + \sigma_{pqn}^s + \sigma_{pqd}^s \quad (\text{III-70})$$

Dans le cas d'une surface gaussienne d'écart type  $\sigma$  et de fonction de corrélation gaussienne de longueur de corrélation  $L_c$ , les composantes s'expriment comme :

$$\sigma_{ppqc}^s = \pi k^2 |a_{pq} a_{pq}^*| \delta(q_x) \delta(q_y) e^{(-g)} \quad (\text{III-71})$$

$$\sigma_{ppqn}^s = |a_{pq} a_{pq}^*| \left(\frac{k}{2}\right)^2 e^{(-g)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{g^n}{n!n} e^{\left[-\frac{(q_x^2 + q_y^2)L_c^2}{4n}\right]} \quad (\text{III-72})$$

$$\sigma_{ppqd}^s = -\frac{q_z (k\sigma L_c)^2}{2} e^{(-g)} \operatorname{Re}\left\{a_{opq} (q_x a_{1pq}^* + q_y a_{2pq}^*)\right\} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{g^{n-1}}{n!n} \exp\left\{-\frac{(q_x^2 + q_y^2)L^2}{4n}\right\} \quad (\text{III-73})$$

avec  $q_x = k(\sin \theta_s \cos \varphi_s - \sin \theta \cos \varphi)$ ,  $q_y = k(\sin \theta_s \sin \varphi_s - \sin \theta \sin \varphi)$ ,  $q_z = k(\cos \theta_s + \cos \theta)$ ,  
et  $g = q_z^2 \sigma^2 = (k\sigma)^2 (\cos \theta + \cos \theta_s)^2$ .

Les coefficients  $a_{pq}$  sont donnés par [Ulaby 86, pp. 936-941].

Lorsque  $k\sigma$  s'approche de 0, le terme  $g$  tend vers 0 et les composantes non cohérente et diffuse tendent à être nulles. Seule la composante cohérente intervient dans la diffusion. Il s'agit alors d'une réflexion spéculaire et l'intensité totale s'exprime à partir des coefficients de diffusion de Fresnel. Quand le degré de rugosité augmente, la composante cohérente diminue au profit des composantes non cohérente et diffuse.

◆ **Domaine de validité**

Les conditions de validité de l'approximation scalaire sont :

$$kL_c > 6, \quad R_c > \lambda \quad \text{et} \quad \sigma_{P_G} < 0,25 \quad (\text{III-74})$$

Pour une surface gaussienne, le rayon de courbure s'exprime en fonction de la longueur de corrélation  $L$  et de l'écart type des hauteurs  $\sigma$  :

$$R_c = \frac{L_c^2}{2\sigma} \sqrt{\frac{\pi}{6}} \quad (\text{III-75})$$

**III.3.2.3 La méthode de l'équation intégrale (IEM)**

La rétrodiffusion par une surface rugueuse aléatoire peut aussi être décrite par la méthode de l'équation intégrale. Le domaine de validité de l'IEM est plus large que celui de la méthode de Kirchhoff. Le coefficient de diffusion peut être exprimé par la somme de la composante de simple diffusion  $\sigma_{pqrs}^s$  et de la composante de diffusions multiples  $\sigma_{pqrs}^m$ . Généralement le terme de diffusions multiples est négligeable devant le terme de diffusion simple et n'est donc pas pris en compte dans la définition du coefficient de rétrodiffusion.

◆ **Coefficient de diffusion**

Dans le cas de surface de petite et moyenne rugosité,  $k\sigma < 3$ , les coefficients de diffusion copolaires sont donnés par [Fung 92], [Fung 94], [Allain 03] :

$$\sigma_{ppqq}^s = \frac{k^2}{4\pi} \exp(-2k_z^2 \sigma^2) \sum_{n=1}^{\infty} \sigma^{2n} I_{pp}^n I_{qq}^{n*} \frac{1}{n!} W^n(-2k_x, 0) \quad (\text{III-76})$$

avec  $k_x = k \cos \theta_i$ ,  $k_z = k \sin \theta_i$ .

Le terme  $W$  caractérise le spectre de puissance, défini par la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation d'une surface.

$$I_{pp}^n = (2k_z)^n f_{pp} \exp(-k_z^2 \sigma^2) + \frac{k_z^n [F_{pp}^n(-k_x, 0) + F_{pp}^n(k_x, 0)]}{2} \quad (\text{III-77})$$

où les termes  $f_{pp}$  et  $F_{pp}$  sont donnés par les expressions suivantes :

$$f_{vv} = 2R_{//} / \cos \theta_i \text{ et } f_{hh} = -2R_{\perp} / \cos \theta_i \quad (\text{III-78})$$

$$F_{vv}(-k_x, 0) + F_{vv}(k_x, 0) = \frac{2 \sin^2 \theta_i (1 + R_{//})^2}{\cos \theta_i} \left[ \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon_r} \right) + \frac{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i - \varepsilon_r \cos^2 \theta_i}{\varepsilon_r^2 \cos^2 \theta_i} \right] \quad (\text{III-79})$$

$$F_{hh}(-k_x, 0) + F_{hh}(k_x, 0) = -\frac{2 \sin^2 \theta_i (1 + R_{\perp})^2}{\cos^3 \theta_i} (\varepsilon_r - 1)$$

où  $R_{//}$ ,  $R_{\perp}$  sont respectivement les coefficients de Fresnel en polarisation verticale et horizontale.

En polarisation croisée, le coefficient de rétrodiffusion est dû au terme de diffusions multiples car sa composante de diffusion simple est nulle en rétrodiffusion. Son expression est alors donnée par :

$$\sigma_{hv hv} = \sigma_{hv hv}^m = \frac{k^2}{8\pi^2} \exp(-2k_z^2 \sigma^2) \quad (\text{III-80})$$

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(k_z^2 \sigma^2)^{m+n}}{m!n!} \iint \left[ |F_{hv}(u, v)|^2 + F_{hv}(u, v) F_{hv}^*(-u, -v) \right] W^m(u - k_x, v) W^n(u + k_x, v) du dv$$

avec

$$F_{hv}(u, v) = \frac{uv}{k \cos \theta_i} \left[ \frac{8R^2}{(k^2 - u^2 - v^2)^{1/2}} + \frac{-2 + 6R^2 + (1 + R)^2 / \varepsilon + \varepsilon(1 - R)^2}{(\varepsilon k^2 - u^2 - v^2)^{1/2}} \right] \quad (\text{III-81})$$

où  $R = \frac{R_{//} - R_{\perp}}{2}$ .

#### ◆ Domaine de validité

Dans le cas de surface à petite et moyenne rugosité et pour une fonction de corrélation de surface gaussienne le domaine de validité est donné par :

$$k\sigma < 3$$

$$\cos^2 \theta_i \frac{k\sigma^2}{\sqrt{kc}} \exp(-\sqrt{2kc}(\bar{L}_c - \sin \theta_i)) \ll 1 \text{ avec } kc = 0.459kL_c \quad (\text{III-82})$$

## III.4 Caractérisation polarimétrique d'un sol enneigé

Une étude du comportement polarimétrique est présentée dans cette partie pour chaque mécanisme participant au phénomène de diffusion, afin d'estimer l'influence de ces mécanismes sur la rétrodiffusion totale d'un sol recouvert de neige. De plus cette analyse polarimétrique est une étape préliminaire à l'étude polarimétrique des données SAR menée par la suite pour la cartographie de la neige.

### III.4.1 La réponse d'un sol en rétrodiffusion

#### III.4.1.1 Comportement en puissance

En milieux alpins, les sols se comportent comme des surfaces rugueuses. Ainsi la composante de rétrodiffusion directe des surfaces dans le modèle du transfert radiatif est modélisée au moyen de l'IEM du fait de son large domaine de validité. Les entrées du modèle sont choisies de façon à être proches des paramètres caractéristiques physiques du sol observés sur les sites d'études. Néanmoins peu de mesures de sol ont été collectées aux dates correspondant à l'acquisition des données radar. Ainsi l'utilisation du modèle d'inversion de Oh [Oh 92] a permis d'estimer la valeur de ces paramètres sur les régions étudiées.

Les paramètres d'entrée du modèle relatifs au couvert neigeux, sont définis à partir des mesures terrain recueillies sur les sites test correspondant aux données SAR. Il s'agit d'un couvert de neige sèche, donc de teneur en eau liquide égale à 0%, dont l'épaisseur varie jusqu'à 2 m, avec une densité moyenne de  $0.35 \text{ g/cm}^3$  et de grains de diamètre égal à 1 mm environ.

La figure III-11 illustre le comportement en rétrodiffusion d'une surface modélisée par l'IEM pour les deux bandes de fréquence L et C, pour une hauteur rms, une longueur de corrélation et une constante diélectrique fixées.

Dans le cas d'un sol nu, en bande L, les coefficients de rétrodiffusion dans les canaux co-polaires sont dissociables alors qu'en bande C les deux coefficients  $\sigma_{hhhh}$  et  $\sigma_{vvvv}$  sont confondus.

De plus, il est à noter que le coefficient de rétrodiffusion augmente avec la rugosité du sol. Cette rugosité est caractérisée par l'écart type des pentes, défini en (III-69) au moyen de  $\sigma$  et  $L_c$ . Ainsi une augmentation de  $k\sigma$  ou une diminution  $kL_c$  engendre une augmentation de la rugosité et de ce fait du coefficient de rétrodiffusion.

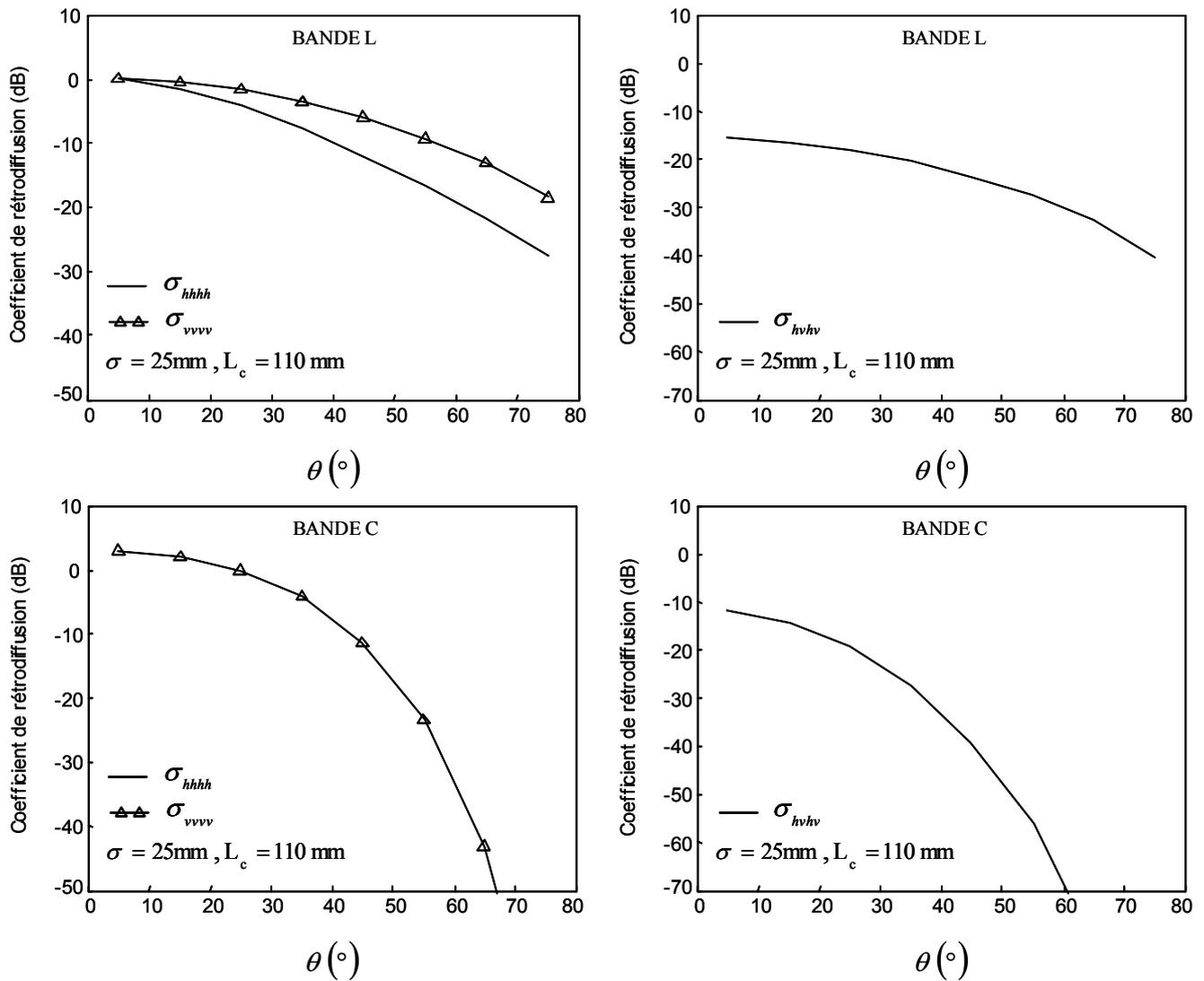


Figure III-11 Coefficient de rétrodiffusion dans le cas d'un sol nu en fonction de l'angle d'incidence pour une rugosité du sol fixée, en bandes L et C

La figure III-12 représente le coefficient de rétrodiffusion, dans le cas d'un sol couvert de neige, pour les mêmes valeurs fixes de  $\sigma$  et de  $L_c$ , dans les deux bandes de fréquence L et C. Le comportement en puissance en fonction de l'angle d'incidence est similaire au cas d'un sol nu.

Cependant, pour les deux bandes de fréquence, on observe que la présence de la neige sur le sol génère une augmentation du coefficient de rétrodiffusion par rapport à celui d'un sol nu. Cette augmentation est manifeste dans le cas de la bande C. De plus il apparaît qu'en bande C, les réponses des coefficients  $\sigma_{hhhh}$  et  $\sigma_{vvvv}$  tendent à devenir discernables.

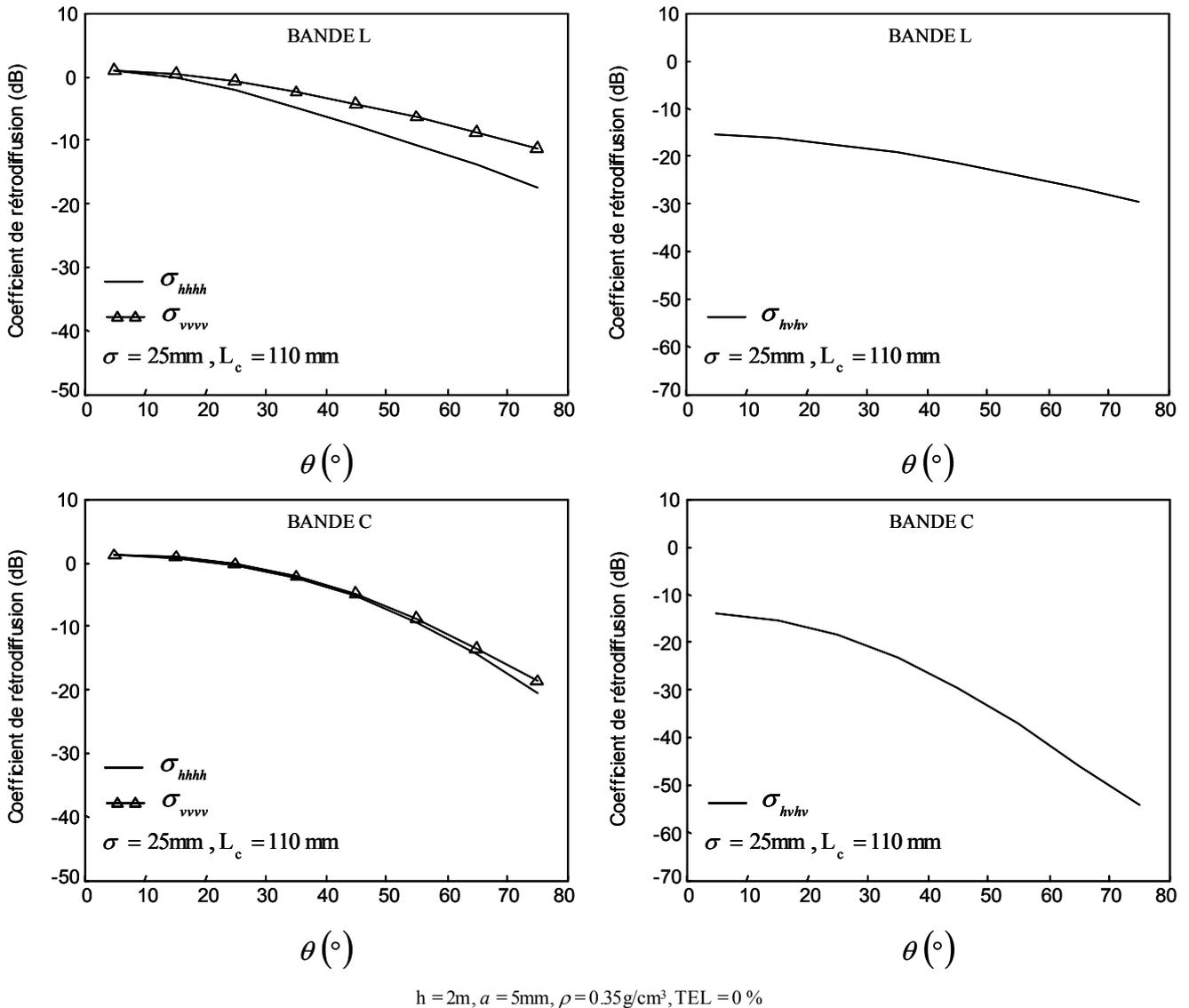


Figure III-12 Coefficient de rétrodiffusion dans le cas d'un sol recouvert de neige en fonction de l'angle d'incidence pour une rugosité du sol fixée, en bandes L et C

Les différences engendrées par le couvert neigeux sur la puissance rétrodiffusée sont dues à :

- une diminution de l'angle d'incidence au niveau de l'interface neige-sol causée par la réfraction de l'onde à l'interface air-neige, générant ainsi une augmentation de la réponse du sol,
- une diminution du contraste diélectrique  $\epsilon_r$ ,
- une augmentation du nombre d'onde  $k' = k_0 \sqrt{\epsilon_{neige}}$  dans le couvert neigeux générant une augmentation des paramètres de rugosité relatifs,  $k' \sigma$  et  $k' L_c$ .

La présence du couvert neigeux sur un sol a donc un effet non négligeable sur son comportement en rétrodiffusion.

On se propose maintenant d'étudier la réponse rétrodiffusée par un sol recouvert de neige pour différentes caractéristiques du couvert neigeux. Ainsi la figure III-13 illustre l'influence de la taille des particules, de la hauteur du couvert et de la densité sur la réponse rétrodiffusée par le sol pour les deux bandes L et C.

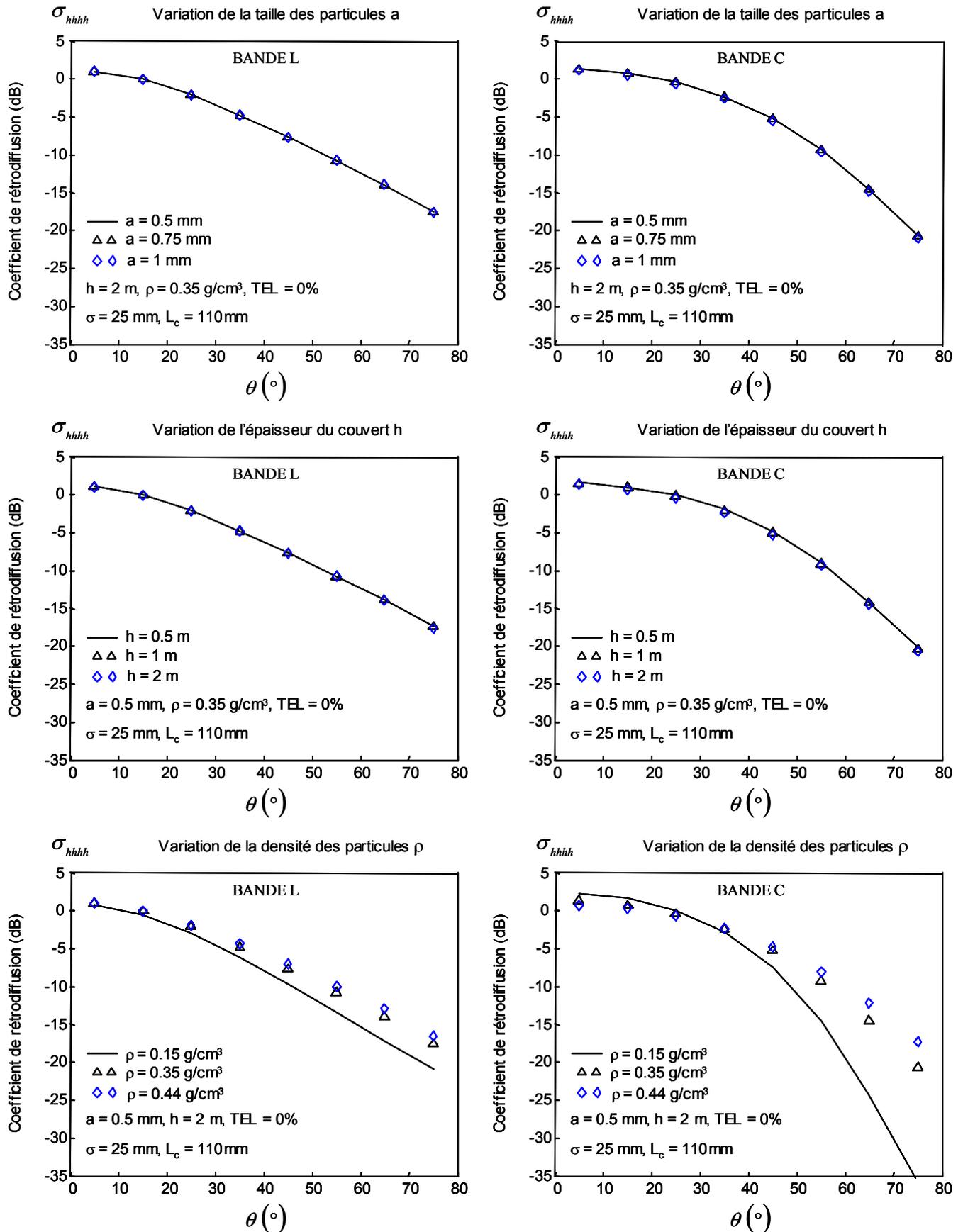


Figure III-13 Coefficient de rétrodiffusion du sol enneigé pour différentes configurations du couvert neigeux en fonction de l'angle d'incidence pour une rugosité du sol fixée, en bandes L et C

Il est clair que la taille des particules et la hauteur du couvert ne jouent pas un rôle significatif sur le coefficient de rétrodiffusion, contrairement à la densité des particules. En effet le coefficient de rétrodiffusion augmente avec la densité que ce soit en bande L ou C.

### III.4.1.2 Comportement polarimétrique

Le comportement polarimétrique dans les cas d'un sol nu et d'un sol recouvert de neige est maintenant étudié au moyen de l'indicateur  $\bar{\alpha}$  et de l'entropie H, présentés dans le premier chapitre. On rappelle que l'angle  $\bar{\alpha}$  varie de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  et est relié à la nature du mécanisme de diffusion. L'entropie H varie de 0 à 1 et est définie comme l'indicateur du caractère aléatoire du phénomène de diffusion.

Il est attendu que dans le cas d'une surface le paramètre  $\bar{\alpha}$  présente des valeurs faibles et varie typiquement de  $0^\circ$  à  $40^\circ$ . L'entropie, quant à elle, peut atteindre des valeurs allant jusqu'à 0.8 dans le cas de surfaces aléatoires.

La figure III-14 présente les variations de l'angle  $\bar{\alpha}$  et de l'entropie dans le cas d'un sol nu et d'un sol recouvert de neige dans la même configuration de rugosité utilisée précédemment, en bande de fréquence L.

Le paramètre  $\bar{\alpha}$  reste inférieur à  $45^\circ$  dans toutes les configurations présentées. En bande L, le paramètre  $\bar{\alpha}$  est plus fort pour les surfaces nues que pour les surfaces recouvertes de neige. En effet l'observation du coefficient de rétrodiffusion dans les canaux co-polaires indique que la différence entre  $\sigma_{hhhh}$  et  $\sigma_{vvvv}$  est plus grande dans le cas d'un sol nu que dans celui d'un sol recouvert de neige.

Au contraire en bande C, comme l'illustre la figure III-15, les valeurs de l'indicateur  $\bar{\alpha}$  pour des surfaces nues sont quasi nulles et inférieures à celles prises dans le cas d'un sol recouvert de neige. Ce phénomène s'explique par le comportement du coefficient de rétrodiffusion dans les canaux co-polaires. En effet les coefficients  $\sigma_{hhhh}$  et  $\sigma_{vvvv}$  prennent des valeurs très proches dans le cas d'un sol nu alors que ce n'est pas le cas pour un sol avec neige.

Les valeurs de l'entropie restent faibles montrant ainsi que la diffusion de surface est un mécanisme déterministe.

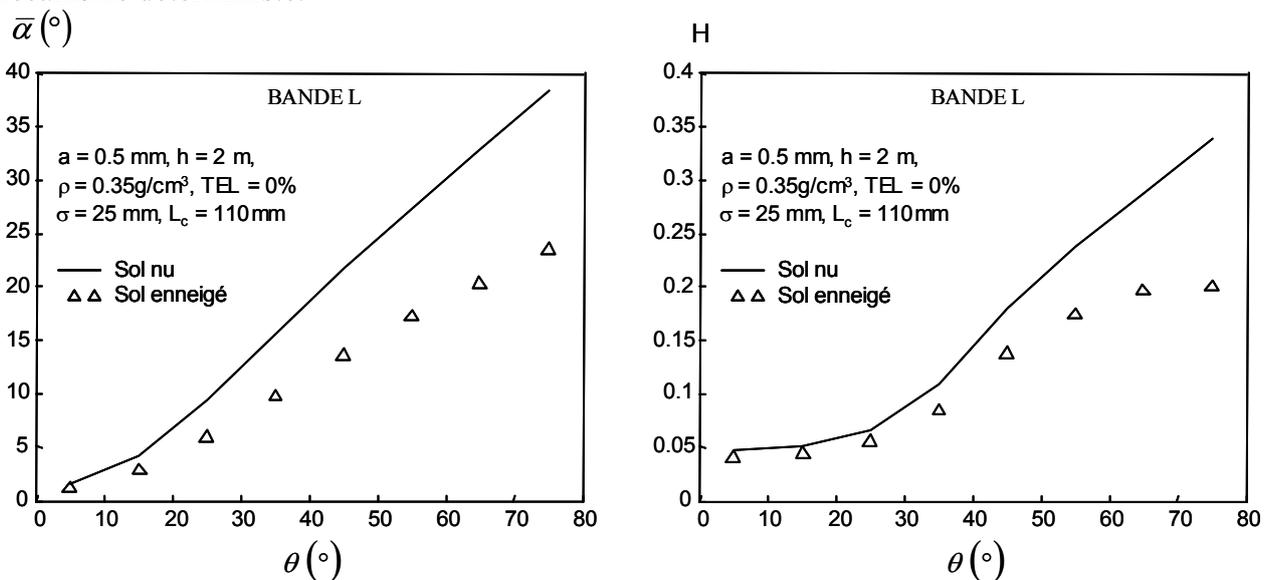


Figure III-14 Variations des paramètres polarimétriques H et  $\bar{\alpha}$  en fonction de l'angle d'incidence pour un sol nu et un même sol enneigé, en bande L

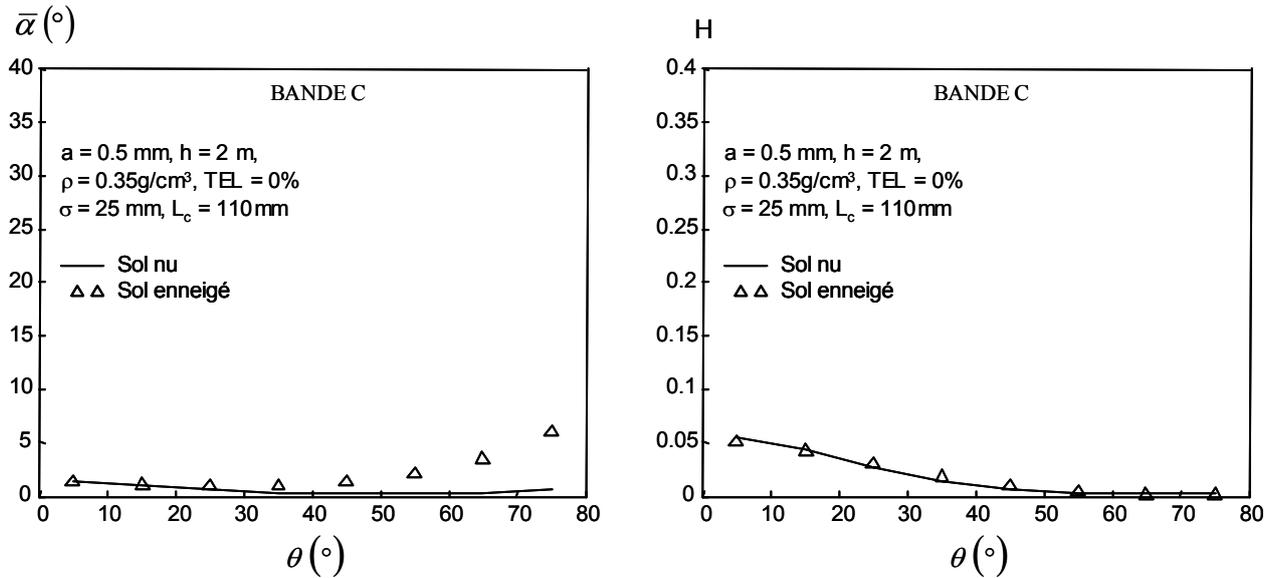


Figure III-15 Variations des paramètres polarimétriques  $H$  et  $\bar{\alpha}$  en fonction de l'angle d'incidence pour un sol nu et un même sol enneigé, en bande C

La figure III-16 illustre les variations du comportement polarimétrique, au moyen du paramètre  $\bar{\alpha}$ , d'un sol enneigé, dans différentes configurations du couvert de neige. Ces configurations correspondent à celles utilisées pour l'analyse du coefficient de rétrodiffusion présenté sur la figure III-13. Il est intéressant de noter l'invariance de l'angle  $\bar{\alpha}$  par rapport à la taille des particules et à la hauteur du couvert de neige, que ce soit en bande L ou C. Néanmoins le comportement angulaire du paramètre  $\bar{\alpha}$  varie avec la densité. En bande L les valeurs de  $\bar{\alpha}$  diminuent quand la densité augmente alors qu'en bande C l'effet inverse se produit. Ceci est en accord avec ce qu'il a été observé sur les figures III-14 et III-15.

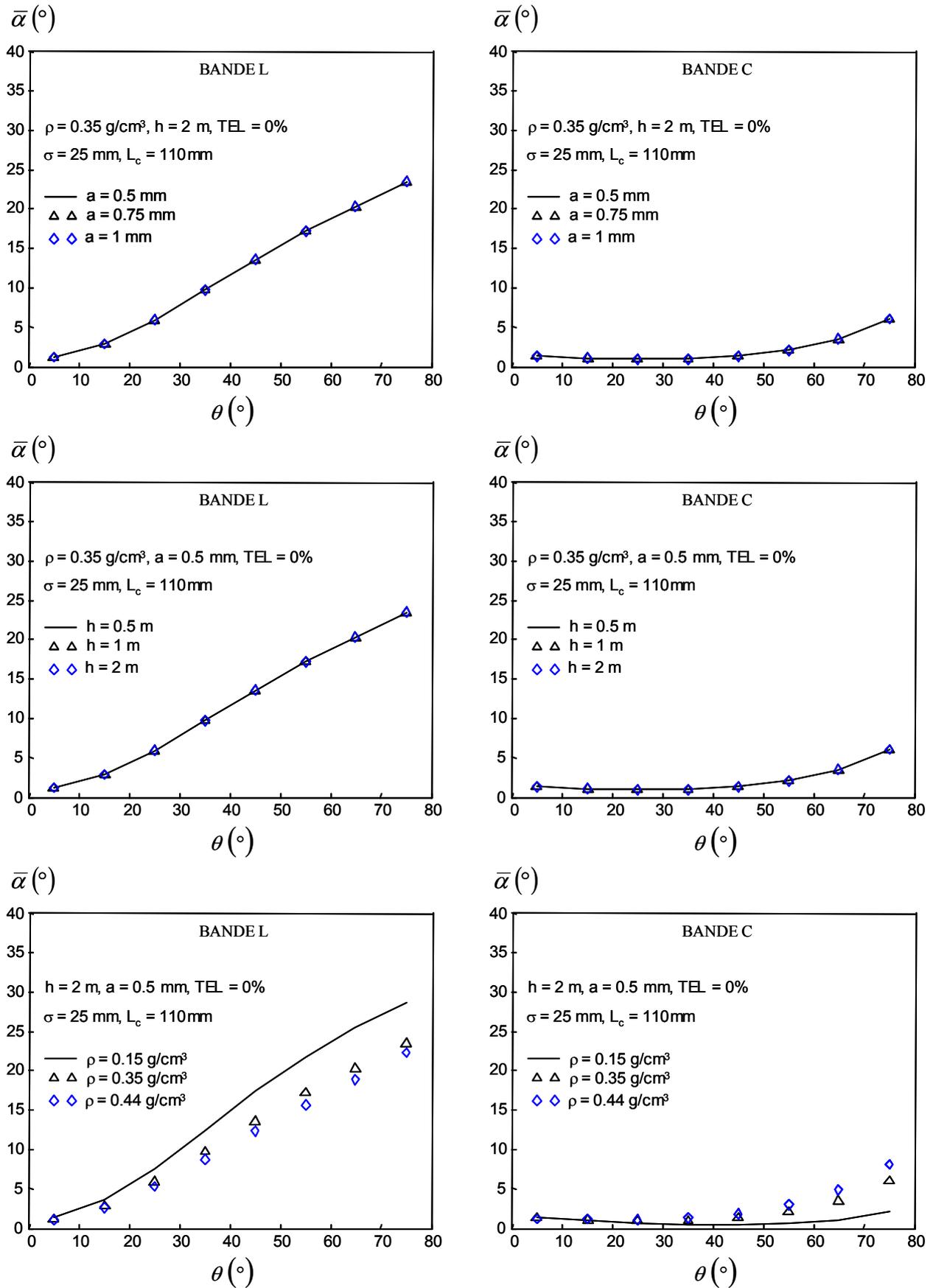


Figure III-16 Variations du paramètre polarimétrique  $\bar{\alpha}$  en fonction de l'angle d'incidence pour un sol enneigé dans différentes configurations du couvert, en bande L

### III.4.2 La rétrodiffusion de volume

#### III.4.2.1 Comportement en puissance

La matrice de phase pour des particules sphériques, définie en (III-38), est indépendante de la polarisation. De plus les termes co-polaires sont égaux dans le cas de la rétrodiffusion et valent 1. Il est alors attendu que dans ce cas là, l'angle  $\bar{\alpha}$  est nul quel que soit l'angle d'incidence. Néanmoins la prise en compte d'une matrice de transmission à l'interface air-neige, dont les éléments co-polaires sont différents l'un de l'autre et non nuls, implique des valeurs non nulles de  $\bar{\alpha}$ .

La réponse en puissance rétrodiffusée directement par les particules dépend de l'épaisseur du couvert neigeux, de sa densité, de la teneur en eau liquide mais aussi de la fréquence. Différentes configurations fonction de ces paramètres sont présentées dans cette partie.

La figure III-17 illustre l'influence de la taille des particules de glace sur le coefficient de rétrodiffusion volumique, en fonction de l'angle d'incidence. La réponse rétrodiffusée est d'autant plus grande que le rayon des particules est élevé. En effet le coefficient de diffusion  $\kappa_s$ , donné en (III-30), dépend d'un terme multiplicatif en  $a^6$  qui entraîne une augmentation de l'albédo. Le coefficient de diffusion subit une augmentation de 10 dB environ pour des tailles de particule allant de 0.5 mm à 1 mm.

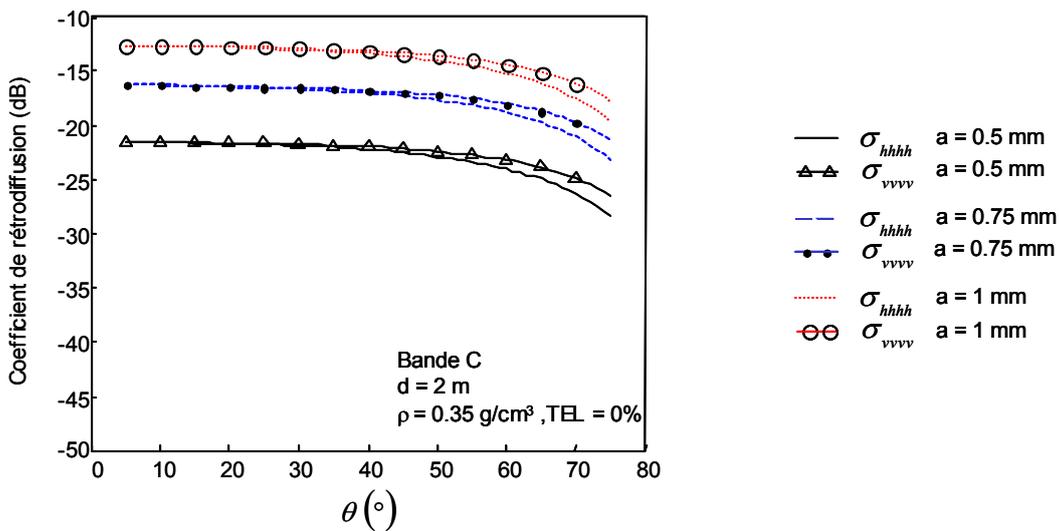


Figure III-17 Influence de la taille des particules sur le coefficient de rétrodiffusion volumique

Comme le montre la figure III-18, l'épaisseur du couvert influence naturellement la réponse rétrodiffusée. Cette dernière augmente proportionnellement à la hauteur du couvert. En effet, en conservant la même densité volumique pour une couche plus épaisse le nombre de particules, qui participent à la diffusion, s'accroît. La puissance rétrodiffusée augmente d'environ 8 dB pour une épaisseur de 0.5 m à 2 m.

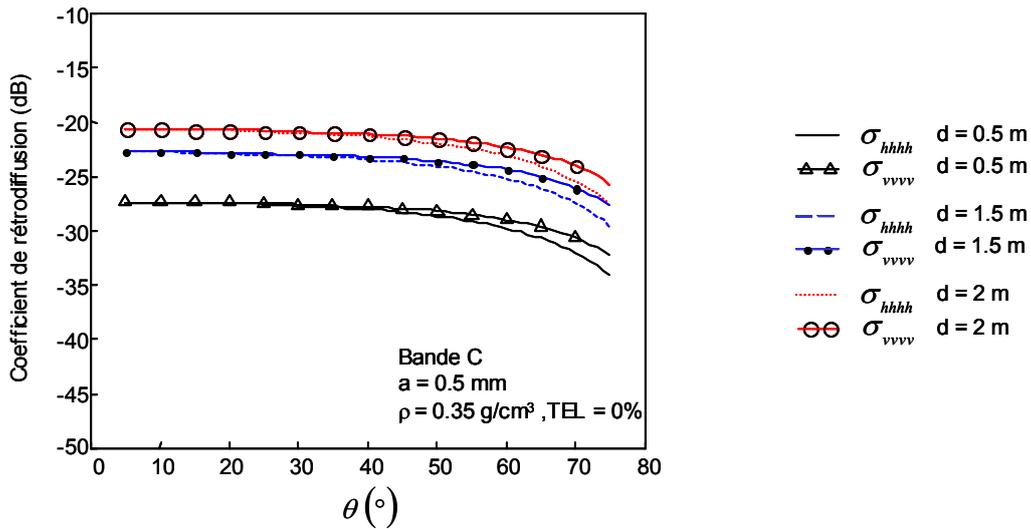


Figure III-18 Influence de l'épaisseur du couvert neigeux sur le coefficient de rétrodiffusion volumique

De même il est observable sur la figure III-19, que le coefficient de rétrodiffusion volumique évolue avec la densité des particules. En effet la diffusion des particules est d'autant plus importante que leur nombre est élevé. Le coefficient de diffusion s'accroît d'environ 4 dB pour une densité variant de  $0.15 \text{ g/cm}^3$  à  $0.44 \text{ g/cm}^3$ .

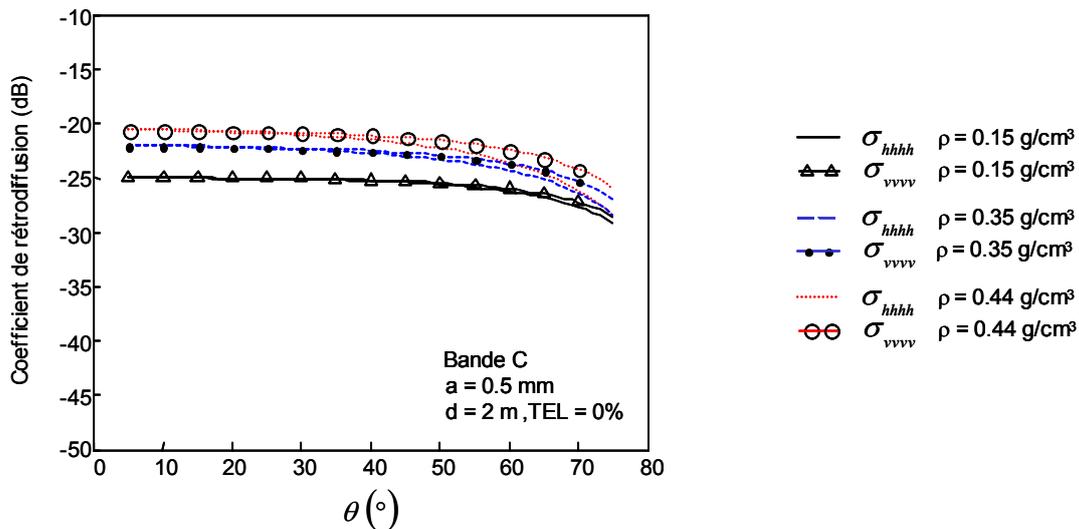


Figure III-19 Influence de la densité des particules sur le coefficient de rétrodiffusion volumique

La présence de 2% d'eau liquide dans la couche de neige génère une chute de 20 dB du coefficient de rétrodiffusion volumique, comme représenté sur la figure III-20. Cette décroissance est due à l'augmentation du coefficient d'absorption  $\kappa_a$  qui est fonction de la partie imaginaire de la constante diélectrique. Or, dans le cas de neige humide la partie imaginaire de la constante diélectrique n'est plus négligeable devant la partie réelle et augmente fortement avec la teneur en eau liquide.

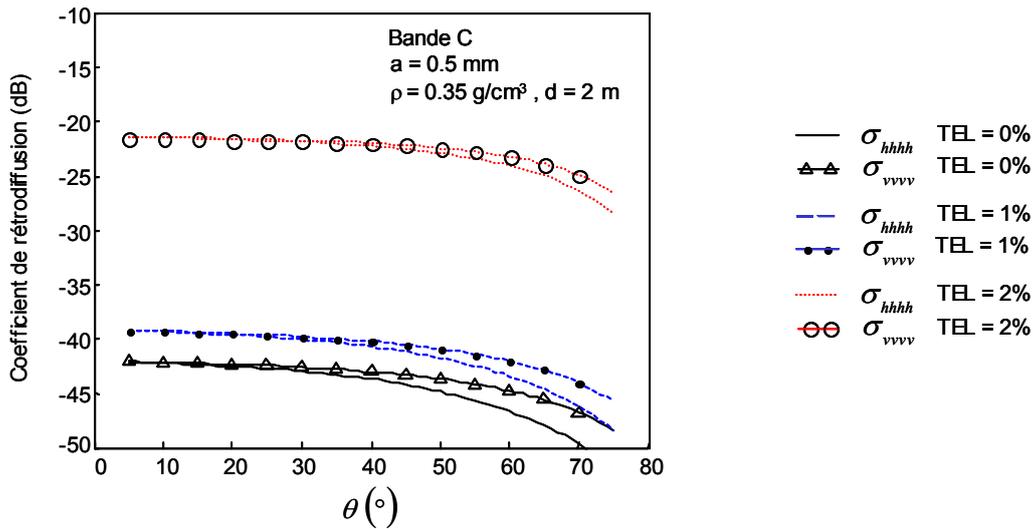


Figure III-20 Influence de la teneur en eau liquide sur le coefficient de rétrodiffusion volumique

Les effets de la fréquence sur le coefficient de rétrodiffusion sont présentés sur la figure III-21. La fréquence n'intervient pas, dans le cas de la neige sèche, sur la constante diélectrique du milieu. Elle influence uniquement sur l'expression de l'albédo, par modification du nombre d'onde dans le milieu. En bande L, le coefficient de rétrodiffusion est très faible, inférieur à  $-45 \text{ dB}$ . En bande C le coefficient de rétrodiffusion voit sa valeur s'accroître de plus de  $20 \text{ dB}$ , passant ainsi à des valeurs d'environ  $-20 \text{ dB}$

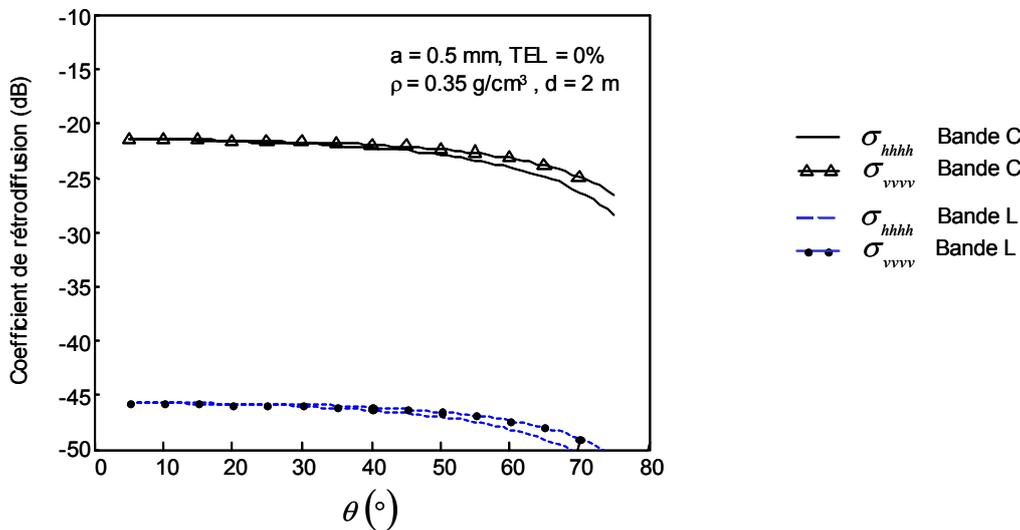


Figure III-21 Influence de la fréquence sur le coefficient de rétrodiffusion volumique

### III.4.2.2 Comportement polarimétrique

Le comportement polarimétrique des particules sphériques dépend des composantes de la matrice de phase. En rétrodiffusion, la formulation de cette matrice donnée en (III-40) montre que les éléments co-polaires sont égaux quel que soit l'angle d'incidence. Les variations de l'angle  $\bar{\alpha}$  sont alors engendrées uniquement par la matrice de transmission à l'interface air-neige, qui modifie les caractéristiques polarimétriques de l'onde incidente.

Le paramètre  $\bar{\alpha}$  étant indépendant de la puissance, son comportement reste invariant quelle que soit la fréquence, la hauteur du couvert, la taille des particules ou même la teneur en eau liquide, contrairement à la réponse en puissance du coefficient de rétrodiffusion.

L'angle  $\bar{\alpha}$  ne dépend alors que de l'angle d'incidence.

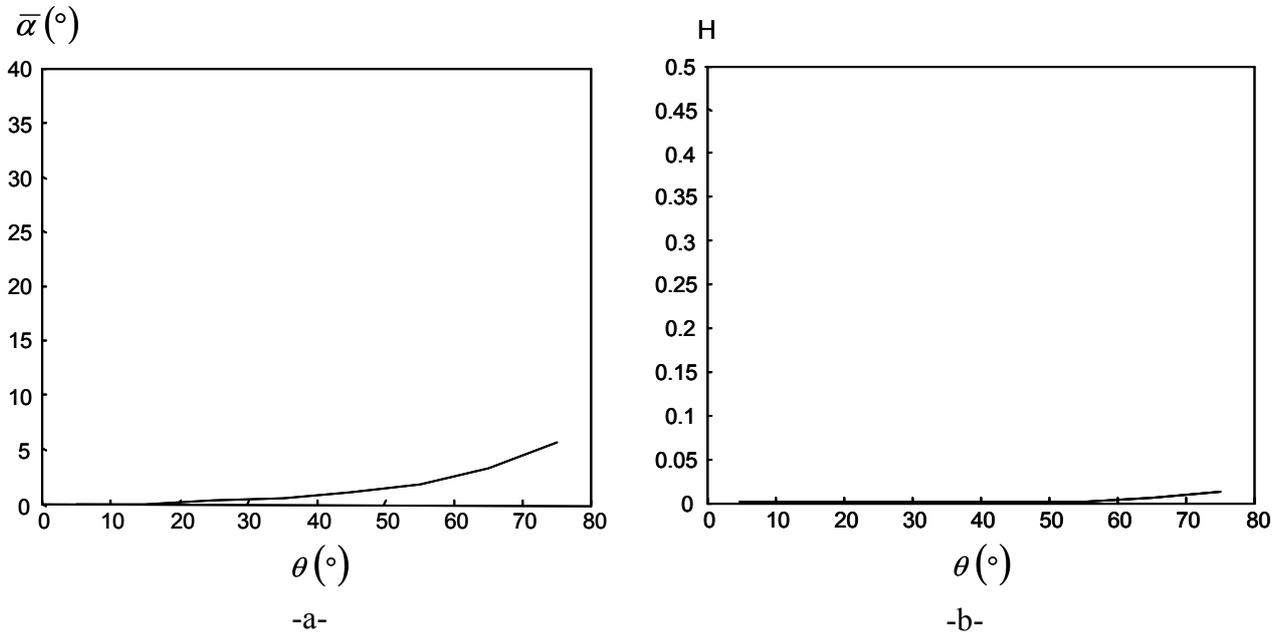


Figure III-22 Variations en fonction de l'angle d'incidence de : -a- l'angle  $\bar{\alpha}$  et -b- de l'entropie pour le mécanisme de diffusion de volume

### III.4.3 Le mécanisme de double rebond

Du fait de la complexité du modèle de l'équation intégrale (IEM) en bistatique, l'approximation scalaire du modèle de Kirchhoff est utilisée pour modéliser le sol dans le cas de ce mécanisme. De plus les paramètres de rugosité du sol, l'écart type des hauteurs et la longueur de corrélation, sont revus afin de pouvoir respecter le domaine de validité imposé par ce modèle.

#### III.4.3.1 Comportement en puissance

Le mécanisme de double rebond combine deux mécanismes complémentaires : la diffusion du sol vers les particules et celle des particules vers le sol. La figure III-23 représente les variations des coefficients de rétrodiffusion  $\sigma_{hhhh}$  et  $\sigma_{vvvv}$  en fonction de l'angle d'incidence, des deux composantes formant le mécanisme de double rebond, dans les bandes de fréquence L et C.

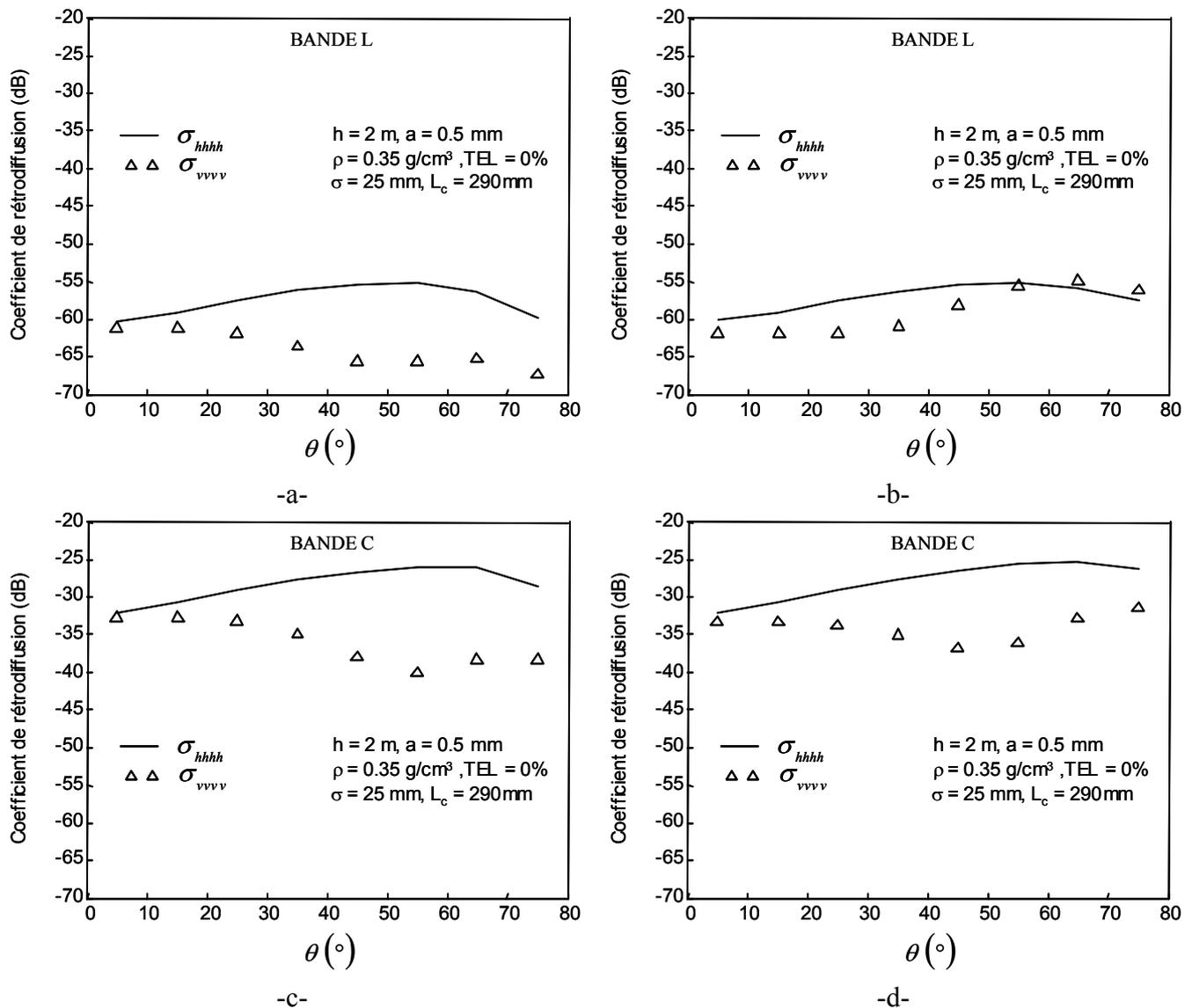


Figure III-23 Coefficient de rétrodiffusion du mécanisme de double rebond en fonction de l'angle d'incidence

-a- et -c- mécanisme sol-particule respectivement en bande L et C,

-b- et -d- mécanisme particule-sol respectivement en bande L et C

En bande L, les composantes de diffusion du sol vers les particules et des particules vers le sol présentent de très faibles valeurs des coefficients de rétrodiffusion  $\sigma_{hhhh}$  et  $\sigma_{vvvv}$ , variant de  $-70\text{dB}$  à  $-55\text{ dB}$ . En bande C ces coefficients subissent une augmentation de  $+30\text{dB}$ , variant désormais de  $-40\text{ dB}$  à  $-25\text{ dB}$ . Ce comportement en puissance peut être comparé à celui observé dans le cas de la diffusion de volume où il a été montré que la diffusion des particules est très sensible à la fréquence, avec un couvert de neige ayant les mêmes caractéristiques en hauteur, densité, teneur en eau liquide et taille des particules.

### III.4.3.2 Comportement polarimétrique

La figure III-24 représente les variations des paramètres polarimétriques  $H$  et  $\bar{\alpha}$  associées aux deux composantes de diffusion du double rebond de la figure III-23, en bandes L et C.

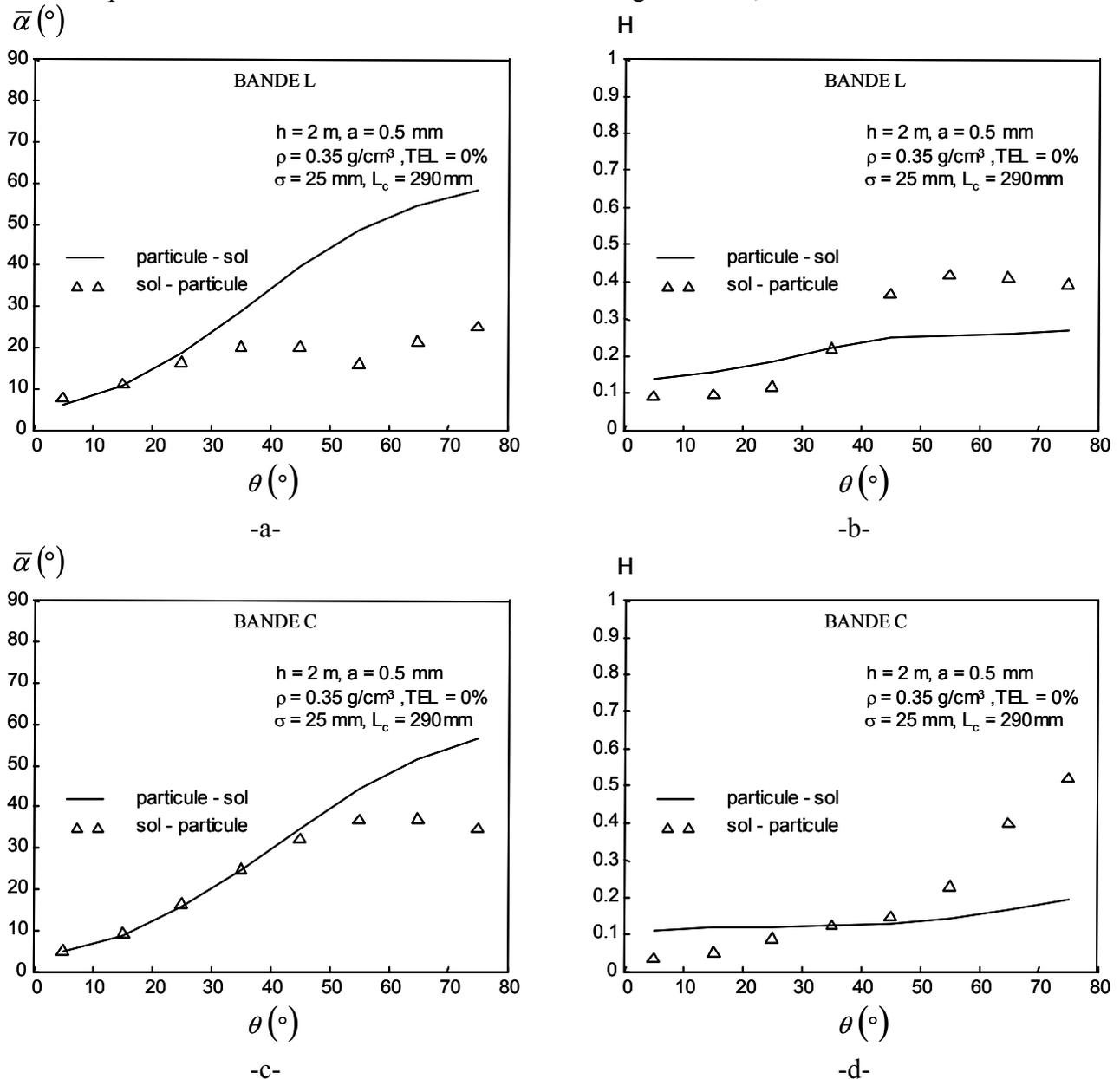


Figure III-24 Variations des paramètres polarimétriques pour le mécanisme de double rebond en fonction de l'angle d'incidence; -a- et -c- l'angle  $\bar{\alpha}$  respectivement en bande L et C,

-b- et -d- l'entropie  $H$  respectivement en bande L et C,

L'angle  $\bar{\alpha}$  atteint des valeurs allant jusqu'à  $60^\circ$  indiquant des mécanismes de diffusion de double réflexion. En bande L, l'angle  $\bar{\alpha}$  de la composante de diffusion sol-particule n'augmente pas en fonction de l'angle d'incidence contrairement à la composante de diffusion particule-sol. Une diminution aux alentours de  $50^\circ$  est observable, qui peut être due au comportement spécifique du coefficient de diffusion  $\sigma_{\text{vvvv}}$ .

### III.4.4 La rétrodiffusion totale d'un couvert neigeux

Les analyses de chaque mécanisme de diffusion faites précédemment sont maintenant employées pour l'étude du phénomène global de diffusion.

#### III.4.4.1 Comportement en puissance

Les figures III-25 et III-26 illustrent le comportement en puissance du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma_{hhh}$  pour chaque mécanisme de diffusion ainsi que pour la rétrodiffusion globale d'un sol recouvert de neige. En bande L, les mécanismes de diffusion de volume et de double rebond sont négligeables devant la rétrodiffusion du sol enneigé, quel que soit l'angle d'incidence. En effet à cette fréquence l'onde pénètre profondément dans le milieu, ce qui peut s'expliquer par la grande valeur de la longueur d'onde,  $\lambda_L = 30$  cm, devant la taille des particules. Ainsi le mécanisme de diffusion total suit le comportement du mécanisme dominant, la rétrodiffusion du sol enneigé.

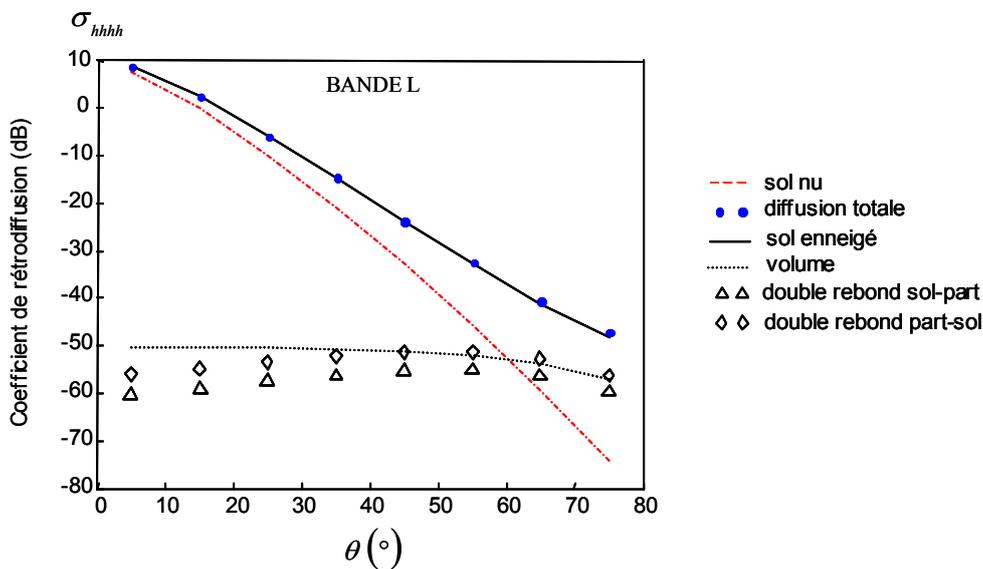


Figure III-25 Variations du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence pour chaque mécanisme de diffusion et pour la rétrodiffusion totale, en bande L

En bande C, les diffusions de volume et de double rebond ne sont plus négligeables, comme cela a déjà été expliqué. Néanmoins la rétrodiffusion du sol enneigé reste supérieure pour des angles d'incidence inférieurs à 35°. A partir de cet angle les mécanismes de diffusion de volume et de double rebond deviennent dominants. Ainsi en bande C, la rétrodiffusion d'un sol couvert de neige a une réponse de diffusion de surface pour des angles d'incidence inférieurs à 35° et une réponse de diffusion de volume pour des angles supérieurs à 35°. Ces résultats sont cohérents avec les remarques faites dans la littérature [Bernier 95] [Shi 93] [Floricioiu 97].

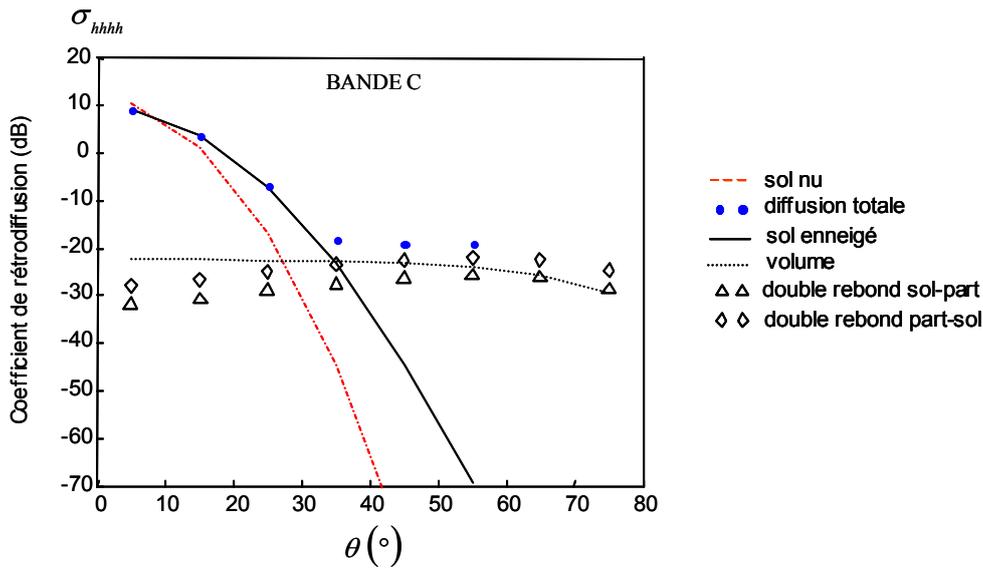


Figure III-26 Variations du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence pour chaque mécanisme de diffusion et pour la rétrodiffusion totale, en bande C

### III.4.4.2 Comportement polarimétrique

La compréhension du comportement polarimétrique global nécessite de connaître les comportements associés à chaque mécanisme ainsi que la puissance relative de ces mécanismes dans le phénomène de diffusion total.

En bande L, bien que le mécanisme de double rebond présente de fortes valeurs de  $H$  et  $\bar{\alpha}$ , sa puissance relative dans le mécanisme global de rétrodiffusion est négligeable et donc n'influe quasiment pas les variations des paramètres  $H$  et  $\bar{\alpha}$  globaux. Ces variations angulaires ont alors un comportement similaire à celui de la rétrodiffusion du sol enneigé puisqu'il s'agit du mécanisme dominant quel que soit l'angle d'incidence.

Il faut noter de plus que ces valeurs restent inférieures à celles d'un sol nu,  $\bar{\alpha}$  reste inférieur à  $10^\circ$  et l'entropie inférieure à 0.1.

En bande C, pour des angles supérieurs à  $35^\circ$  il a été montré que le double rebond n'est plus négligeable dans la rétrodiffusion totale. Les variations de l'angle  $\bar{\alpha}$  et de l'entropie traduisent tout à fait ce phénomène puisqu'ils changent de comportement pour des angles supérieurs à  $35^\circ$ , passant de très faibles valeurs, de l'ordre de  $1^\circ$  pour  $\bar{\alpha}$  et de 0.01 pour  $H$ , à des valeurs supérieures à  $10^\circ$  pour  $\bar{\alpha}$  et supérieures à 0.2 pour l'entropie  $H$ .

De plus un point important est à noter. A cette fréquence les variations de  $\bar{\alpha}$  et de  $H$  pour le mécanisme de diffusion global sont supérieures à celles d'un sol nu quel que soit l'angle d'incidence, contrairement à ce qui a été observé en bande L.

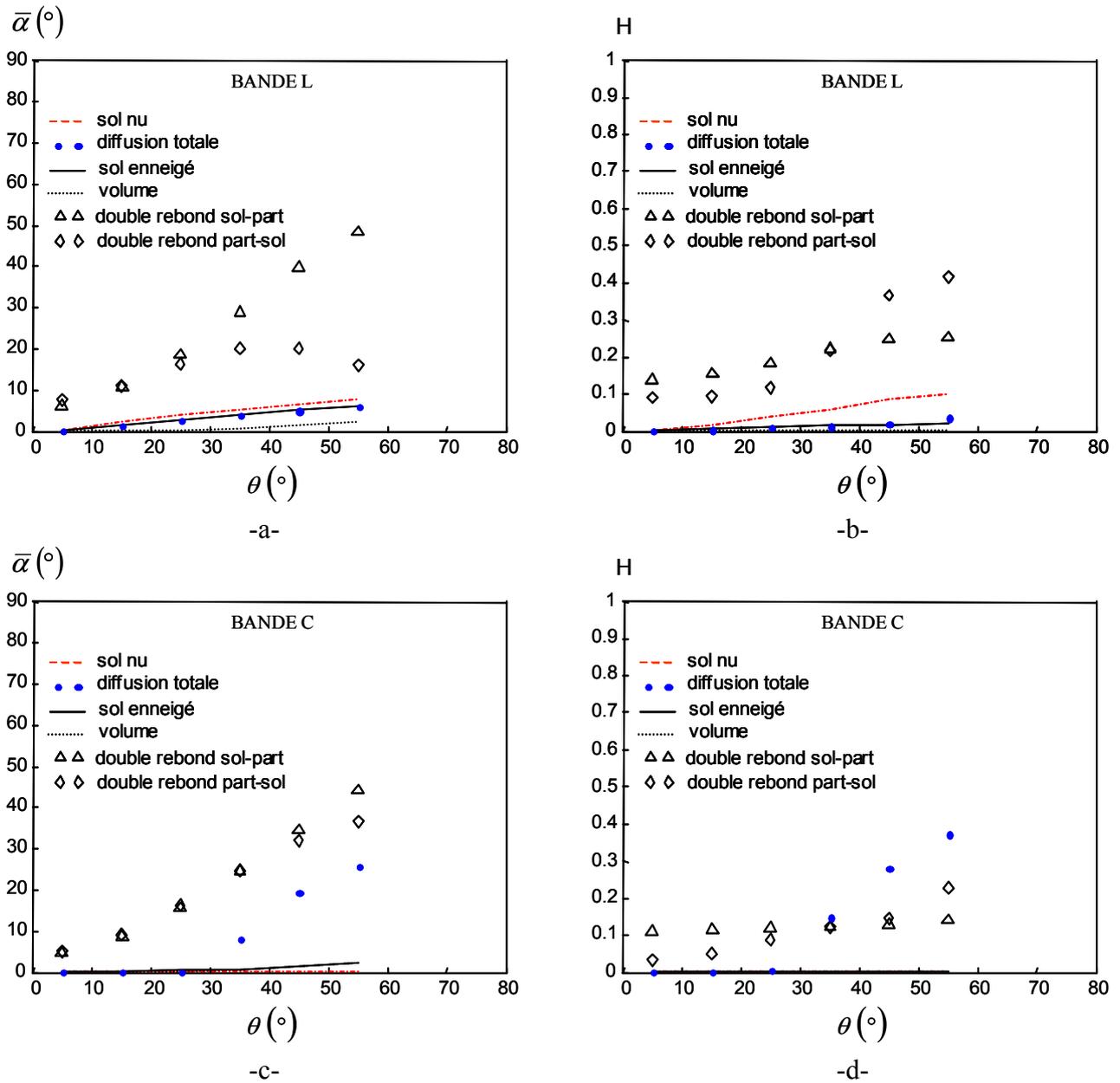


Figure III-27 Variations des paramètres polarimétriques en fonction de l'angle d'incidence pour chaque mécanisme de diffusion et pour la rétrodiffusion totale

-a- et -c- angle  $\bar{\alpha}$  et -b- et -d- entropie

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre une méthode de modélisation de la réponse électromagnétique d'un couvert neigeux est présentée.

La modélisation d'un milieu nécessite la connaissance de ses paramètres caractéristiques afin de créer un modèle aussi réaliste que possible. Dans ce but, la première partie de ce chapitre détaille les caractéristiques physiques de la neige. Les propriétés physiques de ce milieu dépendent des trois composantes qui le constituent et qui sont l'air, la glace et l'eau liquide. La proportion, la répartition et la forme géométrique de ces éléments jouent un rôle essentiel et interviennent dans la définition

des descripteurs tels que la densité, la teneur en eau liquide et la constante diélectrique. Les relations nécessaires à la prise en compte de ces paramètres dans la modélisation sont présentées et commentées.

La deuxième partie de ce chapitre présente la théorie du transfert radiatif vectoriel, méthode généralement utilisée pour la modélisation des milieux volumiques et sur laquelle se base le modèle de diffusion d'un couvert neigeux proposé. Ce modèle s'appuie sur la résolution analytique d'une équation vectorielle qui permet de mettre en évidence les différents mécanismes de diffusion. Certaines hypothèses, telles que la prise en compte de l'interface air-neige au moyen d'une matrice de transmission uniquement et la forme sphérique des particules, sont faites et permettent de simplifier la résolution. Néanmoins l'interface neige-sol est considérée comme rugueuse impliquant une résolution semi-analytique. Les mécanismes de diffusion qui découlent de la résolution de l'équation du transfert radiatif sont :

- la rétrodiffusion de l'interface neige-sol,
- la rétrodiffusion des particules de glace,
- la réflexion du sol vers les particules diffusant dans la direction d'observation,
- la réflexion du sol vers les particules qui rétro-diffusent et réflexion du sol dans la direction d'observation.

Chaque mécanisme est détaillé au moyen des variables qui le constituent, ces dernières étant fonction des paramètres caractéristiques et des propriétés physiques du milieu modélisé. Ainsi dans le cas de la neige et pour certaines fréquences, la diffusion de volume se modélise sous l'approximation de Rayleigh. La nature diélectrique du couvert neigeux s'exprime dans le coefficient d'extinction qui est défini à partir de la constante diélectrique et de la densité du volume.

Quelques bases relatives à la modélisation d'un sol rugueux, utilisées pour tenir compte de l'interface neige-sol sont présentées. Deux modèles sont proposés, l'IEM (Integral Equation Method) qui est utilisé dans le cas de la rétrodiffusion du sol et le modèle de Kirchhoff dans le cas bistatique pour lequel le sol diffuse vers les particules et inversement.

La troisième partie de ce chapitre est dédiée à la caractérisation polarimétrique du modèle électromagnétique d'un couvert neigeux. Dans un premier temps, dans le but d'évaluer l'importance de chacun des mécanismes de diffusion dans le phénomène global de rétrodiffusion, une analyse en puissance est menée en fonction de paramètres pertinents tels que l'angle d'incidence, la fréquence d'observation, l'épaisseur du couvert neigeux, la taille des particules et leur densité. Il est ainsi montré que parmi ces paramètres la fréquence est celui qui a le plus d'influence. En effet en bande L, le mécanisme dominant est la rétrodiffusion de surface générée par l'interface neige-sol, alors qu'en bande C les mécanismes de diffusion de volume et de double rebond ne peuvent plus être négligés pour des angles d'incidences élevés.

Dans un second temps la nature de ces mécanismes de diffusion ainsi que leur caractère aléatoire sont analysés au moyen des descripteurs polarimétriques  $\bar{\alpha}$  et H.

Cette étude polarimétrique jointe à l'analyse en puissance des mécanismes de diffusion permet une compréhension et une interprétation accrue de la nature du phénomène globale de rétrodiffusion. Les faibles valeurs du paramètre  $\bar{\alpha}$  pour le mécanisme de rétrodiffusion global observées en bande L, indiquent bien la prépondérance du mécanisme de rétrodiffusion de surface engendré par l'interface neige-sol. Une nette augmentation de ce paramètre en bande C pour des

valeurs de l'angle d'incidence supérieures à 35° montre la prédominance des mécanismes liés à la diffusion des particules.

Le tableau III-2 donne une synthèse des résultats de simulation obtenus par le modèle de diffusion d'un couvert neigeux reposant sur un sol rugueux.

Cette analyse du comportement polarimétrique d'un couvert neigeux au moyen d'un modèle de diffusion électromagnétique est exploitée dans la suite lors d'une étude polarimétrique de données SAR ayant pour but d'élaborer une cartographie de la neige en milieu alpin.

	<b>Bande L</b>	<b>Bande C</b>
Rétrodiffusion de surface	Mécanisme dominant	Mécanisme dominant pour $\theta < 35^\circ$
Diffusion des particules	Mécanisme négligeable	Mécanisme dominant pour $\theta > 35^\circ$

*Tableau III-2 Synthèse des résultats de simulation obtenus avec le modèle de diffusion*



# CHAPITRE IV.

## CARTOGRAPHIE DE LA NEIGE SECHE

---

### IV.1 Introduction

La discrimination de la neige sèche en milieux alpins est une application complexe car elle nécessite une étude polarimétrique polyvalente, due à la grande diversité des environnements naturels sous jacents allant des sols nus aux forêts en passant par des zones minérales. Les propriétés polarimétriques des sols sont très différentes de celles des forêts, il faut donc adapter l'étude suivant la nature du milieu sous jacent. Pour cela, une analyse préalable des données en saison automnale, sans neige, est indispensable. En effet il est utile dans une première approche de pouvoir distinguer les zones de sols nus des zones de forêts. Une fois cette discrimination effectuée, il est alors plus aisé d'observer et de mettre en évidence les variations du comportement polarimétrique engendrées par la neige.

La première partie de ce chapitre est consacrée aux pré-traitements polarimétriques appliqués sur les données SAR SIR-C. En effet l'opération de sommation cohérente des signaux émis lors de l'acquisition des données entraîne l'apparition d'un bruit multiplicatif, qui se traduit par des granulations de l'image. Ce phénomène nécessite la mise en place de procédures de filtrage afin de faciliter la lisibilité des données et l'interprétation du phénomène de rétrodiffusion.

Dans un premier paragraphe, deux techniques de filtrage des données SAR sont présentées. La première est un traitement de moyennage multi-vues, reposant sur la somme incohérente de  $L$  réalisations indépendantes d'une image SAR. La seconde présente une procédure de filtrage dont l'objectif est de réduire le speckle tout en conservant la résolution spatiale. Le filtre adaptatif employé pour le pré-traitement a été développé par J. S. Lee [Lee 99]. Il a l'avantage de respecter les propriétés statistiques locales de l'image.

Dans un second paragraphe, une méthode de regroupement des pixels selon leurs propriétés polarimétriques est exposée. Cette méthode, communément appelée "clustering" en anglais, est utilisée dans le but d'homogénéiser les régions de l'image, qui même après filtrage présentent une distribution des paramètres polarimétriques chaotique. La procédure de "clustering" repose sur une classification utilisant la densité de probabilité multi-variée de Wishart.

La deuxième partie de ce chapitre propose des analyses statistiques des paramètres polarimétriques  $H$  et  $\bar{\alpha}$  afin d'évaluer leur pouvoir de discrimination de la neige. Une interprétation des mécanismes de diffusion est donnée en fonction de leur localisation dans le plan  $H - \bar{\alpha}$ . La neige sèche étant un milieu qui affecte différemment la réponse rétrodiffusée du milieu sous jacent

selon la fréquence d'observation, une étude comportementale des données est menée pour observer les variations fréquentielles de ces paramètres polarimétriques. La présence de neige est aussi analysée au moyen d'un examen de leurs variations temporelles. Ces variations sont évaluées pour les deux principaux milieux naturels constituant les sites d'étude que sont les surfaces et les forêts.

Une approche multi-temporelle et multi-fréquentielle est développée dans la troisième partie pour élaborer une méthode de cartographie séquentielle. Dans un premier temps, des procédures de détection des milieux sous jacents sont élaborées à partir des données en bande L. Chaque procédure est adaptée au milieu naturel à détecter, sol nu ou forêt. Ainsi une première méthode, basée sur la décomposition polarimétrique de Freeman, est utilisée pour localiser les forêts. Ces régions sont des milieux dont la réponse est fortement aléatoire, impliquant des valeurs très élevées de l'entropie. Une seconde technique de repérage de ces zones se basant sur l'entropie et l'anisotropie est alors présentée. La détection des surfaces est pratiquée à partir d'une analyse des mécanismes de diffusion dominants. Finalement des méthodes appropriées aux milieux naturels sous jacents sont proposées pour discriminer séparément la présence d'un couvert neigeux sur chacun d'eux à partir des données en bande C. Les variations temporelles du paramètre polarimétrique  $\bar{\alpha}$  sont utilisées sur les régions forestières. Les régions de surface sont traitées au moyen d'une méthode d'optimisation du contraste polarimétrique. Au vu des limitations d'une telle approche, une procédure d'amélioration de la variation du contraste polarimétrique (Polarimetric Contrast Variation Enhancement - PCVE) est proposée [Martini 05].

Une quatrième partie expose une approche multi-temporelle et mono-fréquentielle en bande C dans le but d'adapter les procédures de cartographie de la neige aux contraintes actuelles des nouveaux capteurs SAR, tels que RADARSAT-2, qui travaillent sur une seule bande de fréquence. Les procédures de détection des surfaces et des forêts développées dans la partie précédente sont appliquées aux données en bande C afin d'estimer leur validité. L'étude à cette fréquence rend compte d'une modification de la réponse rétrodiffusée sur certaines zones, engendrant la création d'une nouvelle classe correspondant aux régions de surfaces recouvertes de petites végétations. Des procédures de discrimination de ces trois classes, adaptées à la bande C, sont alors proposées.

Finalement, la validité de ces méthodes de cartographie de la neige est estimée dans la dernière partie. Un jeu de zones de référence, correspondant aux quatre classes forêts, surfaces, forêts enneigées et surfaces enneigées, est sélectionné à partir des images optiques Landsat projetées dans le plan d'incidence oblique radar. Ces zones sont ensuite comparées aux résultats obtenus par cartographie.

## **IV.2 Pré-traitement des données SAR polarimétriques**

L'utilisation des propriétés polarimétriques pour la télédétection de la neige nécessite la mise en place de procédures de pré-traitement visant à conditionner l'information polarimétrique sous une forme appropriée à l'extraction de paramètres pertinents et fiables.

Le signal SAR mesuré sur des scènes naturelles possède une nature aléatoire qu'il est important de prendre en compte au moyen de procédures de filtrage. Les scènes alpines étant généralement composées de milieux naturels très différents avec une répartition géographique irrégulière, il apparaît important de segmenter une image SAR en un ensemble de cliques, appelés "clusters"

contenant des pixels dont les propriétés de rétrodiffusion polarimétriques sont similaires. Cette phase nécessaire du traitement permet une manipulation aisée ainsi que des possibilités d'interprétation accrues.

La figure IV-1 présente les différentes étapes du pré-traitement polarimétrique appliqué sur les données SAR SIR-C utilisées lors de cette étude.

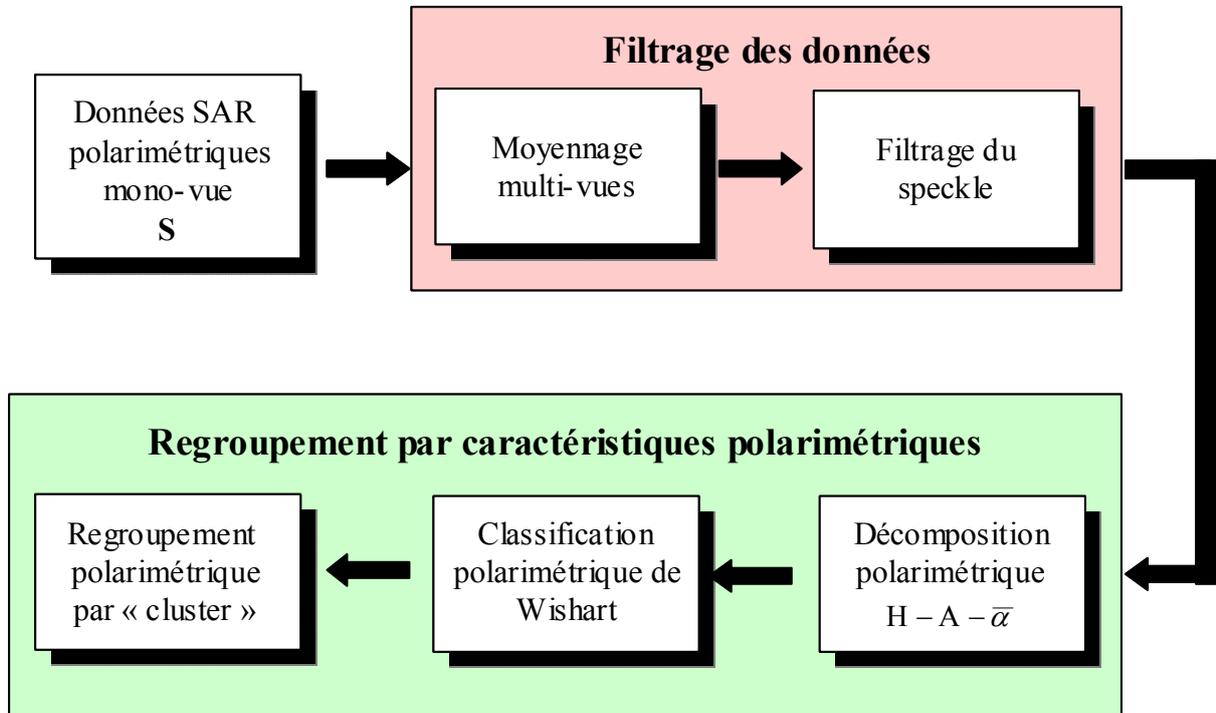


Figure IV-1 Algorithme de pré-traitement polarimétrique des données SAR

L'algorithme de la figure IV-1 représente la chaîne de traitements des données SIR-C. Le premier bloc de traitement de la figure concerne la mise en forme et le filtrage incohérent du speckle, bruit multiplicatif caractéristique des données SAR. Les données filtrées sont ensuite analysées au moyen d'un théorème de décomposition polarimétrique qui permet d'obtenir un ensemble de paramètres caractéristiques des propriétés bio- et géo-physiques du milieu. Ces paramètres ainsi que des lois statistiques multi-variables de représentations polarimétriques matricielles d'ordre deux sont utilisés pour segmenter une image en un jeu de classes regroupant des pixels au comportement polarimétrique similaire. Ces mêmes classes peuvent elles aussi être découpées en un ensemble de clusters associant des points qui appartiennent à la même classe et qui sont connexes.

### IV.2.1 Filtrage des données

Les images SAR sont, de par le principe de mesure, affectées par un bruit multiplicatif, qui provient de la recombinaison cohérente des ondes électromagnétiques rétrodiffusées au sein de chaque cellule de résolution. Ce phénomène, appelé speckle en terme anglo-saxon, confère aux images un aspect granulaire avec des variations spatiales aléatoires. Les données utilisées dans ce chapitre sont préalablement filtrées dans le but d'améliorer la qualité des images et de ce fait la

lisibilité des résultats. Ce pré-traitement permet de développer de meilleures interprétations et analyses du phénomène de diffusion.

#### IV.2.1.1 Moyennage multi-vues

Le principe d'un traitement multi-vues repose sur la somme incohérente de  $L$  réalisations indépendantes d'une image SAR ayant pour but de diminuer la variance des réflectivités affectées par le speckle. Des réalisations indépendantes d'une image sont obtenues en découpant une image en azimuth en plusieurs images à résolution réduite et correspondant à des supports spectraux distincts. En pratique, une opération quasi-équivalente dans le domaine spatial d'origine est réalisée en sommant les lignes en azimuth par groupes de  $L$  unités. L'image résultante possède  $L$  fois moins de lignes en azimuth et une résolution multipliée par  $L$  dans cette direction.

Pour des images SAR polarimétriques, le traitement est appliqué, élément par élément, sur les matrices de cohérence de  $L$  lignes consécutives.

Cette étape a pour but de réduire la variance du bruit de l'image, donc son aspect granulaire, et d'uniformiser la taille des pixels en distance radiale et en azimuth.

#### IV.2.1.2 Filtrage de speckle

Dans un deuxième temps, les données sont filtrées au moyen d'un filtre de speckle afin de réduire le caractère aléatoire des données, inhérent au principe d'acquisition SAR. L'objectif des procédures de filtrage de bruit consiste à obtenir une image finale dont la résolution spatiale reste inchangée, mais qui présente une réduction du niveau de bruit équivalent à celui d'une image multi-vues. Pour ce faire, un moyennage incohérent spatial est opéré au moyen d'une fenêtre glissante, s'appuyant sur l'hypothèse d'indépendance de pixels voisins au sein d'une image. La quantité de filtrage est alors mesurée à l'aide du nombre de vues équivalentes  $L_{eq}$ , qui est obtenu à partir de la moyenne et de la variance de l'intensité " $L$ -vues" de l'image  $I$  de la façon suivante :

$$L_{eq} = \frac{E^2(I)}{\text{var}(I)} \quad (\text{IV-1})$$

Il existe un grand nombre de techniques de filtrage de speckle. Parmi les plus utilisées figure le filtrage de Lee, basé sur une minimisation au sens des moindres carrés d'une linéarisation du modèle multiplicatif du speckle [Lee 99]. Ce filtre est adaptatif dans le sens où la quantité de filtrage dépend des statistiques locales de l'image. De plus, J. S. Lee a proposé une implémentation utilisant des masques directionnels pour un meilleur respect des propriétés géométriques des cibles d'une image.

La forme du filtre est :

$$\tilde{I} = \bar{I} + k(I - \bar{I}) \quad \text{avec} \quad k = \frac{\text{var}(I) - I^2 \sigma_n^2}{\text{var}(I)[1 + \sigma_n^2]} \quad (\text{IV-2})$$

avec  $\sigma_n = \frac{1}{L}$  le nombre de vues équivalentes avant filtrage.

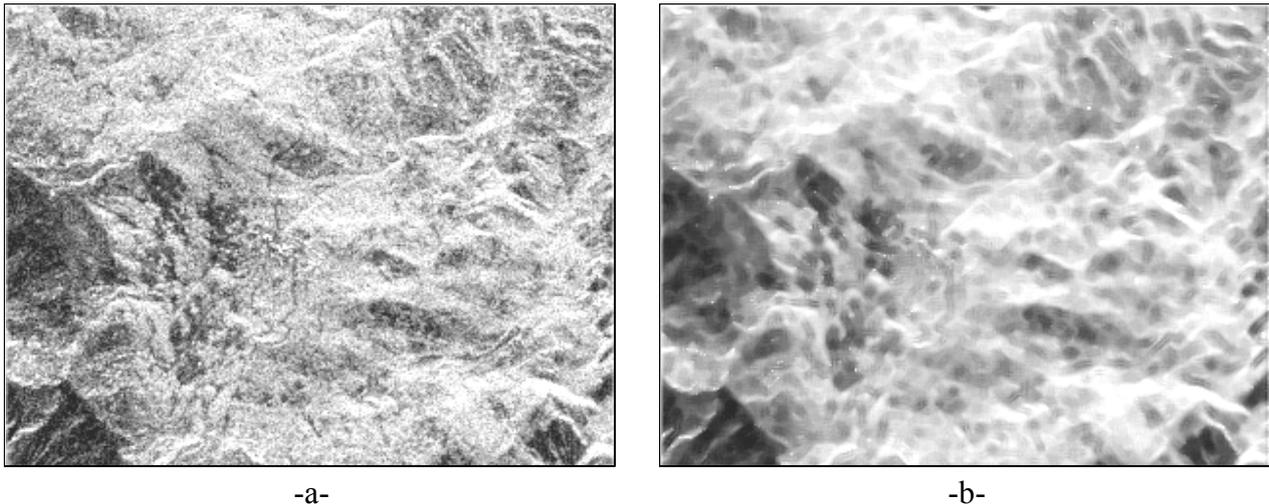
Une version polarimétrique a aussi été proposée sous la forme suivante :

$$\tilde{\mathbf{T}} = \mathbf{E}(\mathbf{T}) + k(\mathbf{T} - \mathbf{E}(\mathbf{T})) \quad (\text{IV-3})$$

où le coefficient de filtrage  $k$  est maintenant calculé à partir des statistiques locales du span de la matrice de cohérence.

La taille de la fenêtre glissante doit s'adapter aux types de données filtrées. Les données acquises sur des grandes zones homogènes peuvent être filtrées avec de grandes fenêtres. Au contraire, des régions à forte topographie ou composées de milieux divers doivent être filtrées au moyen d'une fenêtre de taille suffisamment petite pour respecter la texture de l'image. En effet le filtrage appliqué à une trop grande zone peut altérer l'information.

Le filtre de Lee est appliqué aux données SAR polarimétriques SIR-C des sites de Risoul et d'Izoard. Comme il apparaît sur la figure IV-2, l'utilisation du filtre réduit considérablement les effets de granulation.



*Figure IV-2 Exemple de l'effet du filtrage de speckle  
-a- image de données non filtrées, -b- image de données filtrées*

### IV.2.2 Regroupement par caractéristiques polarimétriques

Les sites alpins sont généralement caractérisés par la grande variabilité et la complexité des différents milieux naturels qui les composent. De ce fait, des données SAR polarimétriques de scènes alpines présentent un aspect fortement aléatoire, même après filtrage de speckle. La distribution chahutée des paramètres polarimétriques résultants constitue une limitation à l'analyse et à l'interprétation des données, en vue d'une estimation des paramètres bio- et géo-physiques.

Une méthode de regroupement des pixels ("clustering" en anglais) est utilisée dans le but de rendre plus homogènes les régions de l'image. Le regroupement des pixels en clusters est effectué en deux étapes. Tout d'abord, une classification non supervisée des données SAR polarimétriques, basée sur la statistique de Wishart d'une matrice de cohérence échantillonnée, est appliquée afin de regrouper l'ensemble des pixels en 16 classes polarimétriques compactes. Les clusters sont ensuite formés en partageant chacune des classes en groupes de pixels connexes. Ainsi les pixels appartenant à un cluster possèdent des propriétés polarimétriques et des localisations géographiques proches.

Des traitements additionnels, visant à regrouper des clusters faiblement peuplés peuvent être mis en place en utilisant des métriques statistiques mono- ou multi-variables.

La figure IV-3 illustre les effets de la procédure de regroupement des pixels par la méthode des clusters. La lisibilité de l'image et l'interprétation du phénomène de rétrodiffusion sont nettement améliorées.

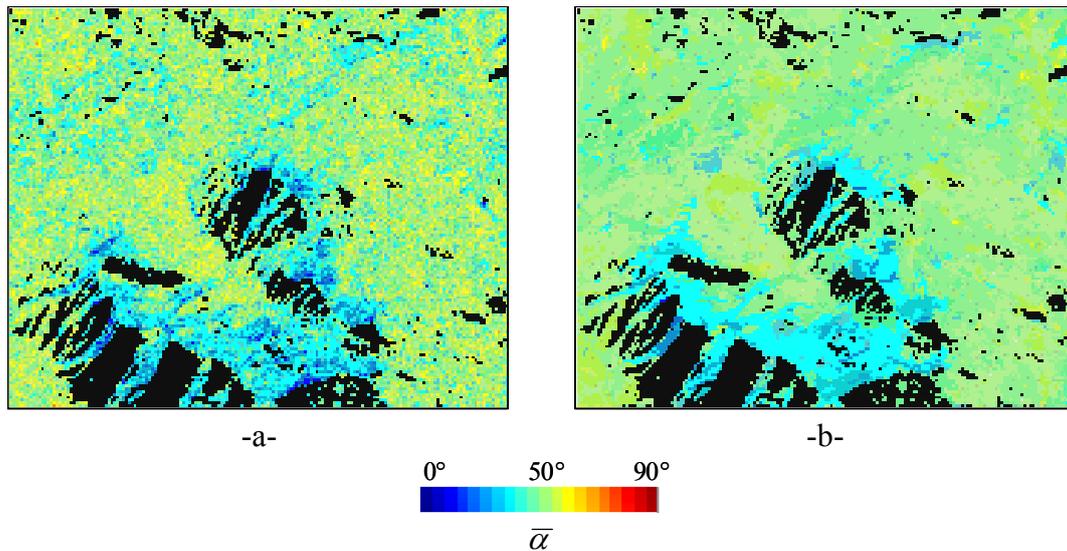


Figure IV-3 Illustration du regroupement par cluster sur une image de l'indicateur polarimétrique  $\bar{\alpha}$ .

-a- image du paramètre  $\bar{\alpha}$  calculé par pixel, -b- image du paramètre  $\bar{\alpha}$  calculé par cluster

La valeur moyenne des paramètres polarimétriques sur un cluster peut être obtenue à partir de deux processus différents. Le premier moyenne sur un cluster les matrices de cohérence associées à chaque pixel et les paramètres polarimétriques sont extraits de cette matrice moyenne. Le second consiste à moyenner sur un cluster les paramètres polarimétriques calculés sur chaque pixel appartenant à ce cluster. Cette dernière méthode est préférable, car dans l'autre cas la matrice moyenne de cohérence peut être faussée par une trop grande hétérogénéité de l'information polarimétrique menant notamment à une surestimation de l'entropie et de l'angle  $\bar{\alpha}$ .

Le terme de pixel est remplacé par celui de cluster dans la suite de ce chapitre.

En plus de ces traitements, le masque d'ombre, généré au moyen du MNT pour des angles d'incidence supérieurs à  $70^\circ$  et présenté dans le deuxième chapitre, est appliqué sur les images.

Ce masque est utilisé dans le but premier de ne pas tenir compte de ces zones lors des traitements mais aussi afin de faciliter la visualisation des régions d'intérêts. L'information contenue dans ces zones d'ombre est caractérisée par un rapport signal à bruit faible et peut donc fausser l'interprétation du comportement polarimétrique des régions étudiées.

### IV.3 Analyse au moyen des paramètres polarimétriques H et $\bar{\alpha}$

Il s'agit, dans ce paragraphe, d'évaluer le potentiel des paramètres polarimétriques H et  $\bar{\alpha}$  pour la discrimination d'un couvert de neige.

#### IV.3.1 Variations fréquentielles

L'étude fréquentielle présentée dans ce paragraphe est menée dans le but d'examiner le pouvoir de discrimination de la neige au moyen de variations fréquentielles. L'analyse est faite à partir des

données acquises en avril, c'est-à-dire en condition d'enneigement, et en octobre sans neige, dans les bandes de fréquence L et C. Quatre classes sont définies à partir de l'image Landsat d'hiver : les surfaces sans neige, les surfaces enneigées, les forêts sans neige et les forêts enneigées. Afin de pouvoir déterminer un comportement général sur les quatre classes, un nombre de zones suffisamment élevé est fixé. Ces zones sont sélectionnées de façon équilibrée dans les quatre classes.

La figure IV-4 est une représentation dans le plan  $\Delta H - \Delta \bar{\alpha}$  des variations fréquentielles de ces zones pour une même saison. La distribution des marqueurs relatifs aux zones est linéaire aussi bien pour les surfaces que pour les forêts, traduisant de ce fait la dépendance entre l'entropie H et l'angle  $\bar{\alpha}$ . Les valeurs représentées sur cette figure sont obtenues à partir de l'expression  $\Delta x_c = x_{c-L} - x_{c-C}$  où  $x_c$  représente la valeur de l'entropie H ou de l'angle  $\bar{\alpha}$  sur un cluster.

La figure IV-4-a dénote une différence de comportement entre les surfaces recouvertes de neige et les surfaces non enneigées. Toutefois, il faut noter que les zones de surfaces enneigées sont des régions d'altitude et ont des caractéristiques biophysiques différentes des surfaces non enneigées qui se trouvent dans les vallées. Les premières sont des zones principalement nues alors que les secondes sont recouvertes de petite végétation. Une analyse des variations fréquentielles des mêmes zones en été est alors présentée sur la figure IV-4-b afin d'examiner et de comparer leur comportement en été et d'évaluer l'influence de la présence de la neige en hiver sur les régions d'altitude. On constate, sur la figure IV-4-b, que les régions de surface, non enneigées toute l'année symbolisées par des losanges, ont des valeurs de  $\Delta \bar{\alpha}_{L-C}$  comparables quelle que soit la saison. Cela indique un comportement polarimétrique qui tend à être constant en fonction de la saison. Par contre, sur les régions de surface qui ne sont enneigées que l'hiver, symbolisées par des ronds, les valeurs de  $\Delta \bar{\alpha}_{L-C}$  s'étendent sur le domaine  $[+10^\circ; -10^\circ]$  en été et sur le domaine de  $[0^\circ; -10^\circ]$  en hiver. Le comportement très aléatoire de ces zones rend la discrimination d'un couvert de neige difficilement envisageable.

Cette méthode de variations fréquentielles ne permet donc pas de savoir si les surfaces d'altitude, enneigées, sont discernables des surfaces en vallée du fait de la présence de la neige ou s'il s'agit d'une manifestation liée à la particularité de leur caractère biophysique.

Les figures IV-4-c et IV-4-d représentent respectivement les variations fréquentielles sur des régions forestières en hiver et en été. Leurs comportements indiscernables entre l'été et l'hiver implique qu'il n'est pas possible de mettre en évidence la présence de la neige sur de telles régions au moyen d'une variation de fréquence entre la bande L et la bande C.

En conclusion, la technique de variations fréquentielles aux bandes de fréquence utilisées dans cette partie n'apporte pas d'information probante pour détecter la présence d'un couvert neigeux sur des surfaces et des forêts en milieux alpins.

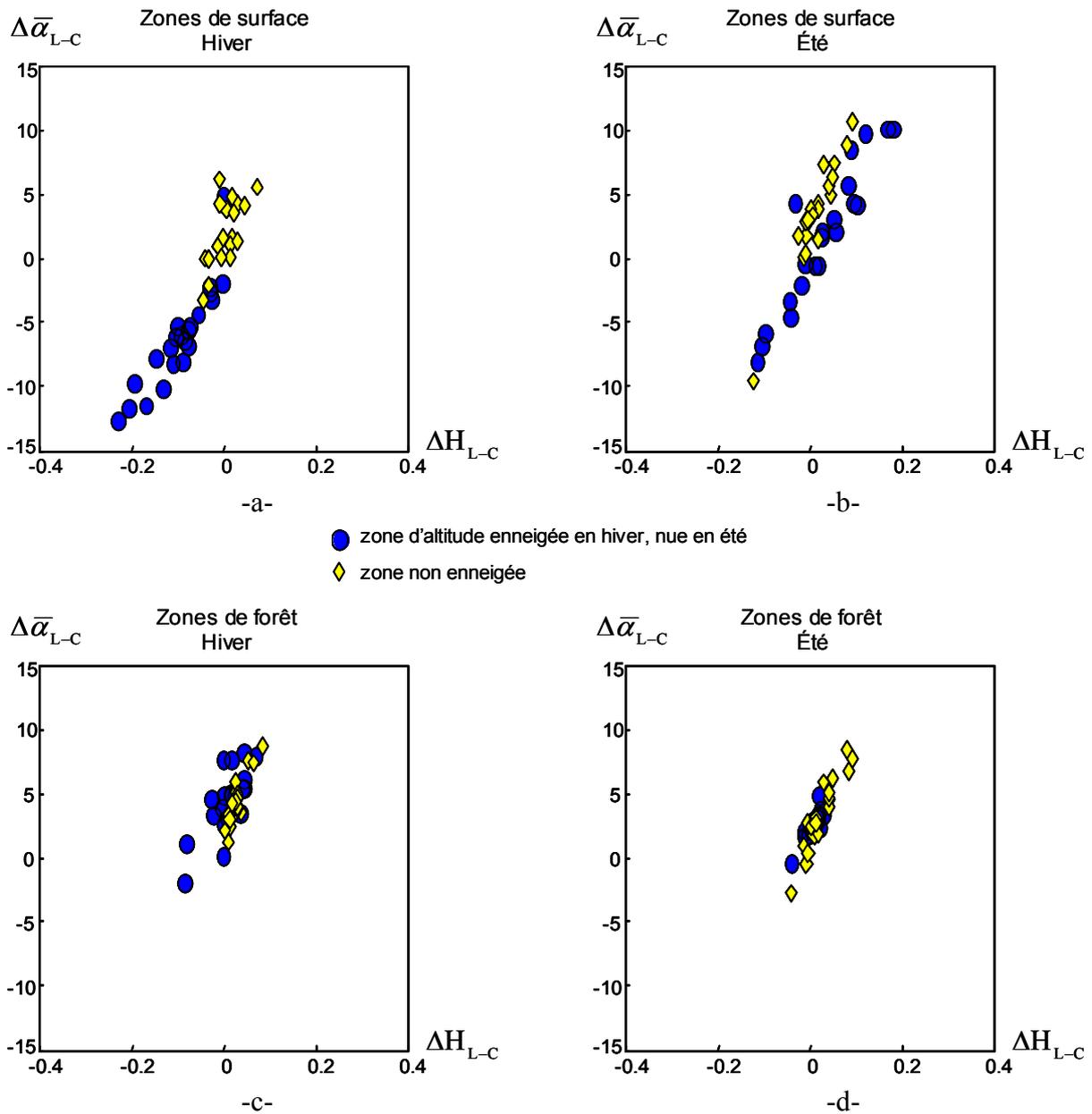


Figure IV-4 Variations fréquentielles entre la bande L et la bande C de paramètres polarimétriques en présence ou en l'absence de neige.

### IV.3.2 Variations temporelles

Les variations temporelles sont liées aux modifications qui ont lieu entre les deux saisons étudiées et dépendent donc de l'influence du couvert neigeux sur la réponse des zones enneigées.

Une analyse statistique de la variation été-hiver des paramètres H et  $\bar{\alpha}$  est menée dans les deux bandes de fréquence L et C, afin d'observer dans quelles conditions la neige sèche affecte de façon significative le comportement de ces deux variables polarimétriques.  $\Delta x_c$  représente la différence entre un cluster en hiver et le même cluster en été, avec  $x$  égal à H ou  $\bar{\alpha}$ . L'étude est faite à partir des quatre classes définies précédemment et sur la même sélection de zones. La figure IV-5 est une

représentation dans le plan  $\Delta H - \Delta \bar{\alpha}$  de l'évolution des paramètres pour les deux types de milieu en bandes L et C pour des zones enneigées et non enneigées.

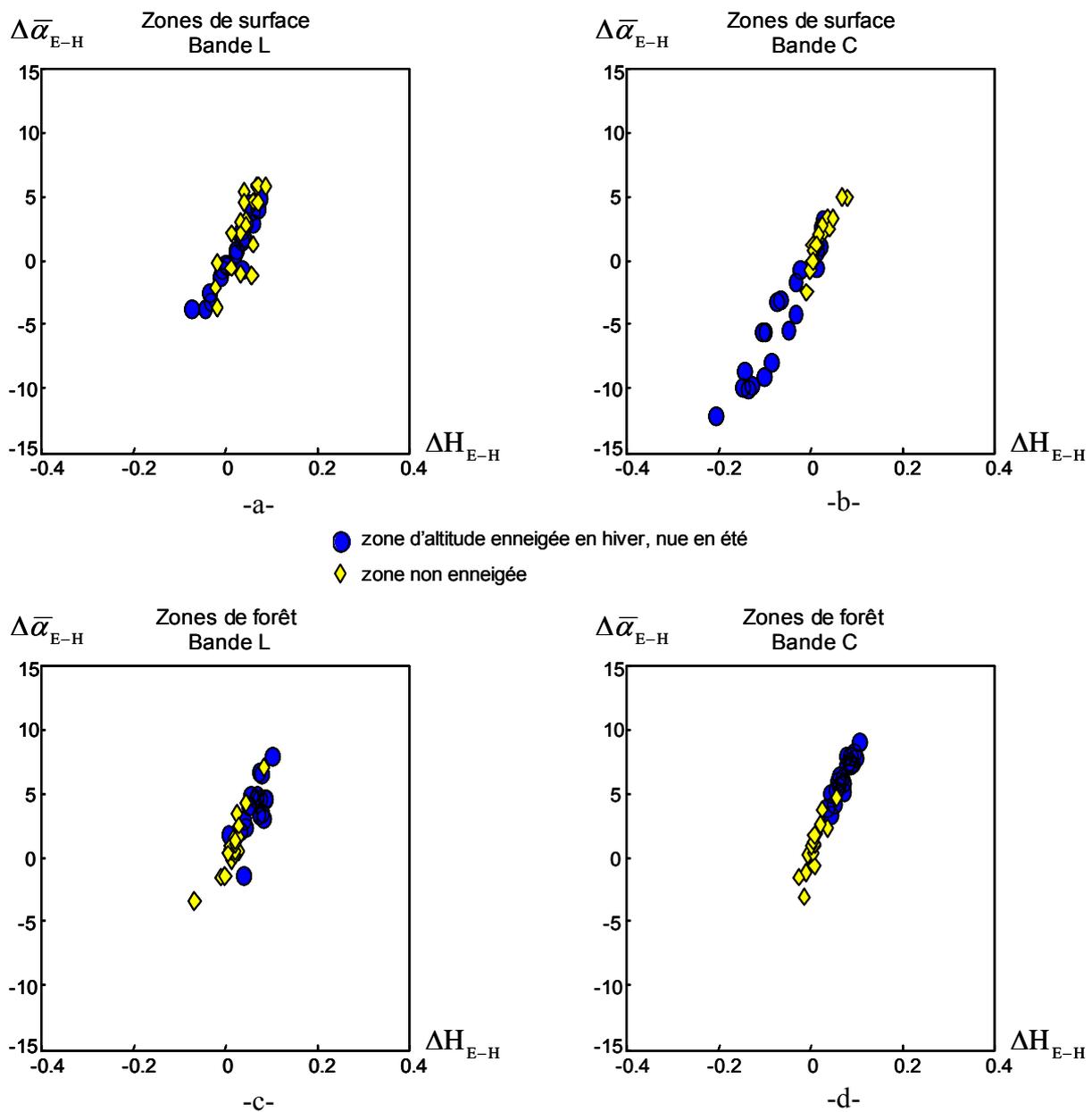


Figure IV-5 Variations temporelles entre l'été et l'hiver de paramètres polarimétriques en présence ou en l'absence de neige.

Les quatre représentations des variations temporelles de la figure IV-5 illustrent la linéarité de la distribution des points aussi bien sur les régions de surfaces que de forêts, enneigées ou non, et traduisent ainsi la dépendance entre l'entropie H et l'angle  $\bar{\alpha}$ .

La distribution des marqueurs relatifs aux surfaces enneigées se superpose à celle des surfaces non enneigées, que ce soit en bande L ou C, mettant en évidence l'impossibilité de discriminer la neige sur des surfaces au moyen de ces paramètres polarimétriques. Par contre, sur les forêts la répartition des marqueurs en bande C permet de distinguer très clairement les zones enneigées de

celles non recouvertes de neige, avec un faible taux d'erreur. La dynamique des variations de l'angle  $\bar{\alpha}$  rend ce paramètre plus adapté que l'entropie pour la discrimination de la neige sur les forêts [Martini 03].

Les tableaux IV-1 et IV-2 donnent la valeur moyenne  $\langle \Delta x \rangle$  et l'écart type  $std(\Delta x)$  des variations de  $\Delta H$  et de  $\Delta \bar{\alpha}$  dans les mêmes configurations représentées par la figure IV-5. Les comportements qui se dégagent de ces tableaux correspondent à l'information contenue sur la figure IV-5.

- Statistiques des variations été-hiver en bande L

	Surface				Forêt			
	Sans neige		Enneigée		Sans neige		Enneigée	
	$\langle \Delta x \rangle$	$std(\Delta x)$						
$\bar{\alpha} (^\circ)$	3.32	5.29	1.21	4.01	0.70	2.03	3.93	1.95
H	0.045	0.052	0.020	0.063	0.022	0.018	0.065	0.019

Tableau IV-1 Statistiques des variations de  $\bar{\alpha}$  et de H sur les surfaces et les forêts en bande L

- Statistiques des variations été-hiver en bande C

	Surface				Forêt			
	Sans neige		Enneigée		Sans neige		Enneigée	
	$\langle \Delta x \rangle$	$std(\Delta x)$						
$\bar{\alpha} (^\circ)$	0.82	2.48	-5.24	4.53	<b>1.64</b>	<b>1.96</b>	<b>6.77</b>	<b>2.01</b>
H	0.012	0.032	-0.065	0.059	0.019	0.021	0.074	0.027

Tableau IV-2 Statistiques des variations de  $\bar{\alpha}$  et de H sur les surfaces et les forêts en bande C

La valeur moyenne de  $\Delta x_c$  indique qu'une faible variation temporelle affecte le comportement polarimétrique des forêts non enneigées. En effet ce milieu a une réponse très aléatoire et conserve ses caractéristiques au cours du temps. Cependant la présence d'un couvert neigeux modifie sa réponse globale en bande C. La neige augmente la part de diffusion du mécanisme de surface et atténue fortement les mécanismes de réflexions multiples, impliquant une baisse du paramètre  $\bar{\alpha}$  [Ferro-Famil 00].

L'observation jointe de la moyenne et de l'écart type révèle que les variations de H et  $\bar{\alpha}$  ne peuvent servir à discriminer les surfaces enneigées quelle que soit la bande de fréquence. Au contraire, de tels indicateurs peuvent être utilisés en bande C sur les régions forestières pour mettre en évidence la présence de la neige.

### IV.3.3 Discussion

Les variations fréquentielles ne permettent pas de détecter de manière fiable la neige sèche sur un milieu alpin. En effet, l'influence de la neige sur les paramètres polarimétriques dépend fortement de la nature des milieux sous jacents. Les changements observés lors de l'étude des variations fréquentielles ne proviennent donc pas uniquement de la présence de la neige, comme l'indiquent les figures IV-4-a et IV-4-b. Ainsi l'analyse des variations temporelles dans une même bande de fréquence semble plus appropriée. Il est à noter cependant que les paramètres polarimétriques étudiés ont des comportements spécifiques selon le milieu naturel considéré, comme cela est mis en évidence dans le paragraphe IV.3.2. De plus, la variation de ces paramètres sur les zones de surfaces mettent en évidence un faible contraste polarimétrique. Une étude préalable des données en été apparaît nécessaire afin d'adapter l'étude de discrimination de la neige en fonction du milieu naturel sur lequel repose le couvert neigeux. Des méthodes de détection des différents milieux naturels sont présentées dans la partie suivante.

## IV.4 Approche multi-temporelle et multi-fréquentielle

Du fait de la grande diversité des milieux naturels alpins, ainsi que de leur comportement polarimétrique fréquentiel spécifique, une étape préliminaire consacrée à leur localisation est nécessaire. Une estimation efficace de la nature des mécanismes de diffusion sur des scènes naturelles peut être réalisée au moyen des paramètres polarimétriques tels que l'entropie  $H$ , l'anisotropie  $A$  et l'angle  $\bar{\alpha}$ , obtenus par la technique de décomposition définie dans le premier chapitre.

Dans cette partie, l'analyse porte sur les données SAR SIR-C en bande L. En effet, de nombreuses études [Durdan 89], [Lee 01], [Ferro-Famil 03] ont montré l'efficacité de cette bande de fréquence pour la classification et la cartographie des milieux naturels comme les surfaces et les forêts.

La méthode d'attribution des régions à un type de classe se base sur une procédure hiérarchique et exclusive. Dans un premier temps les milieux fortement aléatoires, tels que les forêts, sont localisés. Ensuite, en tenant compte de cette décision, une procédure de détection des régions ayant une réponse de diffusion de surface ou de double rebond est mise en place.

La figure IV-6 représente l'algorithme des différentes étapes développées dans cette partie.

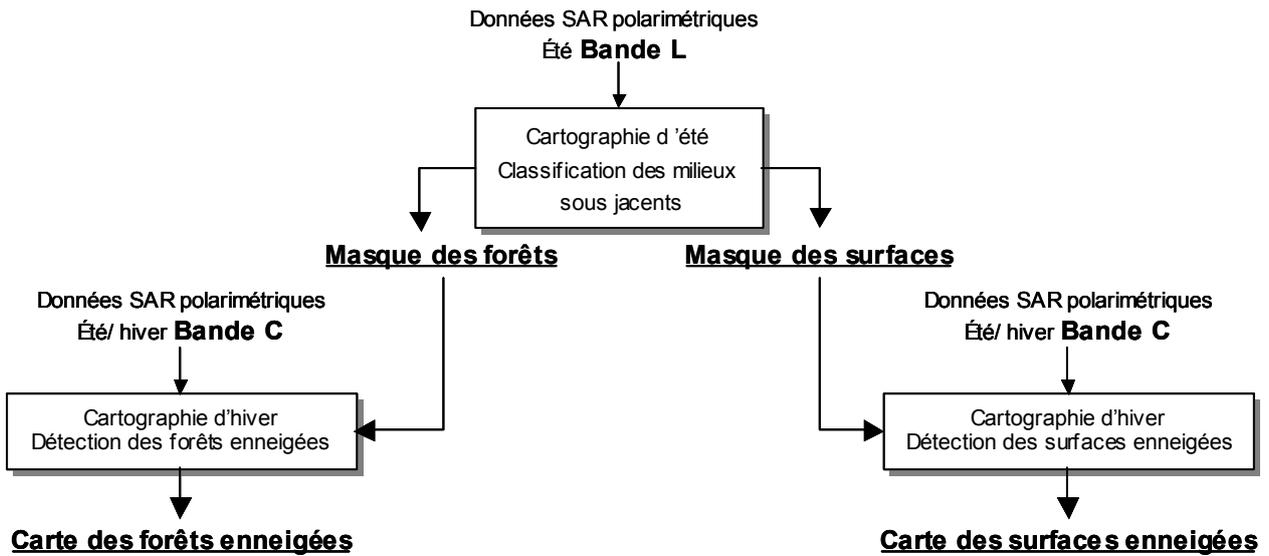


Figure IV-6 Algorithme de la cartographie multi-temporelle et multi-fréquentielle de la neige

## IV.4.1 Détection des forêts

### IV.4.1.1 Décomposition à partir d'un modèle de diffusion

Dans le but de détecter les régions forestières, il apparaît approprié d'appliquer sur les données polarimétriques la décomposition proposée par A. Freeman [Freeman 98], présentée dans le chapitre I. En effet ce modèle est principalement utilisé dans les études polarimétriques visant à classifier des milieux forestiers ou à en extraire des informations bio- et géophysiques.

Cette décomposition se base sur un modèle de diffusion composite dont le principe de décomposition d'une matrice de covariance est rappelé par l'équation suivante:

$$\mathbf{C} = f_v \mathbf{C}_v + f_d \mathbf{C}_d + f_s \mathbf{C}_s \quad (\text{IV-4})$$

La matrice  $\mathbf{C}$  du signal rétrodiffusé est calculée à partir de la somme pondérée des trois matrices  $\mathbf{C}_i$  des mécanismes de diffusion modélisés par des matrices de covariance élémentaires. Les matrices  $\mathbf{C}_v$ ,  $\mathbf{C}_d$  et  $\mathbf{C}_s$  sont associées respectivement à la diffusion de volume, au double rebond et à la réflexion de surface, pondérées par les scalaires  $f_v$ ,  $f_d$  et  $f_s$ .

Il est équivalent d'écrire la relation (IV-4) sous la forme d'une somme de matrices de cohérence telle que :

$$\mathbf{T} = P_v \mathbf{T}_v + P_d \mathbf{T}_d + P_s \mathbf{T}_s \quad (\text{IV-5})$$

Les matrices de cohérence  $\mathbf{T}_v$ ,  $\mathbf{T}_d$  et  $\mathbf{T}_s$  sont respectivement associées à la diffusion de volume, au double rebond et à la réflexion de surface, pondérées par les scalaires  $P_v$ ,  $P_d$  et  $P_s$  qui représente la puissance associée à chacun des mécanismes. Les scalaires  $P_v$ ,  $P_d$  et  $P_s$  sont définis dans le premier chapitre en fonction des scalaires  $f_v$ ,  $f_d$  et  $f_s$ .

Chaque composante  $\mathbf{T}_i$  ayant un span unitaire, il est possible d'obtenir des indicateurs de puissance associés à chacun des mécanismes.

Ce modèle de décomposition est finalement appliqué aux données SAR SIR-C en bande L acquises en octobre sur le site de Risoul. La figure IV-7 représente la contribution relative des trois

mécanismes dans la réponse rétrodiffusée totale. Une observation jointe des trois résultats de la figure IV-7 indique que la diffusion de volume, figure IV-7-c, est le mécanisme dominant pour la plupart des régions de l'image. Une faible contribution de la diffusion de surface est néanmoins apparente, figure IV-7-a, sur quelques zones d'altitude. Le mécanisme de double rebond, illustré figure IV-7-b, est quasiment inexistant sur ce site alpin.

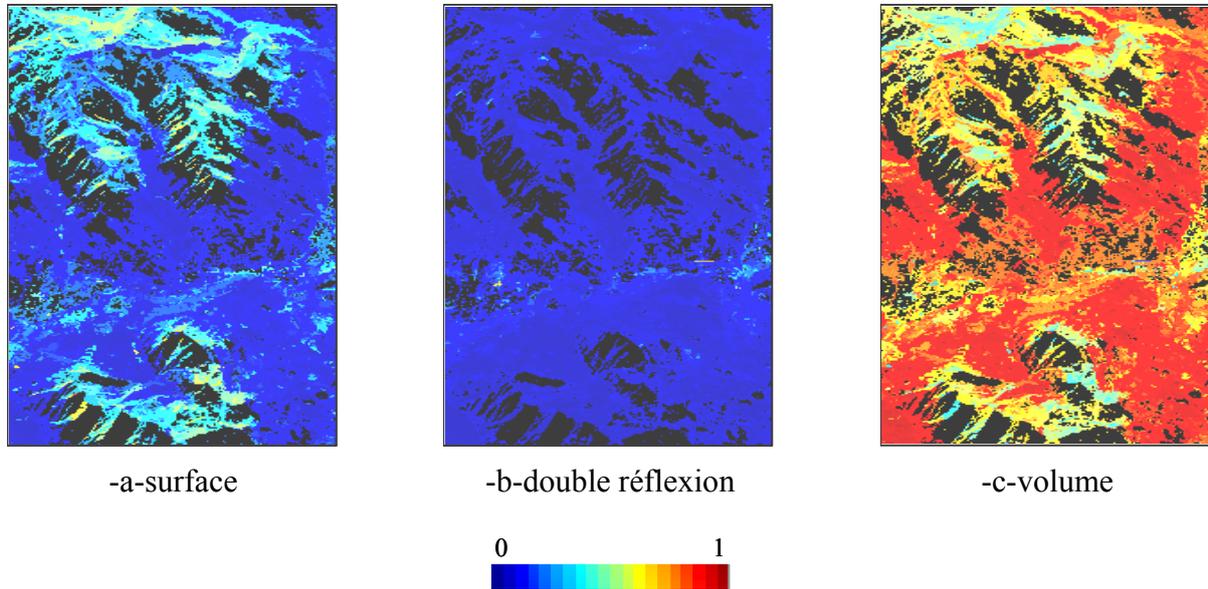


Figure IV-7 Représentation de la contribution relative des mécanismes de diffusion

La figure IV-8-a montre une image du mécanisme de diffusion prépondérant au sein de chaque cluster de l'image. En comparant ce résultat avec l'image optique Landsat du site étudié, il est manifeste que ce modèle surestime le mécanisme de diffusion de volume et donc les régions recouvertes de végétation.

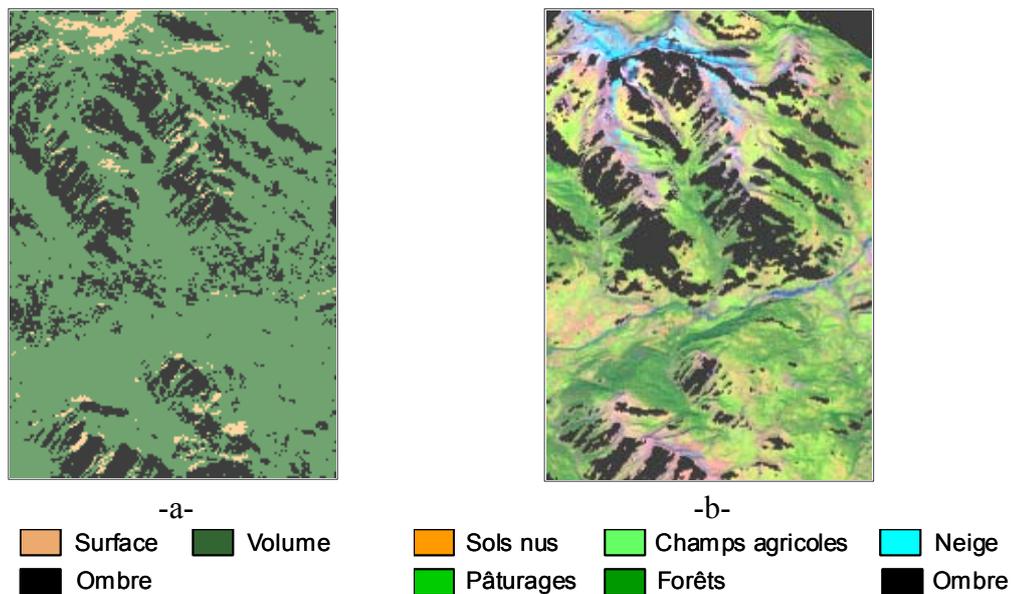


Figure IV-8 Représentation du mécanisme dominant et de l'image optique Landsat du site correspondant

La surestimation des forêts peut mener à une détection erronée du couvert neigeux. C'est pourquoi une cartographie pertinente des différents milieux naturels est nécessaire. La suite de cette étude se tourne ainsi vers l'analyse des paramètres polarimétriques,  $H$ ,  $A$ ,  $\bar{\alpha}$ .

#### IV.4.1.2 Combinaisons entre l'entropie et l'anisotropie

L'étude de combinaisons de paramètres polarimétriques permet une analyse accrue des données SAR et une interprétation plus poussée.

Dans ce paragraphe, des combinaisons entre l'entropie,  $H$ , et l'anisotropie,  $A$ , sont appliquées sur les données d'octobre en bande L dans le but de dégager un indicateur rendant possible la détection des forêts. Comme il a été vu dans le chapitre I, l'observation jointe de l'entropie et de l'anisotropie permet d'estimer la distribution des valeurs propres de la matrice de cohérence au moyen de la relation [Pottier 98] :

$$HA + (1-H)A + H(1-A) + (1-H)(1-A) = 1 \quad (\text{IV-6})$$

Des valeurs élevées du terme  $H(1-A)$  caractérisent une diffusion aléatoire. Cette combinaison peut alors être utilisée pour la localisation des milieux fortement aléatoires et donc les régions forestières définies comme telles. Les zones de forêt peuvent être alors détectées en utilisant la règle de décision suivante [Pottier 98] :

$$H(1-A) > HA, (1-H)A, (1-H)(1-A) \Rightarrow H(1-A) > 0.5 \quad (\text{IV-7})$$

Cette règle de décision est appliquée sur les données SIR-C en bande L afin de tester son pouvoir de discrimination des régions forestières.

#### IV.4.1.3 Application aux données SAR en bande L

Les quatre combinaisons formées à partir de l'entropie,  $H$ , et de l'anisotropie,  $A$ , et définies précédemment sont illustrées par la figure IV-9 en bande de fréquence L pour le site test de Risoul.

Les domaines de définition de l'entropie et de l'anisotropie sont donnés par  $0 < H < 1$  et  $0 < A < 1$ . Les variables issues des quatre combinaisons sont définies dans ce même intervalle. Il est facilement observable que parmi les quatre combinaisons,  $H(1-A)$  est celle qui possède la plus grande dynamique, figure IV-9-b. Les combinaisons  $HA$ ,  $A(1-H)$ ,  $(1-H)(1-A)$  ont une dynamique faible et apportent peu d'information sur les différents milieux naturels constitutifs du site d'étude.

Comme attendu, la combinaison  $H(1-A)$  affiche un fort contraste entre les zones connues comme étant des surfaces et les régions forestières. Les zones de faibles valeurs,  $H(1-A) < 0.5$ , sont représentatives des régions de sols nus mais aussi des surfaces recouvertes de petites végétations tels que des champs agricoles ou des pâturages, alors que les zones de plus fortes valeurs,  $H(1-A) > 0.5$ , révèlent uniquement les milieux de forêts denses.

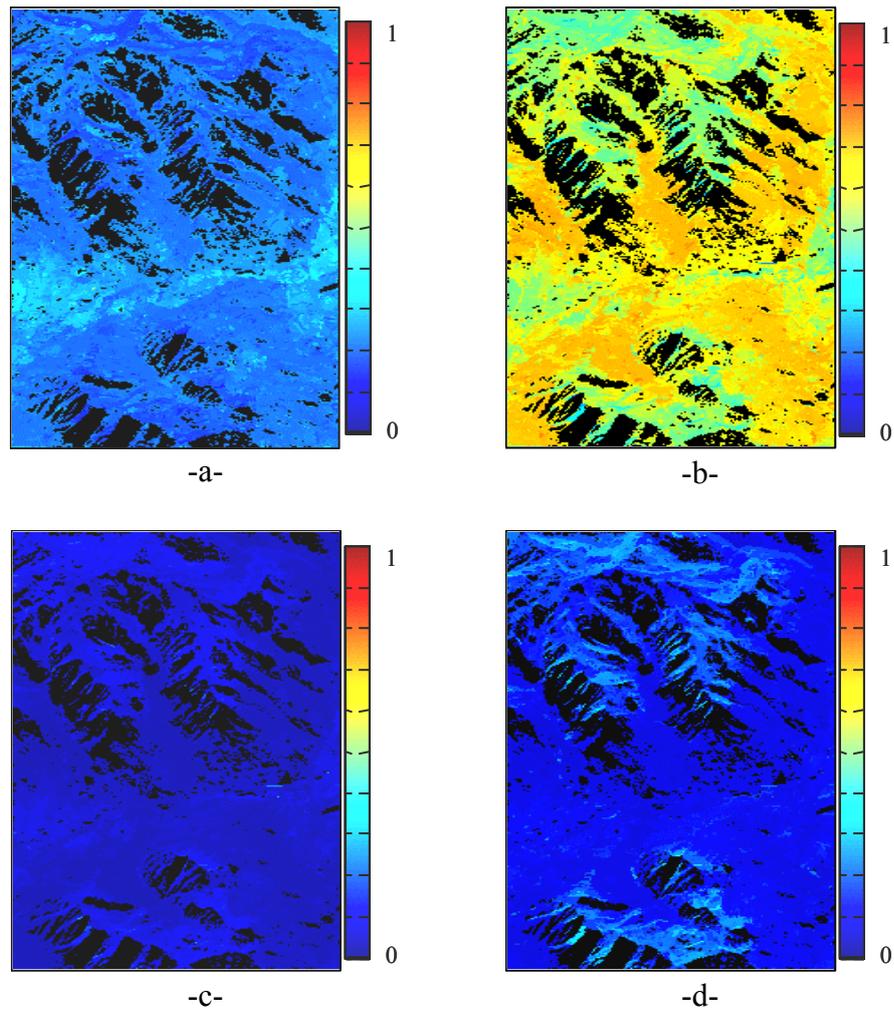


Figure IV-9 Représentation des quatre combinaisons de l'entropie et de l'anisotropie en bande L  
 -a-  $HA$ , -b-  $H(1 - A)$ , -c-  $(1 - H)A$ , -d-  $(1 - H)(1 - A)$

En pratique, dans le but de réduire la sensibilité aux facteurs perturbateurs, les zones de forêts sont estimées à partir de la relation suivante [Martini 05a] :

$$H(1 - A) > 0.65 \quad (IV-8)$$

La figure IV-10 illustre les résultats obtenus à partir de l'équation (IV-8) appliquée sur les données SAR SIR-C correspondant au site de Risoul et d'Izoard.

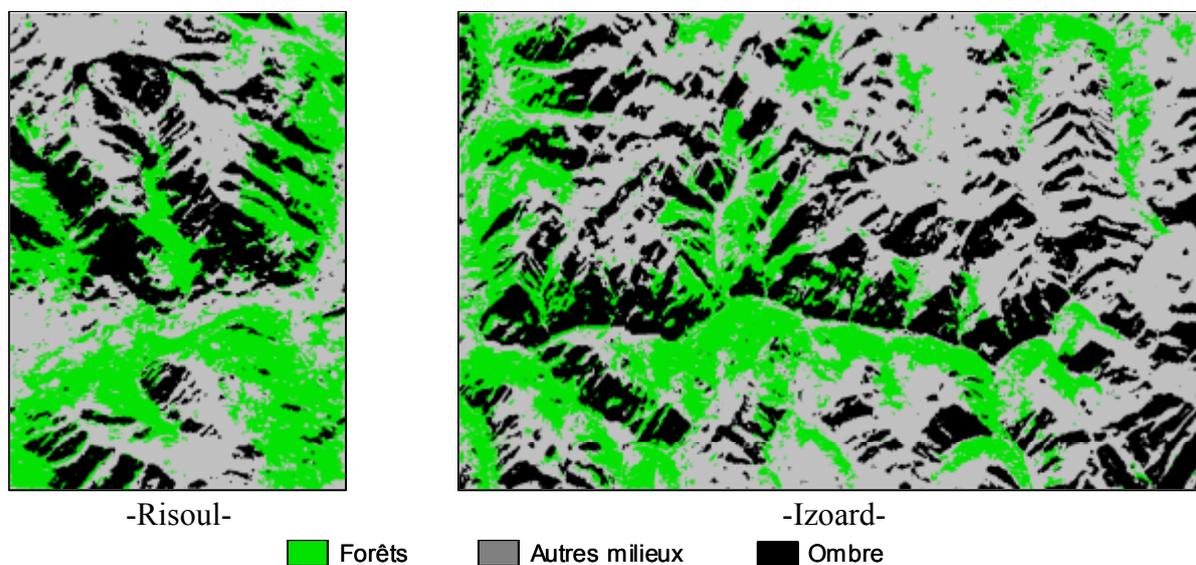


Figure IV-10 Cartographies des régions forestières en bande L

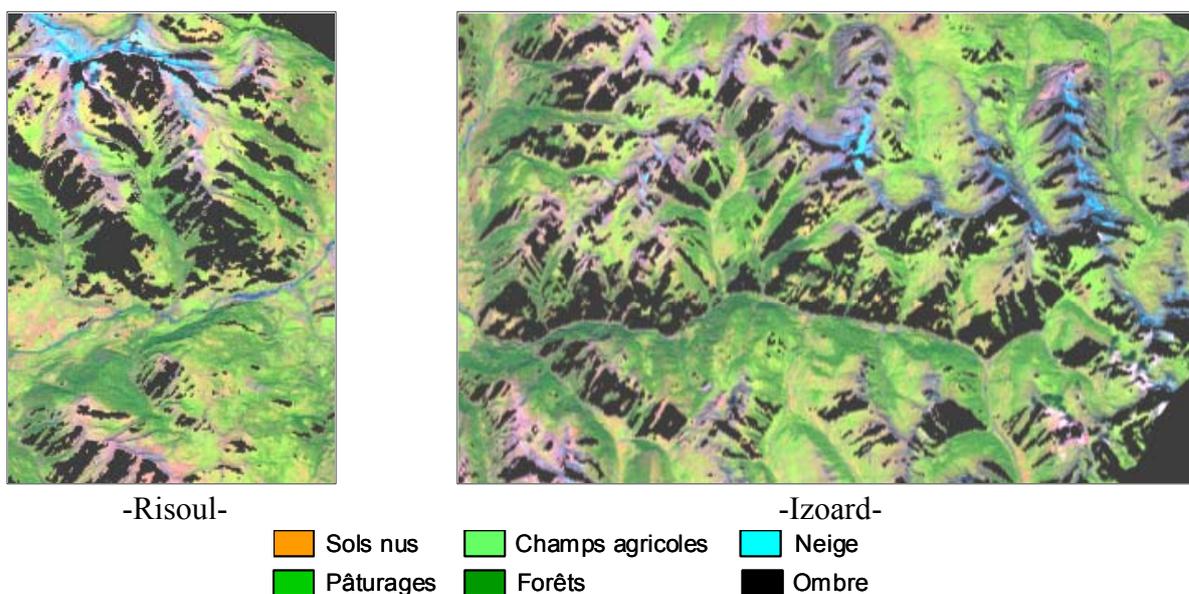


Figure IV-11 Images optiques Landsat en été, projetées dans le plan d'incidence radar, des sites de Risoul et Izoard

Cette délimitation des espaces présumés forestiers est validée d'une part à l'aide des images satellitaires Landsat, représentées sur la figure IV-11, mais aussi grâce à une carte IGN, échelle 1 :100000, datant de 1994 sur laquelle les forêts sont indiquées. La combinaison  $H(1-A)$  en bande L est un discriminateur très satisfaisant des régions forestières et est utilisé pour élaborer un masque de ces espaces.

### IV.4.2 Détection des surfaces

Dans cette partie, la procédure de détection des régions de surfaces est appliquée sur les zones non classées comme des forêts.

En bande L, la procédure de détection se base sur le nombre de mécanismes dominants dans le phénomène de rétrodiffusion global du milieu [Martini 05d]. Ces mécanismes sont définis par décomposition de la matrice de cohérence sur sa base de vecteurs propres, abordée au premier chapitre. Ainsi la matrice de cohérence moyenne de la cible est décomposée en une somme de trois matrices de cohérence pures, définies chacune par un vecteur propre et une valeur propre. A chacune de ces matrices,  $T_i$ , est associé un angle  $\alpha_i$  à partir duquel la nature du mécanisme de diffusion peut être caractérisée. La détection des régions de surface est effectuée en tenant compte du nombre de mécanismes dominants.

Une matrice de cohérence moyenne est formée à partir de contributions qui, dans un cas général, occupent un espace à trois dimensions complexe. Il est de ce fait assez difficile d'estimer un type de mécanisme de rétrodiffusion directement à partir de cette matrice. Le théorème de décomposition aux valeurs et vecteurs propres est alors appliqué. Il a été montré que le paramètre  $\bar{\alpha}$  est, en général, un bon indicateur de la nature du mécanisme de rétrodiffusion [Ferro-Famil 00]. Néanmoins son utilisation sur des scènes complexes a montré qu'il pouvait mener à une surestimation des mécanismes de diffusion de volume et de double réflexion. Ceci est dû à un biais qui affecte ce paramètre sous certaines conditions. Un exemple de ce biais est donné dans [Ferro-Famil 03] où est développée une méthode permettant de remédier à ce problème. Il s'agit de déterminer, pour chaque matrice de cohérence moyenne, le nombre de mécanismes dominants et de prendre une décision adaptée à chaque configuration. L'estimation de la répartition des mécanismes est effectuée au moyen des paramètres polarimétriques H et A comme cela est montré sur la figure IV-12 [Ferro-Famil 03].

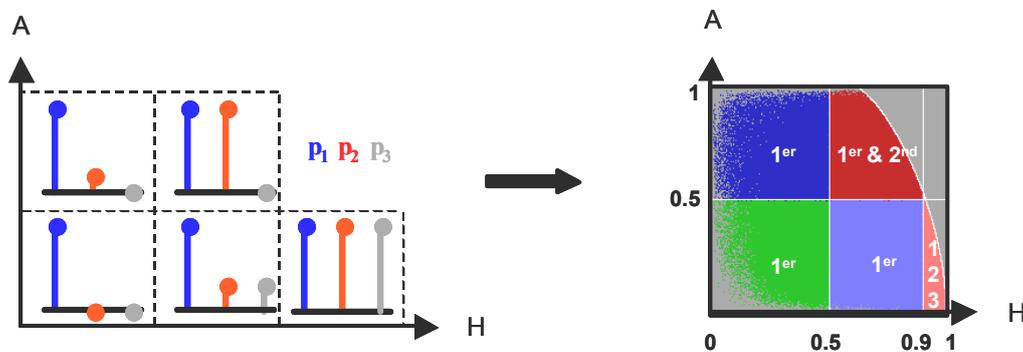


Figure IV-12 Détermination du nombre de mécanismes dominants dans le plan H-A

On distingue alors trois cas:

- Lorsqu'une matrice de cohérence présente un seul mécanisme dominant, l'estimation de la nature de la diffusion est opérée au moyen du paramètre  $\alpha_1$  issu du vecteur propre prépondérant. Ainsi, un cluster de l'image est attribué à la classe des surfaces si la valeur de l'angle  $\alpha_1$  vérifie :

$$\alpha_1 < 45^\circ \tag{IV-9}$$

autrement le cluster est affecté à la classe de la double réflexion.

- En présence de deux mécanismes de diffusion prépondérants, l'information liée au premier vecteur propre n'est plus suffisante pour prendre une décision. Une matrice de cohérence distribuée  $\mathbf{T}_d$  est alors reformée à partir des deux contributions prépondérantes et une comparaison des deux premiers éléments de la diagonale, associés aux mécanismes de simple réflexion et de double réflexion, est faite.

$$\mathbf{T}_d = \lambda_1 \mathbf{V}_1 \mathbf{V}_1^{*T} + \lambda_2 \mathbf{V}_2 \mathbf{V}_2^{*T} \quad (\text{IV-10})$$

Ainsi, un cluster de l'image est attribué à la classe des surfaces si l'inégalité suivante est vérifiée [Ferro-Famil 03] :

$$\lambda_1 |V_1(1)|^2 + \lambda_2 |V_2(1)|^2 > \lambda_1 |V_1(2)|^2 + \lambda_2 |V_2(2)|^2 \quad (\text{IV-11})$$

autrement le cluster est affecté à la classe de la double réflexion.

- En présence de trois mécanismes d'importance équivalente, la matrice de cohérence est associée à du bruit polarimétrique et correspond à de la diffusion de volume. Ce cas ci a été traité lors de la discrimination des zones de forêts.

Cette approche permet d'éviter le biais qui affecte le paramètre  $\bar{\alpha}$ . Un schéma bloc résumant la méthode est représenté sur la figure IV-13.

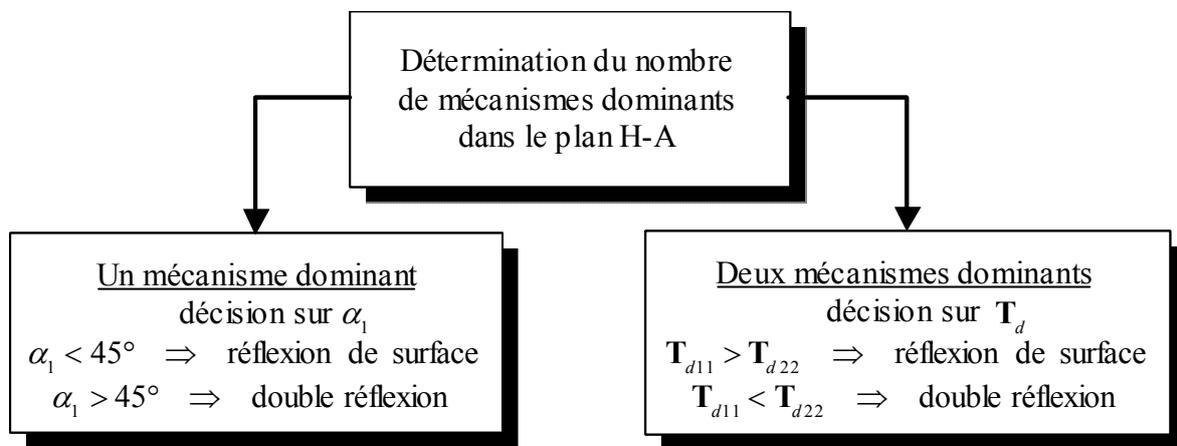


Figure IV-13 Schéma bloc de la méthode de détermination de la nature du mécanisme de rétrodiffusion

La figure IV-14 illustre les résultats de cette procédure de détection appliquée sur les données en bande L des sites test de Risoul et Izoard, situés dans les Alpes françaises.

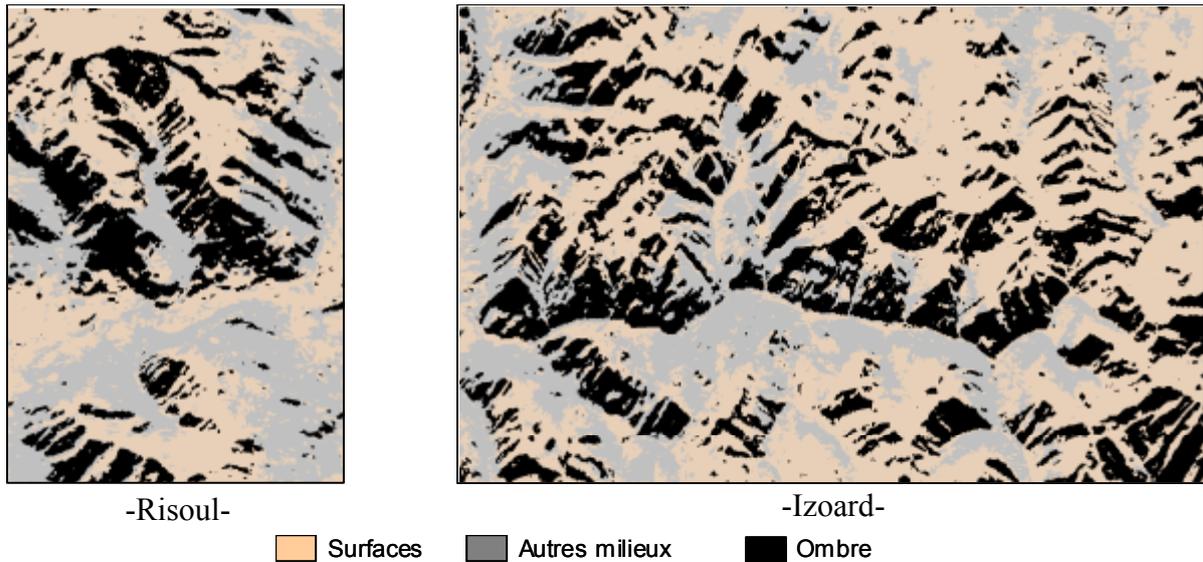


Figure IV-14 Cartographies des surfaces à partir de l'analyse des mécanismes dominants en bande L

Une comparaison visuelle de cette cartographie des surfaces avec les images optiques Landsat de la figure IV-11 est effectuée. Une méthode de validation plus précise est toutefois présentée dans la dernière partie de ce chapitre.

### IV.4.3 Détection des forêts enneigées

La détection d'un couvert neigeux est traitée indépendamment sur les surfaces et sur les forêts. L'étude préliminaire menée dans la partie I.3 et plus particulièrement les résultats du tableau IV-1, montrent que la bande L n'est pas une fréquence adaptée pour la discrimination de la neige. En effet à cette fréquence la neige est un milieu quasi "transparent" et affecte peu la réponse du signal rétrodiffusé. Le tableau IV-2 indique que la bande C est plus appropriée pour cette étude, notamment sur les régions forestières. Dans cette partie, la détection de la neige est faite par l'analyse des jeux de données d'octobre et d'avril en bande C.

A partir de la cartographie des forêts réalisée précédemment au moyen des données SAR d'octobre en bande L, une analyse menant à la détection de la neige sur les forêts est développée.

Les résultats figurant dans le tableau IV-2 indiquent que les variations temporelles de l'indicateur polarimétrique  $\bar{\alpha}$  sont sensibles à la présence d'un couvert de neige sur les zones de forêts. En effet les forêts recouvertes de neige montrent une décroissance significative du paramètre  $\bar{\alpha}$  alors que les forêts non enneigées présentent un comportement polarimétrique quasiment constant [Martini 04a]. Comme il a déjà été dit dans l'étude préliminaire, paragraphe IV-3, cette variation est générée par la présence de la couche de neige qui entraîne l'atténuation de la contribution des mécanismes de double diffusion et de diffusion volumique.

A partir de l'observation jointe de la figure IV-5-d ainsi que de la valeur moyenne et de l'écart type de  $\Delta\bar{\alpha}$ , présentées dans le tableau IV-2, il est possible de fixer un seuil de décision permettant l'identification des forêts enneigées. En effet la valeur moyenne  $\Delta\bar{\alpha}$  sur les forêts enneigées est de  $6.77^\circ$  avec un écart type de  $2.01^\circ$ . En appliquant alors une règle heuristique, couramment utilisée

chez les radaristes et qui consiste à fixer un seuil de détection à une valeur inférieure à  $V_{\text{moy}} - \frac{\Delta}{2}$ , valeur de l'ordre de  $4.76^\circ$  dans notre cas, une zone forestière recouverte de neige sera détectée si :

$$\Delta\bar{\alpha} > 4^\circ \quad (\text{IV-12})$$

Cette procédure de détection est appliquée sur les données SAR en bande C correspondant aux sites test de Risoul et d'Izoard.

La figure IV-15 illustre les zones de forêts recouvertes de neige, en bleu, et les zones restantes de forêts non recouvertes, en vert.

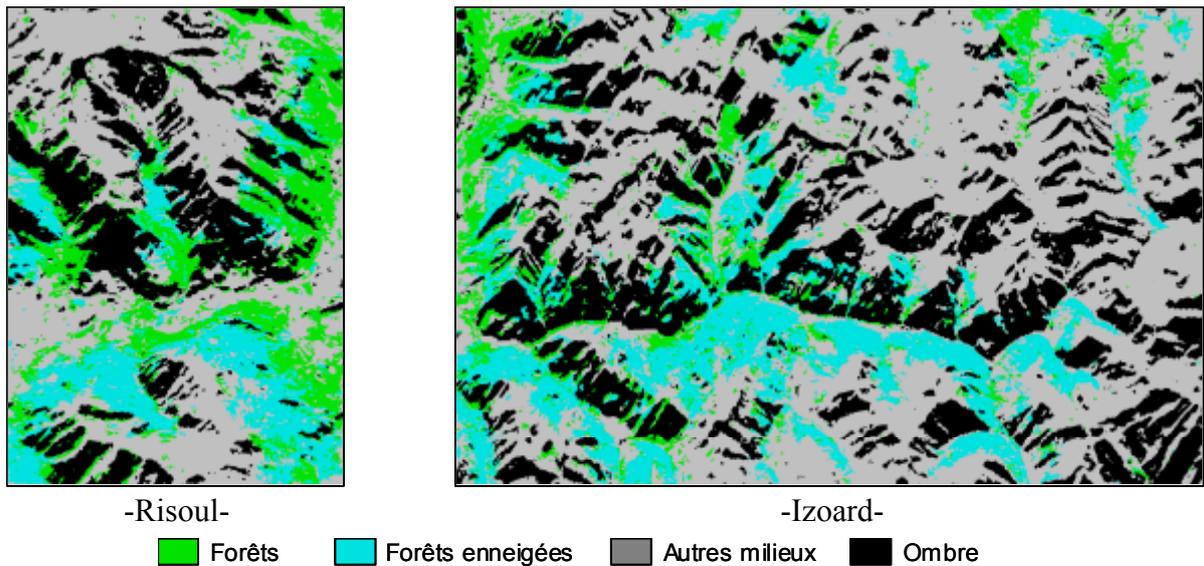


Figure IV-15 Cartographies des régions forestières enneigées

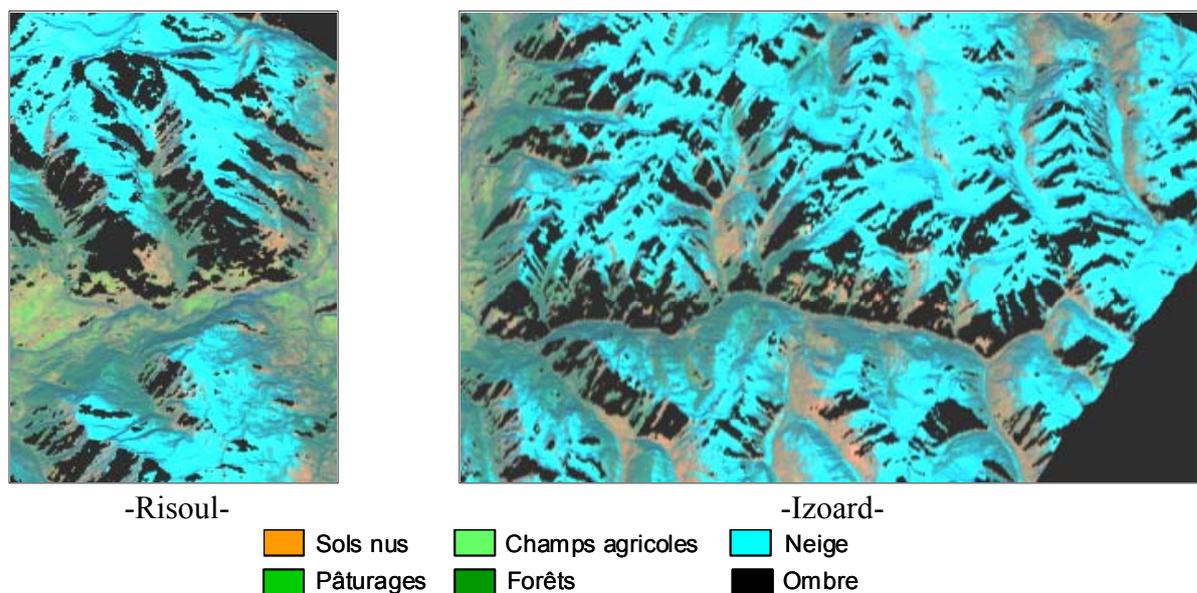


Figure IV-16 Images optiques Landsat en hiver, projetées dans le plan d'incidence radar, des sites de Risoul et Izoard

Une comparaison entre cette cartographie de la neige et les images optiques Landsat acquises en hiver, représentées sur la figure IV-16, montre que cette procédure de détection au moyen de variations temporelles du paramètre polarimétrique  $\bar{\alpha}$  est très concluante.

#### IV.4.4 Détection des surfaces enneigées

Dans la partie IV-3 de ce chapitre, il a été montré dans les tableaux IV-1 et IV-2 qu'il n'est pas possible de détecter les surfaces recouvertes de neige au moyen d'une méthode simple utilisant les variations temporelles des paramètres polarimétriques H et  $\bar{\alpha}$ .

Dans le but d'améliorer le faible contraste polarimétrique entre des surfaces enneigées et non enneigées, deux méthodes sont appliquées.

La première méthode, appelée OPCE (Optimization of Polarimetric Contrast Enhancement), est une approche traditionnelle qui optimise les états de polarisation à l'émission et à la réception pour maximiser la réponse de la cible par rapport à son environnement [Yang 00].

La seconde méthode proposée permet d'optimiser la variation du contraste polarimétrique entre les surfaces enneigées et non enneigées. Cette nouvelle procédure, appelée PCVE (Polarimetric Contrast Variation Enhancement), est supervisée et se base sur une optimisation du rapport de contraste polarimétrique temporel [Martini 04a]. Il est montré dans la suite que cette technique est plus robuste que les approches traditionnelles d'optimisation de contraste, par rapport à la topographie du milieu et à la diversité des sols recouverts par le manteau neigeux.

##### IV.4.4.1 Optimisation du Contraste Polarimétrique classique (OPCE)

L'OPCE est une technique d'optimisation polarimétrique utilisée pour la détection de cible radar. En effet il existe en général des états de polarisation pour lesquels l'amplitude de la réponse d'une cible peut être maximisée par rapport à l'amplitude de la réponse de son environnement [Boerner 93]. On parle alors du contraste polarimétrique défini comme le rapport entre l'intensité rétrodiffusée par une cible, représentée par sa matrice de Kennaugh  $\mathbf{K}_a$ , et celle rétrodiffusée par son environnement, représentée par sa matrice de Kennaugh  $\mathbf{K}_b$ , tel que :

$$\rho = \frac{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_a \mathbf{g}}{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_b \mathbf{g}} \quad (\text{IV-13})$$

où  $\mathbf{g}$  et  $\mathbf{h}$  représentent respectivement les états de polarisation des antennes à l'émission et à la réception.

Il a été montré que certains états de polarisation,  $(\mathbf{g}_{opt}, \mathbf{h}_{opt})$ , conduisent à un contraste optimal [Boerner 93]. Il apparaît donc naturel ici d'utiliser cette technique afin de trouver les états de polarisation qui optimisent la réponse d'un sol recouvert de neige par rapport à un sol nu.

La suite de cette partie pose le problème de l'optimisation du contraste polarimétrique et présente une solution, proposée dans [Yang 00], menant à l'estimation des états de polarisation maximisant la réponse rétrodiffusée d'un couvert neigeux par rapport à son environnement. Les résultats obtenus, sur les données SIR-C multi-temporelles et multi-fréquentielles au moyen de cette méthode, sont finalement présentés.

##### IV.4.4.1.a Formulation du problème

La procédure d'OPCE, utilisée dans cette étude, est une méthode itérative basée sur la formulation des états de polarisation associés au contraste optimal [Yang 00]. Les états de

polarisation des antennes d'émission et de réception sont considérés comme des variables indépendantes dans le but de résoudre le problème de l'optimisation de contraste.

Cette technique repose sur l'utilisation des matrices de Kennaugh,  $\mathbf{K}$ , construites à partir des matrices de cohérence  $\mathbf{T}$ .

Dans un cas incohérent, la technique d'OPCE consiste à trouver les états de polarisation optimaux satisfaisant :

$$[\mathbf{g}_{opt}, \mathbf{h}_{opt}] = Arg \max_{(\mathbf{g}, \mathbf{h})} \left( \rho_{opce} = \frac{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_a \mathbf{g}}{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_b \mathbf{g}} \right) \quad (IV-14)$$

$$\text{avec } g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 = h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 = 1.$$

Les vecteurs  $\mathbf{g}$  et  $\mathbf{h}$  sont les vecteurs de Stokes, normalisés par rapport à la première composante du vecteur, des antennes d'émission et de réception.

La résolution de (IV-14) permet d'obtenir les états de polarisation optimaux des antennes d'émission et de réception, ainsi que le contraste optimal. Différents algorithmes sont proposés dans la littérature pour résoudre ce problème d'optimisation [Kostinski 87], [Van Zyl 87], [Kostinski 86], [Ioannidis 79]. Une solution numérique de cette équation, proposée par [Yang 00], est donnée en annexe.

#### IV.4.4.1.b Résultats

Les données utilisées en entrée de cet algorithme d'optimisation sont multi-temporelles et multi-fréquentielles. Parmi les différentes combinaisons possibles entre les dates d'acquisition et les fréquences, une seule configuration est sélectionnée pour ses performances de détection de la neige.

Une combinaison entre les données d'octobre en bande L et celles d'avril en bande C est choisie du fait de leur influence spécifique sur le comportement électromagnétique des milieux naturels étudiés [Martini 04b]. En effet, dans le cas de la bande L, les données montrent une faible composante de diffusion volumique sur les surfaces rugueuse, même en présence de petite végétation. Au contraire, en bande C, une surface recouverte de neige a une réponse composée principalement de deux mécanismes de diffusion dominants, dont un mécanisme de diffusion volumique. Il est donc plus approprié de travailler en bande C lorsque l'on s'intéresse à un couvert neigeux reposant sur un sol.

En utilisant l'algorithme d'optimisation décrit précédemment, un couple optimal des états de polarisation  $(\mathbf{g}_{opt}, \mathbf{h}_{opt})$  est obtenu au moyen de (IV-14) pour chaque cluster de l'image et le contraste optimal relatif à ce couple est calculé avec (IV-13). Les matrices de Kennaugh  $\mathbf{K}_a$  et  $\mathbf{K}_b$  dans (IV-14) sont remplacées respectivement par  $\mathbf{K}_{C-hiver}$  et  $\mathbf{K}_{L-été}$ , les matrices de Kennaugh associées à l'image d'avril en bande C et à l'image d'octobre en bande L.

La figure IV-17 montre l'image résultant du contraste optimal appliqué à la région de Risoul.

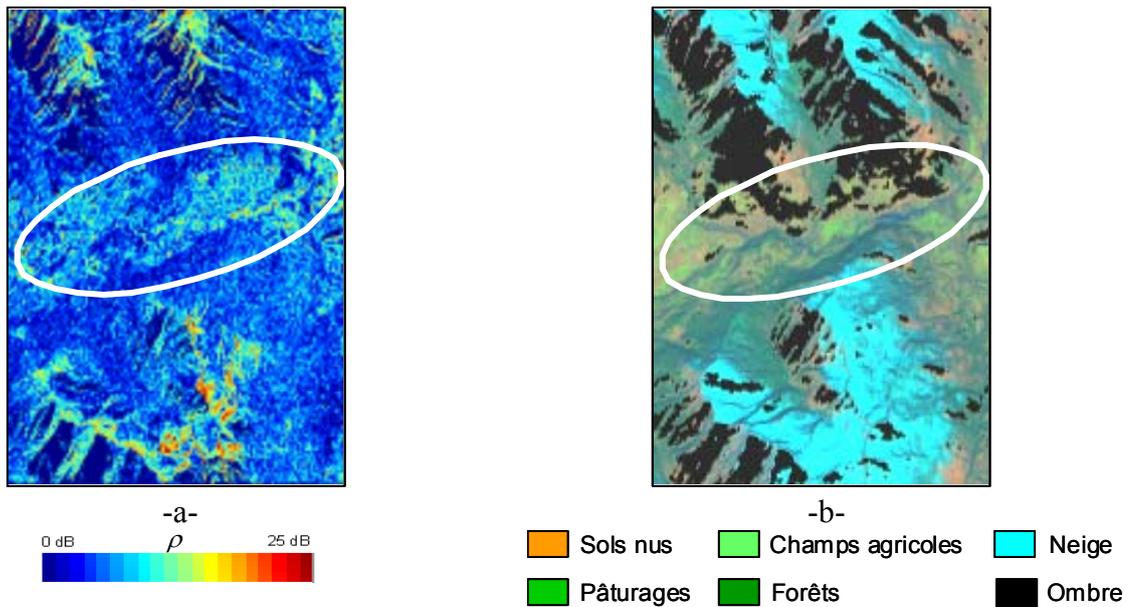


Figure IV-17 Illustration des limites de l'OPCE

-a- Image codée en couleur du contraste optimal, -b- image optique Landsat d'avril

La zone indiquée sur les images de la figure IV-17 correspond à une vallée de basse altitude et non enneigée quelle que soit la saison considérée. Toutefois, l'algorithme d'optimisation du contraste polarimétrique maximise la réponse en intensité de cette zone en hiver, entraînant une incertitude quant à la détection des zones véritablement enneigées. Cette observation montre les limitations intrinsèquement liées au principe de la méthode de l'OPCE classique pour discriminer les surfaces recouvertes de neige [Martini 04c].

En effet, l'OPCE maximise un rapport d'intensité, comme il est décrit dans (IV-14). La diffusion de surface en bande L est un phénomène très peu aléatoire, c'est à dire qu'il existe des états de polarisation particuliers, appelés minima en cross-pol ou co-pol, pour lesquels l'amplitude du signal rétrodiffusé est proche de 0. Dans de tels cas, la condition nécessaire, pour obtenir une valeur élevée du contraste, est que la bande C ne présente pas des valeurs minimales pour ces mêmes états particuliers de polarisation. Le problème est donc que cette condition est aussi bien remplie par des surfaces recouvertes de neige que par des surfaces nues, dont les propriétés physiques changent entre l'été en bande L et l'hiver en bande C, du fait de la présence de petites végétation ou des variations temporelles des caractéristiques des sols comme celles de la constante diélectrique.

#### IV.4.4.2 Maximisation de la Variation du Contraste Polarimétrique (PCVE)

##### IV.4.4.2.a Formulation du problème

La détection de la neige, au moyen de l'optimisation du contraste polarimétrique inter-saisonnier, est fortement limitée par la grande variabilité de la réponse polarimétrique des surfaces reposant sous le couvert neigeux.

Dans le but de dépasser ces limitations, une nouvelle technique, appelée PCVE (Polarimetric Contrast Variation Enhancement) et inspirée de l'OPCE, est proposée [Martini 05a]. Plutôt que d'optimiser simplement le contraste polarimétrique entre l'été et l'hiver, la méthode PCVE a pour but de déterminer l'état de polarisation,  $(\mathbf{g}_{\max}, \mathbf{h}_{\max})$ , pour lequel le contraste d'été à hiver sur les

surfaces enneigées est maximisé tout en maintenant ce contraste à de faibles valeurs sur les zones sans neige.

Il s'agit d'une technique supervisée puisque la première étape consiste à localiser deux zones d'apprentissage au sein de l'image d'avril, comme l'illustre la figure IV-19. La première est choisie complètement enneigée (zone  $a$ , en altitude) et la seconde libre de neige (zone  $b$ , dans la vallée). Les mêmes zones, non recouvertes de neige, sont sélectionnées sur l'image d'octobre. A chacune des zones  $a$  et  $b$  sont associées les matrices de Kennaugh,  $\mathbf{K}_a$  pour la zone  $a$  enneigée et  $\mathbf{K}_b$  pour la zone  $b$  dans la vallée. Ces matrices sont utilisées pour le calcul du couple  $(\mathbf{g}_{\max}, \mathbf{h}_{\max})$  dans (IV-17). Ces matrices sont extraites des jeux de données SAR acquis en avril et en octobre en bande de fréquence C.

La deuxième étape de cette méthode consiste à calculer le contraste moyen  $\rho_{neige}$  sur la zone d'apprentissage  $a$  entre l'image d'avril et celle d'octobre, défini par (IV-15).

$$\rho_{neige} = \frac{1}{N_a} \sum_{N_a} \frac{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_{a-hiver} \mathbf{g}}{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_{a-été} \mathbf{g}} \quad (IV-15)$$

De la même façon, le contraste moyen  $\rho_{sans\ neige}$ , défini par (IV-16), est calculé pour la zone d'apprentissage  $b$ .

$$\rho_{sans\ neige} = \frac{1}{N_b} \sum_{N_b} \frac{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_{b-hiver} \mathbf{g}}{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_{b-été} \mathbf{g}} \quad (IV-16)$$

La troisième étape repose sur la détermination de l'état de polarisation maximal  $(\mathbf{g}_{\max}, \mathbf{h}_{\max})$  qui optimise la variation de contraste entre  $\rho_{neige}$  et  $\rho_{sans\ neige}$  [Martini 05a], [Martini 05c]:

$$[\mathbf{g}_{\max}, \mathbf{h}_{\max}] = Arg \max_{(\mathbf{g}, \mathbf{h})} \left( \frac{\rho_{neige}}{\rho_{sans\ neige}} \right) = Arg \max_{(\mathbf{g}, \mathbf{h})} \left( \frac{\frac{1}{N_a} \sum_{N_a} \frac{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_{a-hiver} \mathbf{g}}{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_{a-été} \mathbf{g}}}{\frac{1}{N_b} \sum_{N_b} \frac{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_{b-hiver} \mathbf{g}}{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_{b-été} \mathbf{g}}} \right) \quad (IV-17)$$

$$\text{avec } g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 = h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 = 1.$$

$N$  dénote le nombre de pixels constituant les zones d'apprentissage sélectionnées sur les images et les indices  $a$  et  $b$  sont respectivement liés aux surfaces enneigées (zone  $a$ ) et non enneigées (zone  $b$ ).

Cet état optimal de polarisation  $(\mathbf{g}_{\max}, \mathbf{h}_{\max})$  maximise la réponse des surfaces enneigées tout en minimisant celle des surfaces non recouvertes de neige.

La dernière étape de cette approche d'optimisation consiste à appliquer cet état de polarisation à l'ensemble des données afin de discriminer toutes les surfaces enneigées de l'image.

Un rapport  $\rho_{pcve}$  est alors calculé à partir du couple unique  $(\mathbf{g}_{\max}, \mathbf{h}_{\max})$  pour chaque cluster des images d'été et d'hiver comme :

$$\rho_{pcve} = \frac{\mathbf{h}_{\max}^T \mathbf{K}_{hiver} \mathbf{g}}{\mathbf{h}_{\max}^T \mathbf{K}_{été} \mathbf{g}} \quad (IV-18)$$

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

La figure IV-18 illustre les étapes principales de la technique PCVE.

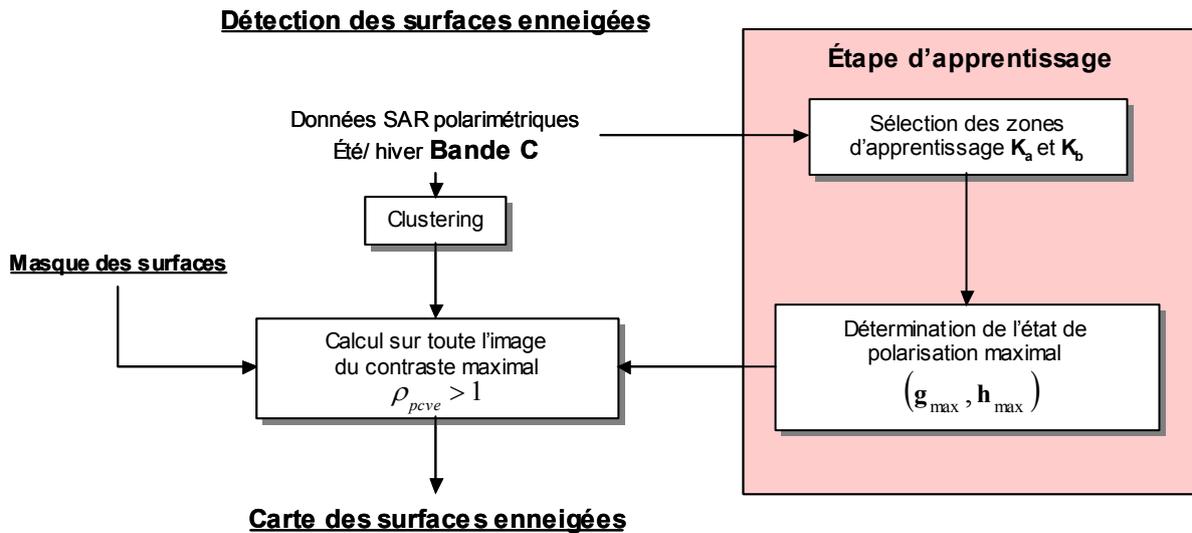


Figure IV-18 Algorithme de déroulement de la PCVE

#### IV.4.4.2.b Application

La méthode est appliquée aux données SAR polarimétriques multi-temporelles en bande C des sites de Risoul et Izoard.

La phase d'apprentissage de la méthode est traitée uniquement à partir des données radar polarimétriques du site de Risoul. A partir des images optiques Landsat acquises aux mêmes époques que les données SIR-C, deux zones d'apprentissage *a* et *b*, comme définies précédemment, sont sélectionnées sur les images radar d'avril et d'octobre. Les matrices de Kennaugh,  $K_a$  et  $K_b$ , associées à ces zones sont extraites des données SAR en été et en hiver et fournies à l'algorithme d'optimisation défini en (IV-17).

La figure IV-19 représente une image de Pauli du site de Risoul, à gauche. L'image de droite est une partie agrandie de celle de gauche sur laquelle sont délimitées les deux zones *a* et *b*.

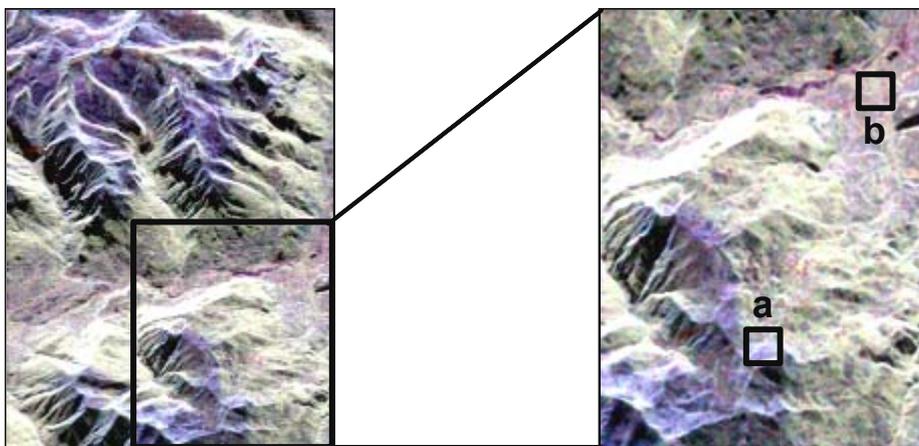


Figure IV-19 Sélection sur le site de Risoul des zones d'entraînement



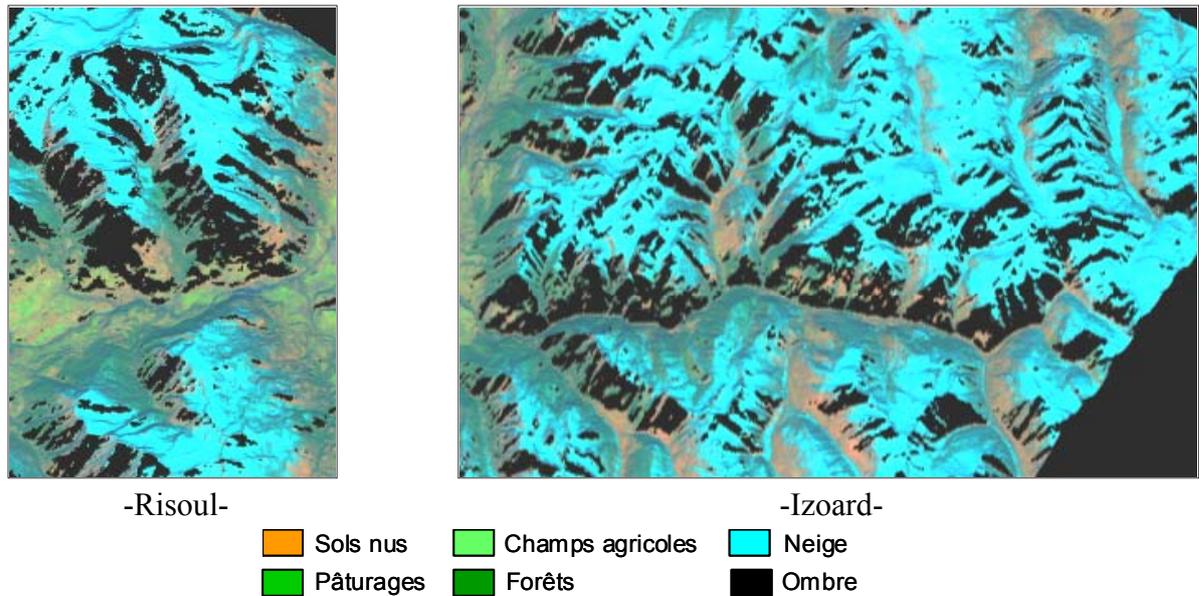


Figure IV-21 Images optiques Landsat en hiver, projetées dans le plan d'incidence radar, des sites de Risoul et Izoard

Il est à noter que l'application de cette procédure en bande L mène à des résultats de détection de moindre qualité. En effet, ces mauvaises performances s'expliquent par le fait qu'à cette fréquence le mécanisme de diffusion volumique généré par le couvert neigeux a une importance relativement faible.

### IV.4.5 Cartographie globale multi-fréquentielle du couvert neigeux

#### IV.4.5.1 Représentation de l'ensemble du couvert neigeux

Les résultats de discrimination de la neige sur les surfaces et sur les forêts, obtenus à partir de l'approche multi-temporelle et multi-fréquentielle, sont regroupés. Une cartographie de l'ensemble du couvert neigeux sur les sites de Risoul et d'Izoard est illustrée par la figure IV-22.

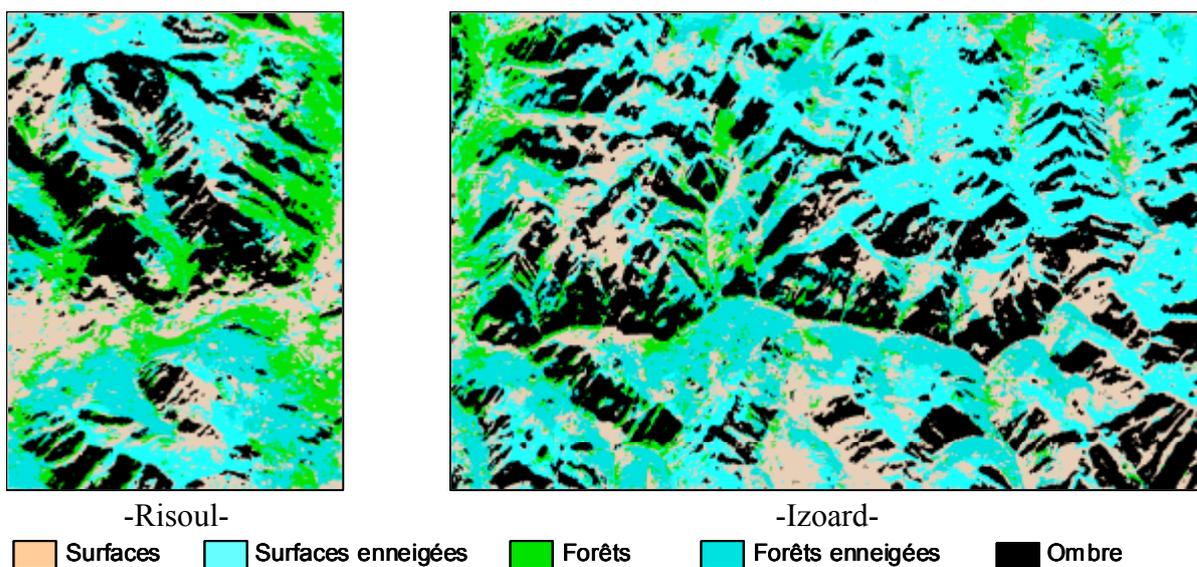


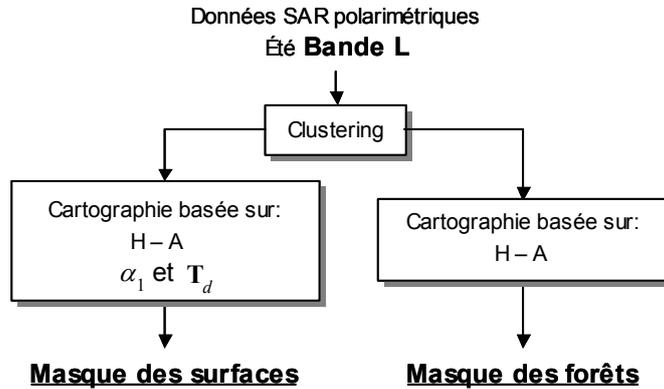
Figure IV-22 Cartographies de l'ensemble du couvert neigeux élaborées au moyen de l'approche multi-fréquentielle

Une comparaison de la cartographie élaborée à partir des données SAR avec l'image optique Landsat d'hiver reflète une bonne adéquation de ces deux représentations.

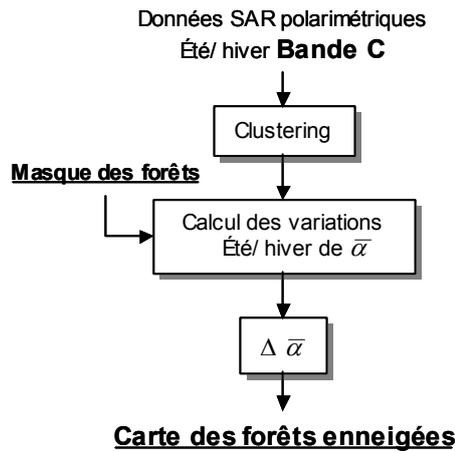
**IV.4.5.2 Algorithme de synthèse**

La figure IV-23 illustre les trois étapes principales de la cartographie de la neige pour le cas multi-temporel et multi-fréquentiel.

**Première étape: Classification des milieux sous jacents**



**Deuxième étape: Détection des forêts enneigées**



**Troisième étape: Détection des surfaces enneigées**

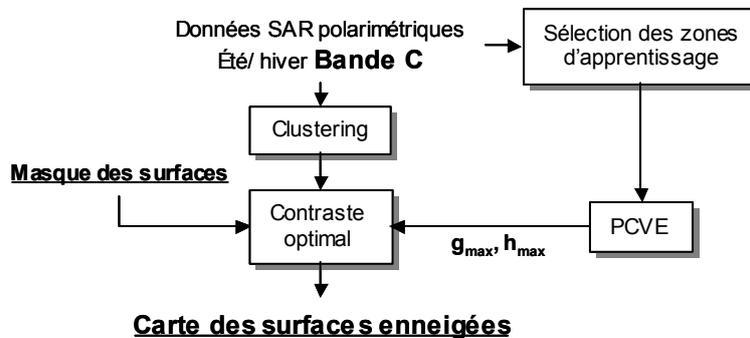


Figure IV-23 Algorithme de synthèse de l'approche multi-fréquentielle

## **IV.5 Approche multi-temporelle et mono-fréquentielle en bande C**

Dans l'optique de respecter les contraintes actuelles des nouveaux capteurs SAR, tels que RADARSAT-2, qui travaillent en mono-fréquence, il apparaît judicieux de mettre au point des traitements mono-fréquentiels. Les procédures de détection de la neige, présentées précédemment dans ce chapitre, ont été développées en bande C. Cette partie a donc pour but d'élaborer une cartographie des milieux naturels à partir des données SIR-C acquises en été non plus en bande L, mais en bande C [Martini 05b], [Martini 05c].

Le comportement polarimétrique d'une scène apparaît différent selon la fréquence d'observation utilisée. En effet, la diminution de la longueur d'onde relative à l'emploi de la bande C entraîne une sensibilité accrue de la réponse SAR à des diffuseurs de petites tailles. De ce fait, les milieux tels que des champs agricoles ou des zones recouvertes de petites végétations apparaissent plus aléatoires qu'en bande L et donnent lieu à un contraste moins marqué vis à vis des zones de forêts. Dans cette partie, des techniques de discrimination des milieux naturels résultant de l'application directe des méthodes développées en bande L au cas de la bande C sont comparées à des méthodes élaborées spécifiquement pour la bande C. Les procédures de discrimination présentées restent des méthodes hiérarchiques et exclusives, la détection des zones de surfaces résultant de la localisation au préalable des régions forestières.

### **IV.5.1 Application à la bande C de la méthode développée en bande L**

#### **IV.5.1.1 Détection des forêts**

La procédure de discrimination de la forêt basée sur l'entropie et l'anisotropie, employée en bande L, est appliquée au cas de la bande C.

Les quatre combinaisons entre l'entropie et l'anisotropie, présentées dans la partie I-4, sont appliquées aux données SIR-C en bande C et une illustration en est donnée sur la figure IV-24. Les mêmes remarques, que celles apportées en bande L pour les combinaisons  $HA$ ,  $A(1-H)$ ,  $(1-H)(1-A)$ , peuvent être faites. Aucune de ces trois combinaisons ne fournit assez d'information pour différencier un milieu naturel d'un autre sur ce site test.

La combinaison  $H(1-A)$  demeure être celle qui possède le plus grand contraste entre les différents milieux naturels constitutifs de ce site alpin.

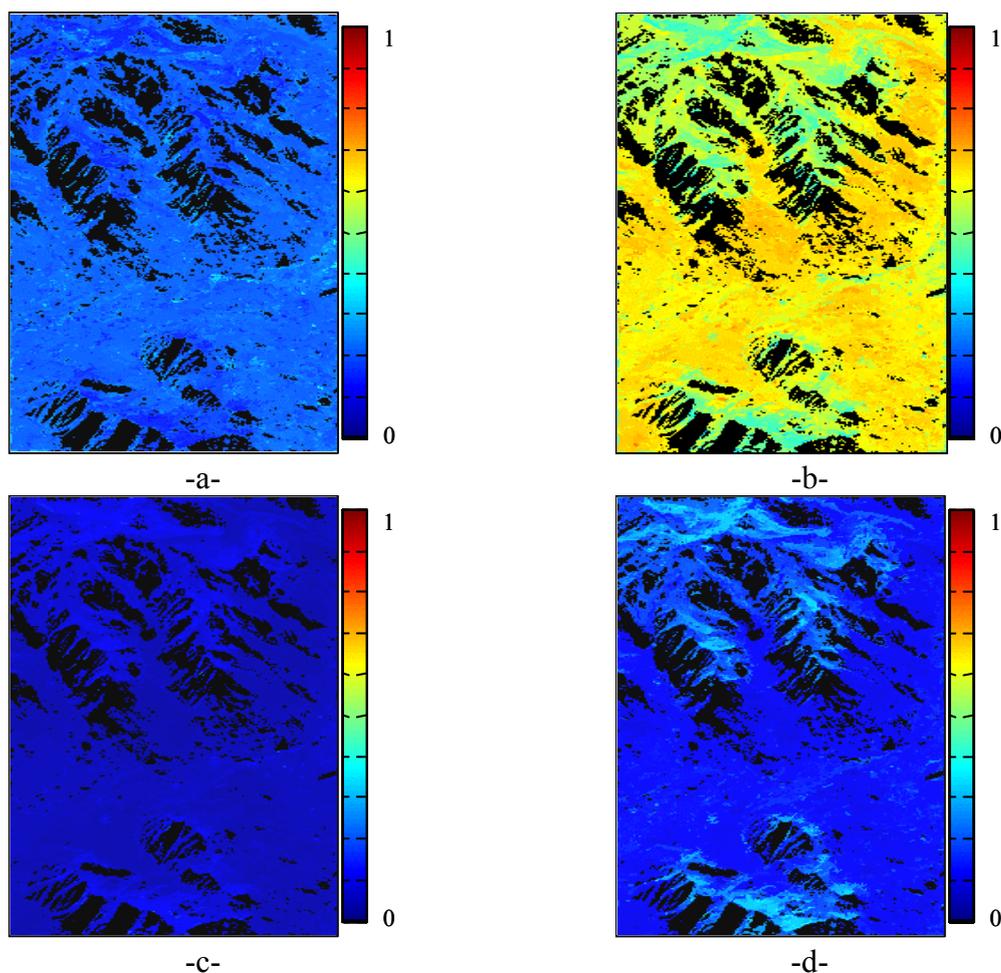


Figure IV-24 Représentation des quatre combinaisons entre l'entropie et l'anisotropie en bande C  
 -a-  $HA$ , -b-  $H(1-A)$ , -c-  $(1-H)A$ , -d-  $(1-H)(1-A)$

L'algorithme développé à partir de la bande L et résumé par l'équation (IV-8) est appliquée sur les données d'octobre acquises en bande C. La figure IV-25 représente le résultat obtenu sur les sites de Risoul et d'Izoard.

Cette cartographie des forêts est comparée à celle obtenue en bande L, figure IV-10. En bande C l'étendue des zones détectées comme des forêts est plus vaste. En effet, en bande L les régions de surfaces recouvertes de faible végétation ont une réponse qui correspond à un mécanisme de diffusion de surface, alors qu'en bande C une composante de diffusion volumique apparaît. Cette différence provient du fait qu'une plus grande longueur d'onde pénètre plus la petite végétation, engendrant ainsi une réponse rétrodiffusée principalement par le sol [Freeman 98].

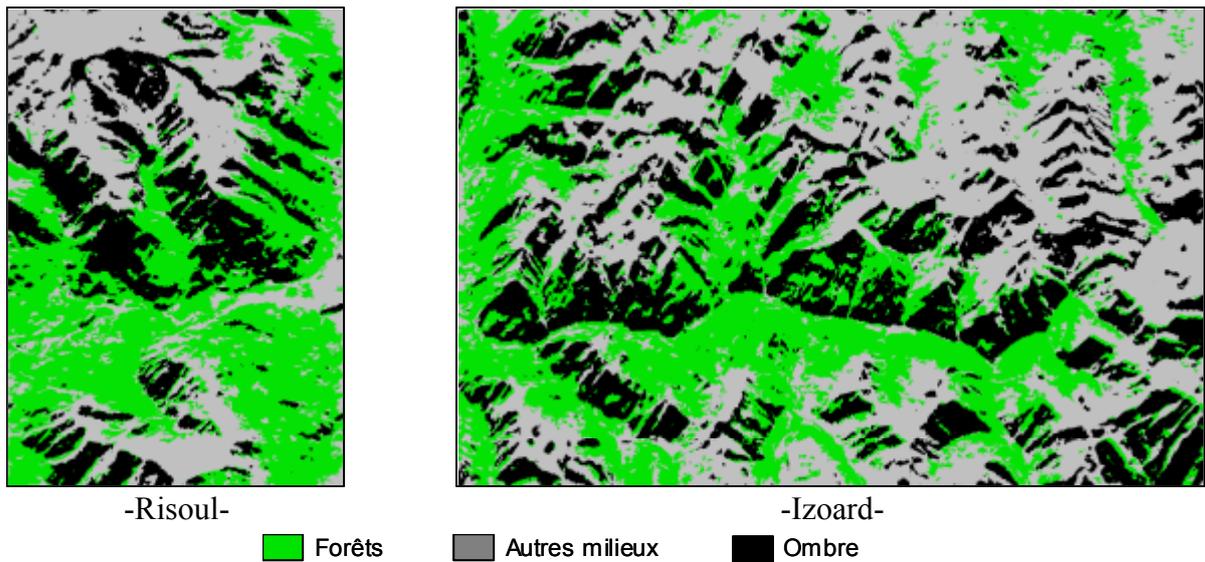


Figure IV-25 Cartographies des forêts à partir de la combinaison  $H(1 - A)$  appliquée à la bande C

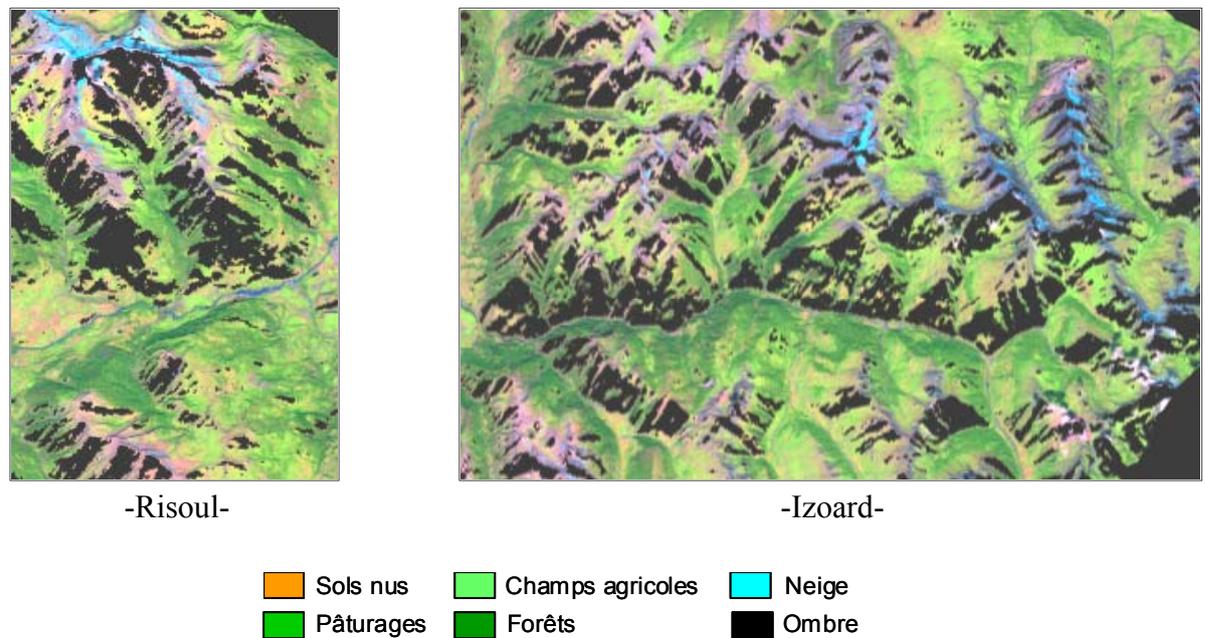


Figure IV-26 Images optiques Landsat en été, projetées dans le plan d'incidence radar, des sites de Risoul et Izoard

#### IV.5.1.2 Détection des surfaces

La procédure de détection des surfaces, développée dans le cas de la bande L et relatée dans la partie I-4-2, est appliquée ici aux données SAR polarimétriques en bande C des sites de Risoul et Izoard.

Comme l'expose la figure IV-27, certaines surfaces ne sont plus détectées comme telles du fait de la présence du couvert végétal dont la réponse présente un caractère volumique plus important en bande C. Ces zones de petites végétations ont été détectées comme des forêts par la procédure de discrimination basée sur l'entropie et l'anisotropie.

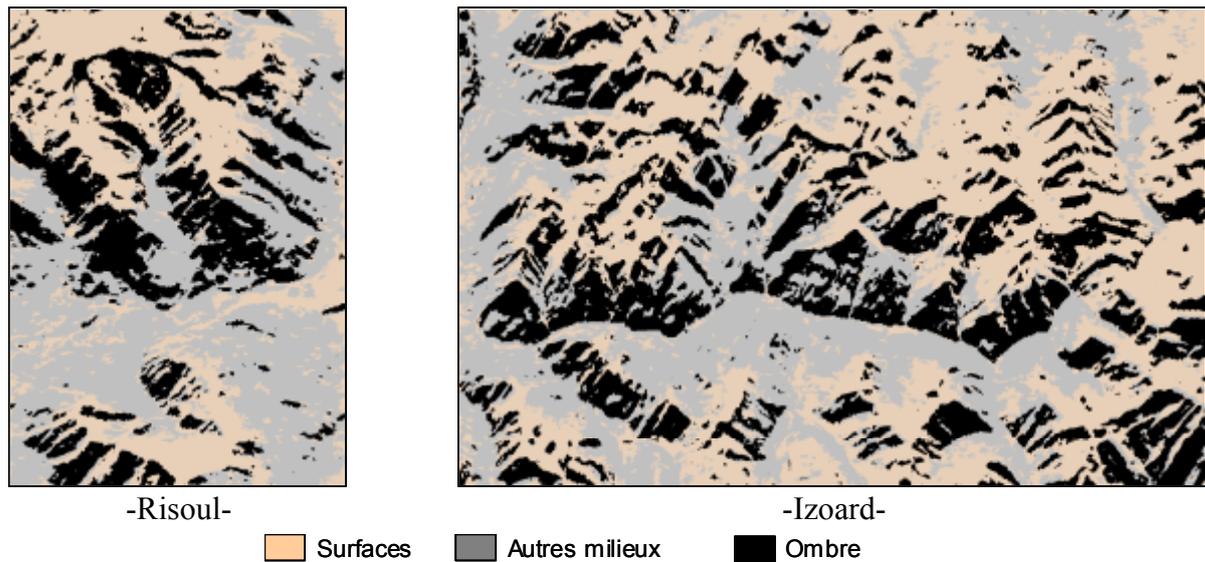


Figure IV-27 Cartographies des surfaces à partir de l'analyse des mécanismes dominants en bande C

Une comparaison entre l'image Landsat d'octobre, la cartographie des surfaces en bande L, représentée sur la figure IV-14, et la cartographie de la figure IV-27 indique qu'environ 80% des surfaces restent cependant correctement discriminées par cette méthode.

#### IV.5.1.3 Détection des forêts enneigées

La discrimination de la neige sur les régions de forêt dépend d'une part de la méthode utilisée pour localiser la neige mais aussi d'une cartographie rigoureuse des forêts. La procédure de détection de la neige appliquée a été présentée et validée dans la partie IV-4-4. Elle est définie par les variations temporelles de l'indicateur  $\bar{\alpha}$  à partir des données acquises en bande C.

La figure IV-28 illustre les régions de forêts enneigées en bleu et les forêts sans neige en vert, obtenues pour une cartographie estivale des forêts basée sur la combinaison,  $H(1 - A)$ , en bande C. Une comparaison entre ce résultat, celui obtenu par l'approche multi-fréquentielle et l'image Landsat d'avril montre qu'une grande partie des régions enneigées sont effectivement détectées. Le détail des performances de détection est exposé dans la dernière partie de ce chapitre.

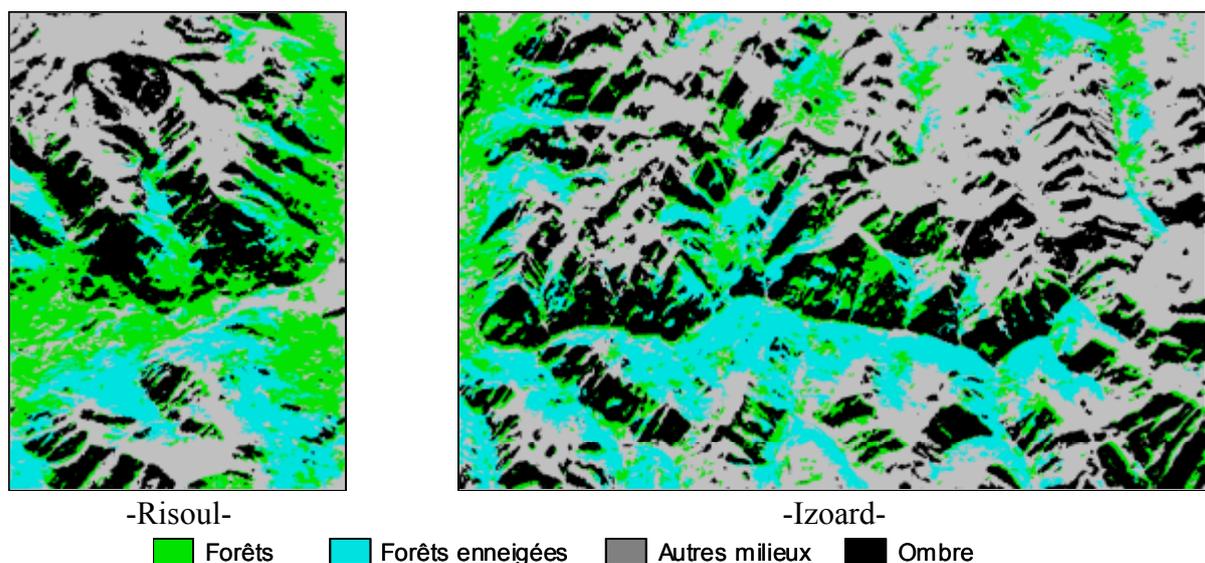


Figure IV-28 Cartographies de la neige sur les forêts, localisées au moyen de la combinaison  $H(1-A)$

#### IV.5.1.4 Détection de surfaces enneigées

De même que pour les forêts, la détection des régions de surface recouvertes de neige dépend fortement de la cartographie estivale générée. La méthode utilisée pour la détection de la neige est présentée dans la partie IV-4-5-1 et se base sur une optimisation de la variation du contraste polarimétrique.

La procédure de discrimination de la neige, exposée sur la figure IV-29, est appliquée sur les régions de surfaces cartographiées à partir de l'analyse des mécanismes dominants des données d'octobre en bande C. La comparaison de ce résultat avec celui de la figure IV-20, obtenu pour l'approche multi-fréquentielle, indique que la cartographie estivale en bande C ne modifie pas les résultats de détection de la neige.

L'observation jointe de l'image optique en hiver avec la figure IV-29 révèle que la plupart des surfaces enneigées sont détectées.

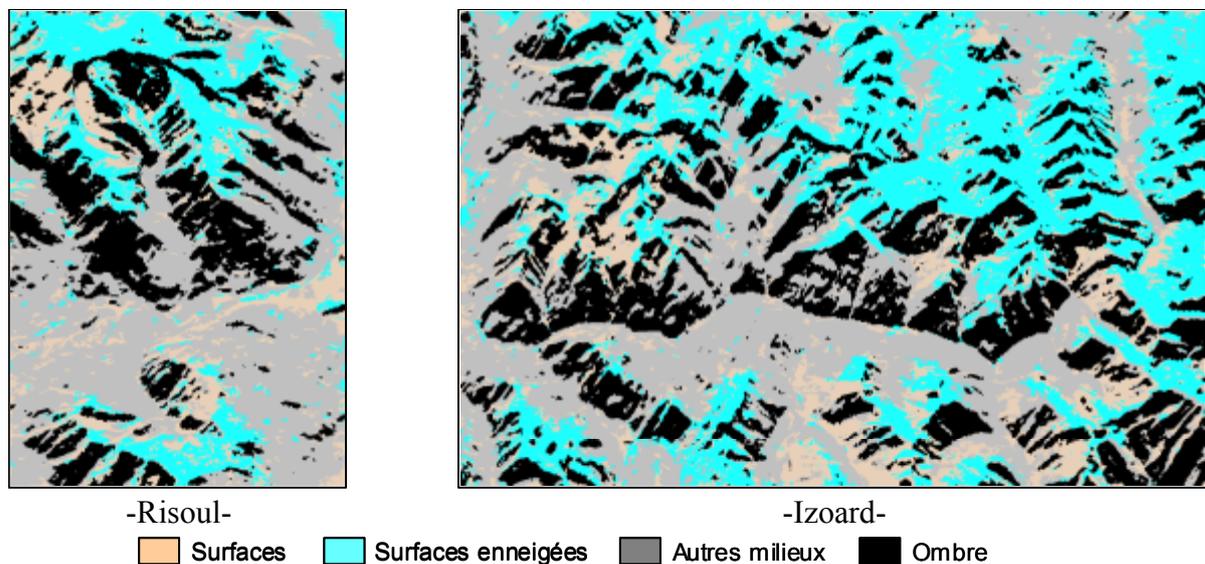


Figure IV-29 Cartographies de la neige sur les surfaces, localisées au moyen d'une analyse des mécanismes dominants

### IV.5.2 Méthodes adaptées à la bande C

#### IV.5.2.1 Détection des forêts : Procédure basée sur l'entropie seule

Une procédure de discrimination des forêts propre à la bande C et basée sur l'entropie seule est proposée.

En effet, il a déjà été mentionné dans le chapitre I que les milieux ayant une réponse très aléatoire sont caractérisés par une forte entropie. La décomposition du plan  $H-\bar{\alpha}$ , abordée dans le chapitre I, indique qu'une cible à un comportement aléatoire si la valeur de l'entropie est supérieure à 0.9. En pratique les régions de forêts sont estimées en bande C à partir d'un seuil défini par [Martini 05c] :

$$H > 0.85 \quad (IV-20)$$

La figure IV-30 illustre le résultat obtenu à partir de (IV-20).

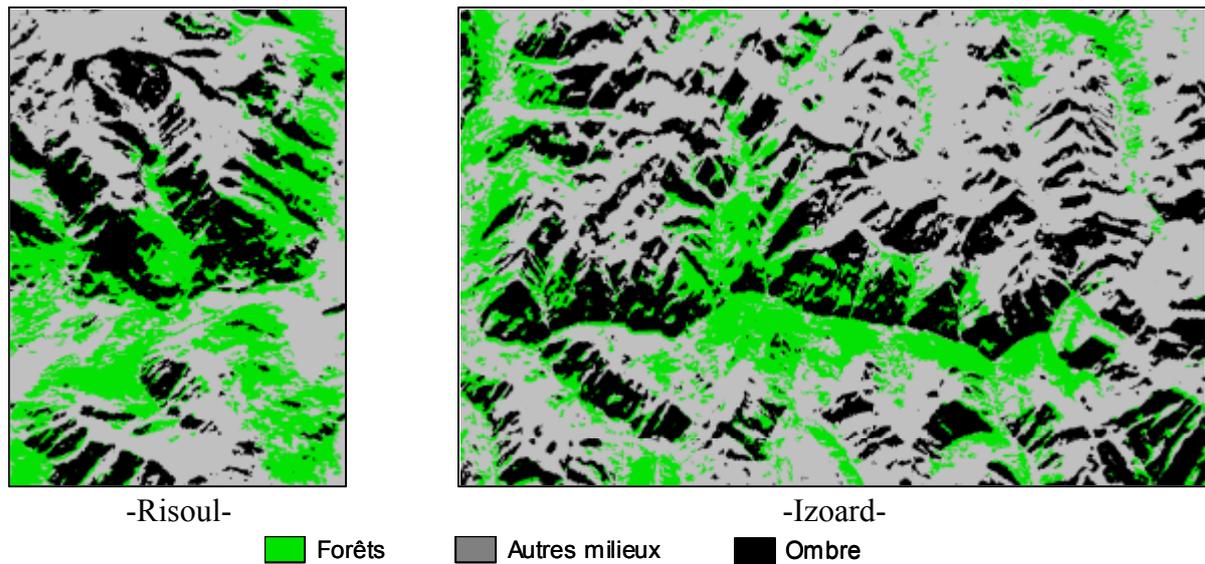


Figure IV-30 Cartographies des forêts en bande C à partir de l'entropie seule

Cette méthode, contrairement à la précédente, estime nettement moins de régions forestières et peut mener à une sous estimation de la détection de la neige sur ces régions.

#### IV.5.2.2 Détection des surfaces : Procédure basée sur l'angle $\bar{\alpha}$

La détection des zones de surfaces est restreinte aux régions qui n'ont pas été localisées comme de la forêt et dépend grandement de la bande de fréquence. Les zones de surfaces nues, dont la réponse est déterministe, peuvent être localisées au moyen du paramètre polarimétrique  $\bar{\alpha}$  [Cloude 97]. La décomposition du plan H- $\bar{\alpha}$  associe les valeurs de l'angle  $\bar{\alpha}$  inférieures à  $40^\circ$  à des cibles de type déterministe. Cet indicateur est lié par définition à l'entropie, H, de la cible. Ainsi pour des valeurs de  $\bar{\alpha}$  inférieures à  $40^\circ$ , les zones de forêts à forte entropie sont automatiquement exclues de la sélection. Une zone de surface est alors déterminée comme telle si [Martini 05c]:

$$\bar{\alpha} < 40^\circ \quad (IV-21)$$

Cette procédure de détection est appliquées sur les données en bande C des sites de Risoul et Izoard. Une représentation du résultat obtenu est donnée par la figure IV-31.

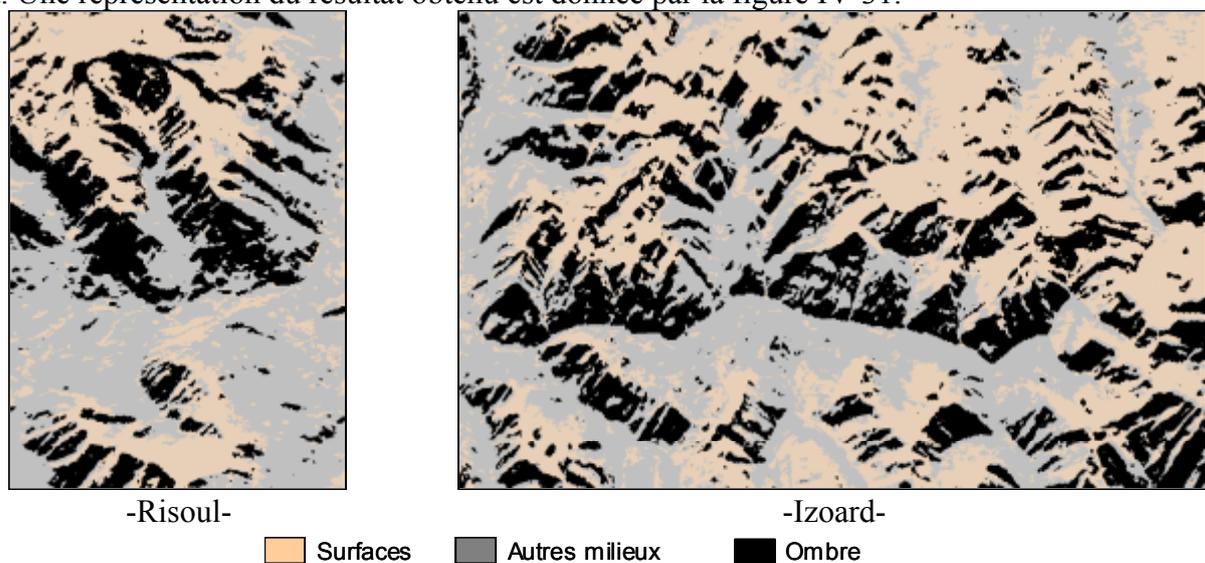


Figure IV-31 Cartographies des surfaces en bande C à partir de l'indicateur polarimétrique  $\bar{\alpha}$

Cette cartographie des sols nus ne présente pas de différence significative avec celle obtenue à partir de l'analyse des mécanismes dominants.

#### IV.5.2.3 Détection de la petite végétation

Les procédures de cartographie des forêts et des surfaces, élaborées à partir de l'entropie seule et de l'angle  $\bar{\alpha}$ , n'attribuent certaines zones à aucunes des classes existantes et nécessitent donc la création d'une troisième classe. Cette classe est définie par les régions de surfaces recouvertes de petites végétations et est caractérisée par :

$$(\bar{\alpha} > 40^\circ) \& (H < 0.85) \quad (IV-22)$$

La figure IV-32 illustre une cartographie de la classe de petites végétations, pour les sites de Risoul et d'Izoard.

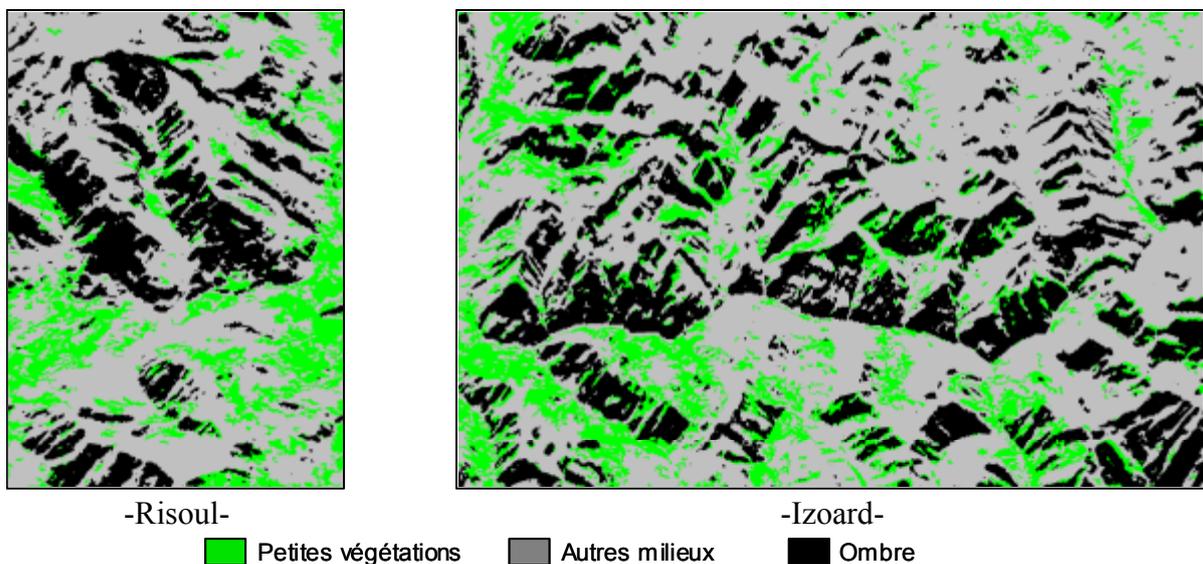


Figure IV-32 Cartographies de la petite végétation en bande C

En raison du caractère hiérarchique et exclusif des méthodes de discrimination des milieux naturels sous jacents présentées dans cette partie, il est attendu que cette nouvelle classe, complémentaire des régions de forêts et de surfaces, soit en majorité constituée de zones forestières. En effet la technique de localisation reposant sur l'entropie seule, appliquée pour détecter les milieux fortement aléatoires, sous estime les zones de forêts. Ces zones, non discriminées par l'entropie, se retrouvent alors dans la classe de la petite végétation.

#### IV.5.2.4 Détection des forêts enneigées

La procédure de détection de la neige sur les forêts, au moyen d'une différence temporelle du paramètre  $\bar{\alpha}$ , est appliquée sur les zones cartographiées des données en bande C.

La figure IV-33 représente les régions forestières enneigées en bleu et non enneigées en vert, dont la cartographie estivale est le résultat de la procédure de détection basée sur l'entropie seule. L'inconvénient principal de cette méthode est sa tendance à sous estimer les forêts et de ce fait les forêts enneigées.



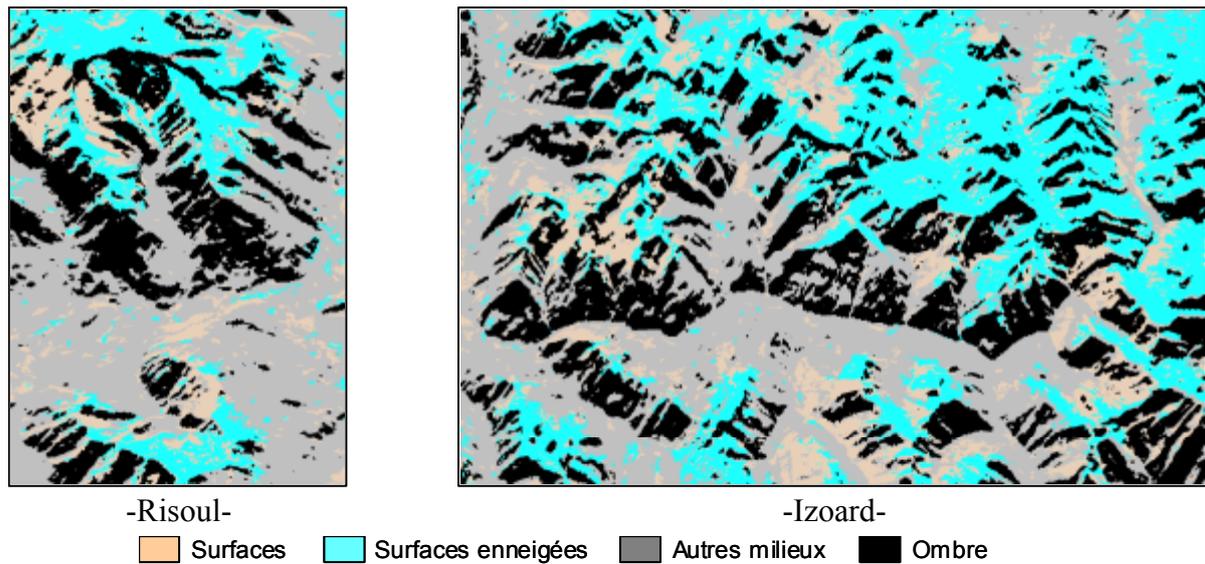


Figure IV-35 Cartographies de la neige sur les surfaces localisées au moyen de l'indicateur  $\bar{\alpha}$

Il apparaît que la présence de neige est bien estimée, malgré une sous estimation en bande C de la détection des régions de surface. En effet les régions de surface non détectées sont principalement des zones de basses altitudes et donc non recouvertes de neige. Contrairement aux zones de forêts, la sous estimation des surfaces n'engendre pas une sous estimation des zones enneigées.

#### IV.5.2.6 Détection de la neige sur la petite végétation

La procédure de détection de la neige appliquée sur cette classe est celle employée pour discriminer la neige sur les régions forestières. Elle met en évidence des zones de forêts enneigées qui avaient été sous estimées par la procédure de détection des forêts au moyen de l'entropie seule. La figure IV-36 illustre ce résultat.

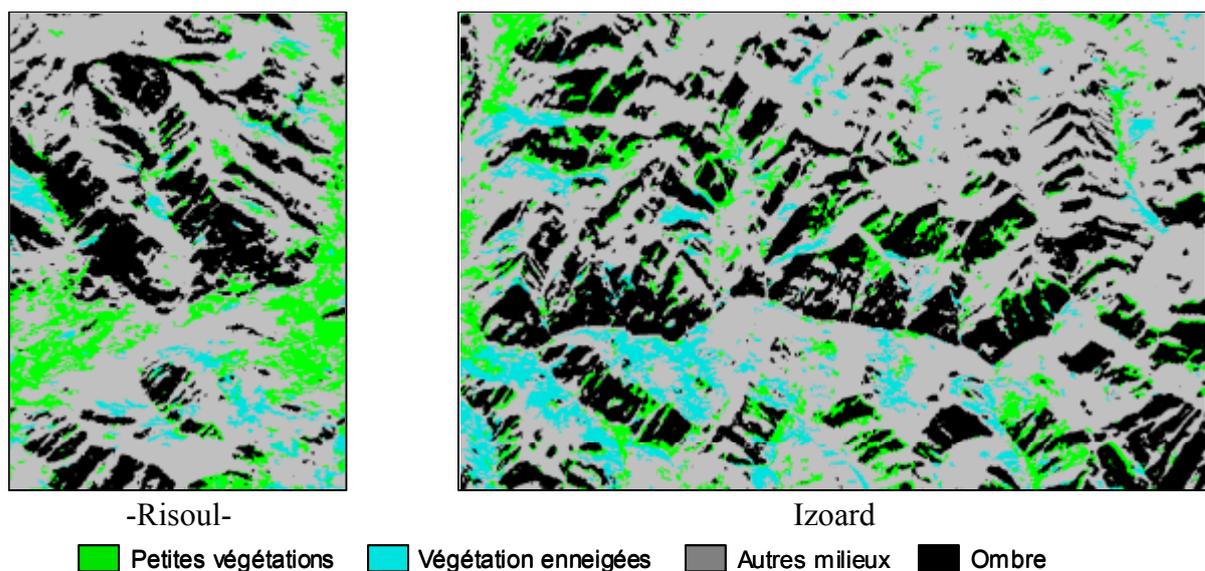


Figure IV-36 Cartographies de la neige sur les régions de petites végétations

Il apparaît désormais manifeste que cette classe peut être incluse dans la classe des forêts et traitée comme telle.

### IV.5.3 Cartographie globale mono-fréquentielle du couvert neigeux

#### IV.5.3.1 Représentation de l'ensemble du couvert neigeux

Les résultats de discrimination de l'ensemble du couvert neigeux à partir des deux approches mono-fréquentielles proposées sont présentés sur les figures IV-37 et IV-38.

Une comparaison des cartographies élaborées à partir des données SAR en bande C avec l'image optique Landsat d'hiver reflète une détection de la neige globalement satisfaisante mais néanmoins moins bonne qu'avec l'approche multi-fréquentielle.

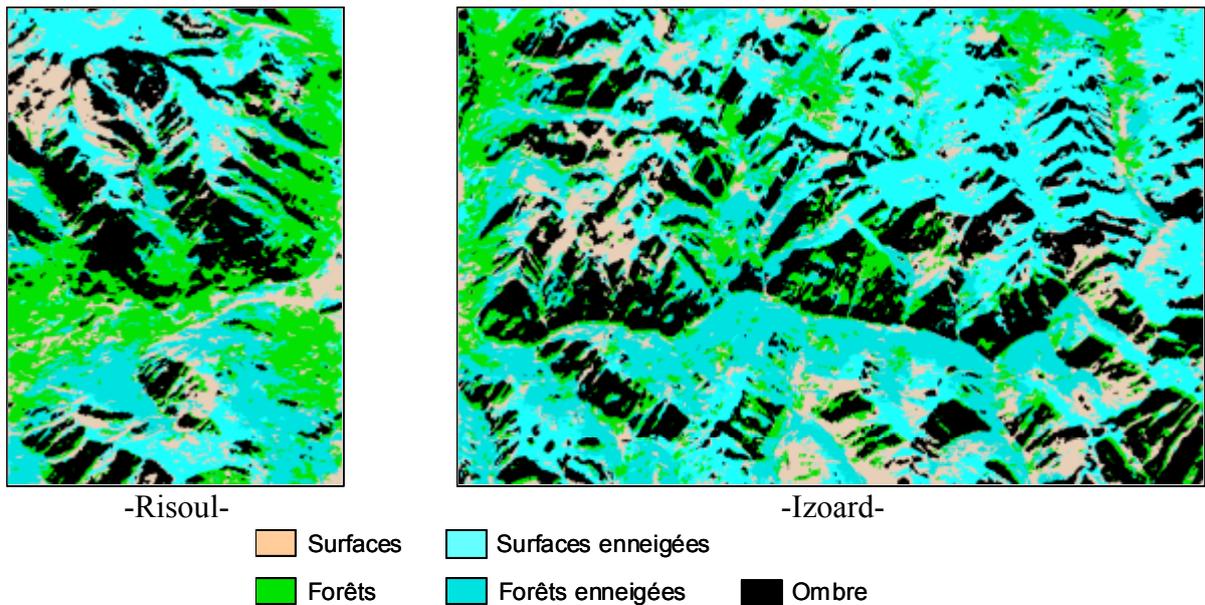


Figure IV-37 Cartographies de l'ensemble du couvert neigeux correspondant à l'approche mono-fréquentielle développée à partir des techniques de la bande L

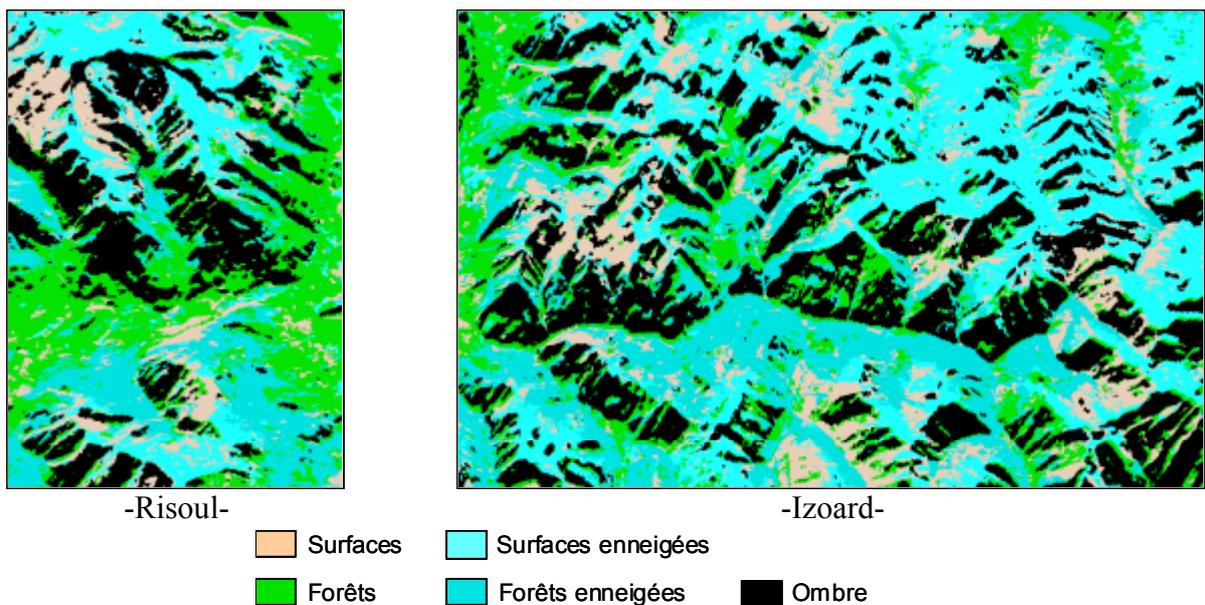


Figure IV-38 Cartographies de l'ensemble du couvert neigeux correspondant à l'approche mono-fréquentielle adaptée à la bande C

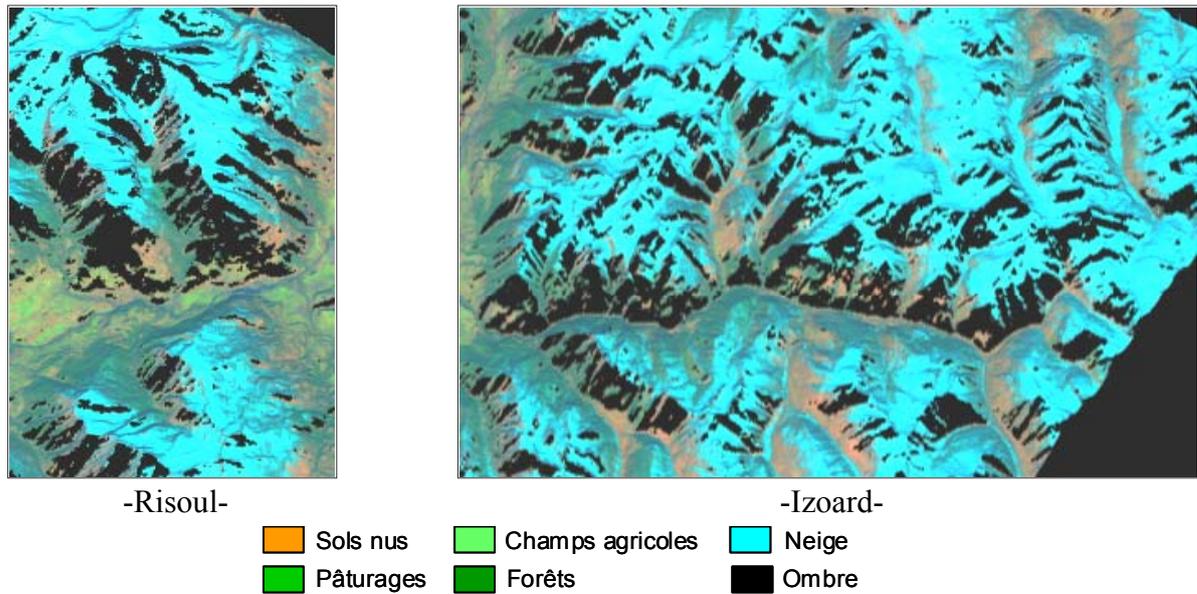
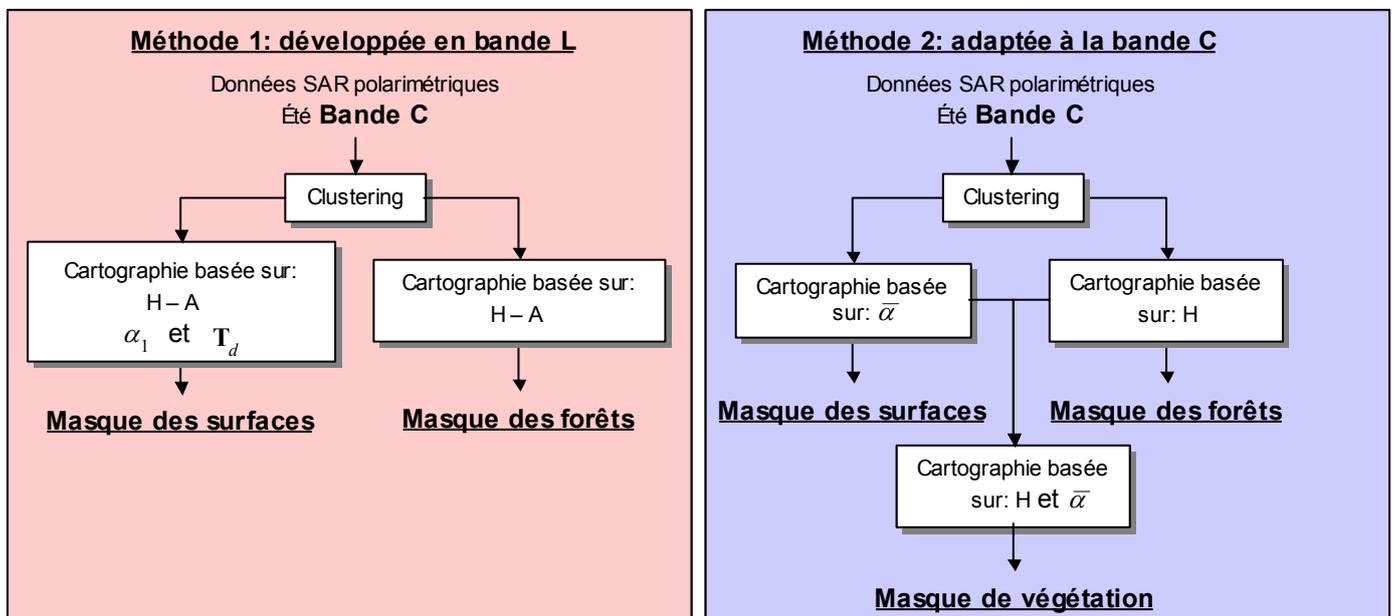


Figure IV-39 Images optiques Landsat en hiver, projetées dans le plan d'incidence radar, des sites de Risoul et Izoard

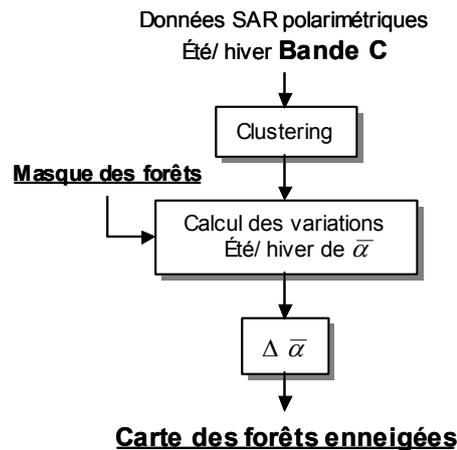
### IV.5.3.2 Algorithme de synthèse des deux méthodes

La figure IV-40 représente les algorithmes de synthèse des deux méthodes de cartographie de la neige mono-fréquentielles développées dans cette partie.

#### Première étape: Classification des milieux sous jacents



**Deuxième étape: Détection des forêts enneigées**



**Troisième étape: Détection des surfaces enneigées**

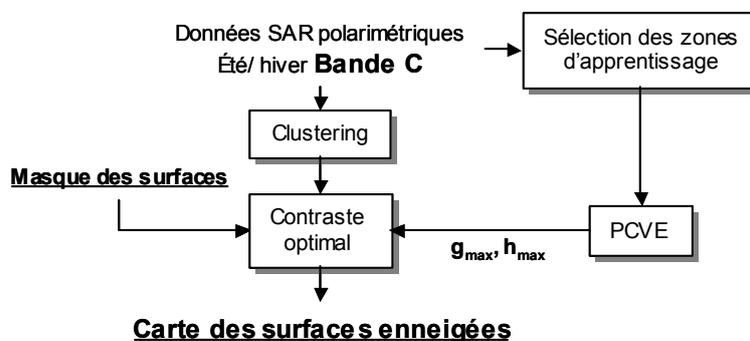


Figure IV-40 Algorithmes de synthèse des approches mono-fréquentielles de détection de la neige

## IV.6 Estimation des performances

Les performances des algorithmes de cartographie sont estimées à partir des images optiques Landsat, ainsi que des informations sur l'enneigement des sites telles que la connaissance de la limite basse de la neige. Des zones de test sont sélectionnées de façon équi-répartie sur les sites d'étude au moyen des images d'hiver Landsat dans le but de générer une carte de référence. Cette carte est constituée de 4 classes correspondant aux 2 types de milieux présents sur le site, surface ou forêt, en l'absence ou en présence de neige.

### IV.6.1 Approche multi-temporelle et multi-fréquentielle

#### IV.6.1.1 Site de Risoul

Les résultats de la cartographie d'hiver du site de Risoul obtenue à partir de l'approche multi-fréquentielle, sont comparés à la carte de référence établie pour ce site. La figure IV-41 est une représentation des zones de référence sélectionnées sur l'image optique Landsat et codées en couleur en fonction de leur classe d'appartenance. La figure IV-41-c montre le résultat de la classification sur les zones de test.

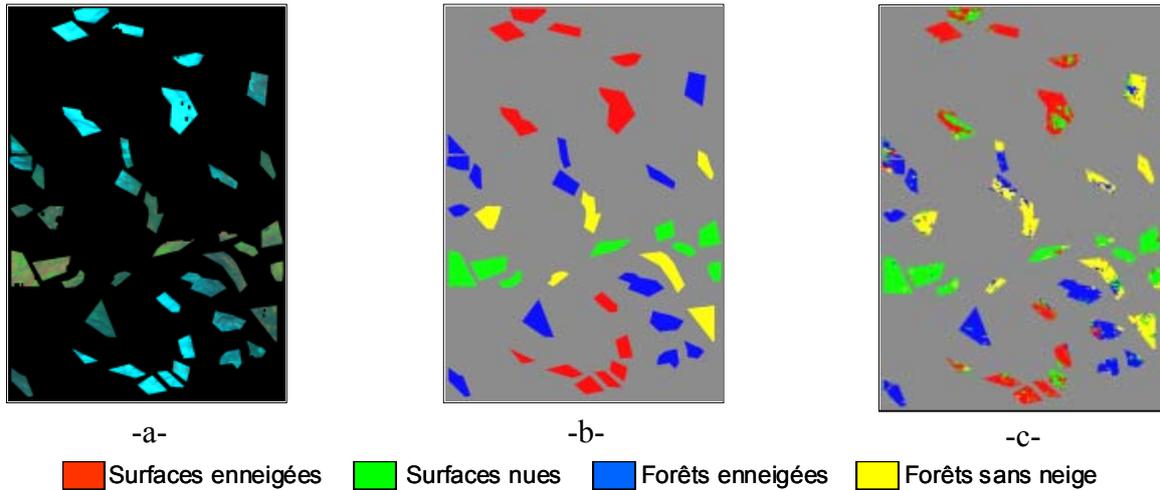


Figure IV-41 Résultats de la classification pour les différentes zones de la carte de référence sur le site de Risoul

-a- Image optique Landsat, -b- carte de référence, -c- classification des résultats de cartographie

La probabilité de bonne détection des zones est calculée pour les quatre classes avec un nombre d'échantillon total de 264483 et un nombre d'échantillon moyen par classe de 28303.

**La probabilité de bonne classification calculée pour les quatre classes est de 77.65%.**

Afin d'estimer uniquement le pouvoir de discrimination de la neige quel que soit le milieu sous jacent, la classe des surfaces enneigées est fusionnée avec celle des forêts enneigées et la classe des surfaces sans neige est couplée avec celle des forêts sans neige.

Le taux de bonne classification de l'enneigement du site est obtenu à partir d'une évaluation sur ces deux nouvelles classes.

**La probabilité de bonne classification calculée pour ces deux classes est évaluée à 81.00%.**

#### IV.6.1.2 Site d'Izoard

Les résultats de la cartographie d'hiver du site d'Izoard, obtenus au moyen de l'approche multi-fréquentielle, sont comparés à la carte de référence propre à ce site. Les zones de référence et leur appartenance à chacune des classes préfinies sont représentées sur la figure IV-42. Le masque de la carte de référence est appliqué sur la cartographie d'hiver du site d'Izoard et la répartition des clusters dans chacune des classes est illustrée par la figure IV-42-c.





IV.6.2.1.b Site d'Izoard

Les résultats de classification, dans cette configuration, sont montrés sur la figure IV-44 pour le site d'Izoard.

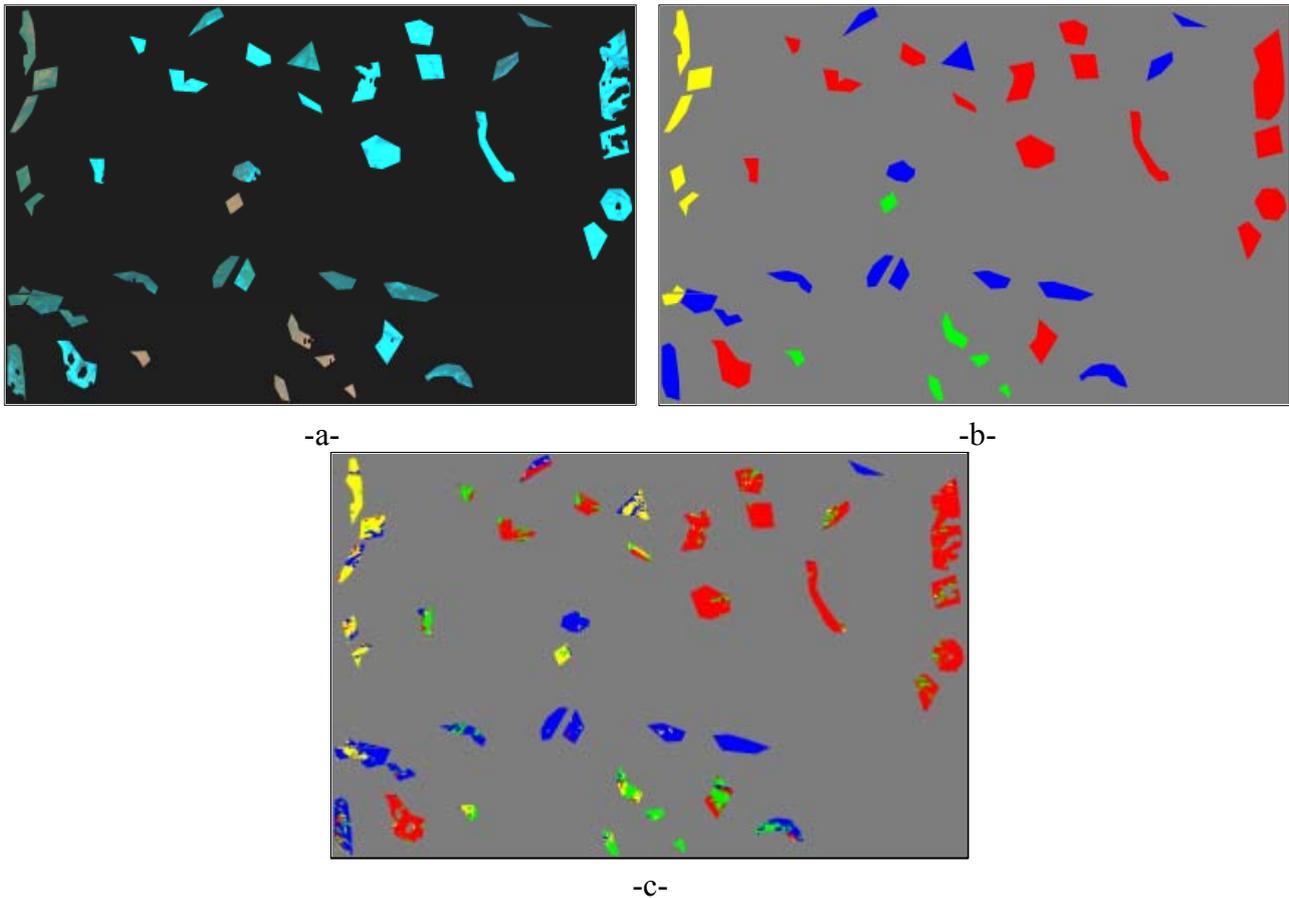


Figure IV-44 Résultats de la classification pour les différentes zones de la carte de référence sur le site d'Izoard

-a- Image optique Landsat, -b- carte de référence, -c- classification des résultats de cartographie

**La probabilité de bonne classification calculée pour les quatre classes est de 77.06%.**

Dans ce cas, la fusion des différentes classes en une carte binaire indiquant la présence ou l'absence de neige donne une **probabilité de bonne classification calculée pour ces deux classes de 82.88%**.

IV.6.2.1.c Discussion

Les taux de classification, obtenus dans le cas de la méthode mono-fréquentielle et calculés pour quatre classes, présentent une nette diminution par rapport à ceux mesurés avec la procédure multi-fréquentielle, tout en maintenant un taux de détection élevé de la neige dans le cas de deux classes. Plusieurs facteurs permettent d'expliquer ces résultats. La probabilité de bonne détection, dans le

cas de quatre classes, est affaibli en raison de la classification différente faite sur les zones de surfaces recouvertes de petites végétations.

Cependant, il a été remarqué que la surestimation de l'étendue des forêts en bande C correspond principalement à des zones de surfaces recouvertes de petites végétations. Or, ces zones sont majoritairement localisées à de faibles altitudes, ce qui implique que dans ce cas précis la surestimation des forêts n'a quasiment aucune influence sur les résultats de la sélection de la neige.

Il faut noter que les zones de la carte de référence affectées aux surfaces non enneigées correspondent en grande partie à des zones recouvertes de petites végétations. Ceci explique le très fort taux de détection observé, alors que les résultats sur l'ensemble des scènes d'étude laissent apparaître des valeurs légèrement inférieures à celles obtenues avec l'approche multi-fréquentielle.

#### IV.6.2.2 Estimation à partir de la méthode adaptée à la bande C

##### IV.6.2.2.a Site de Risoul

Les résultats de classification, dans cette configuration, sont montrés sur la figure IV-45 pour le site de Risoul.

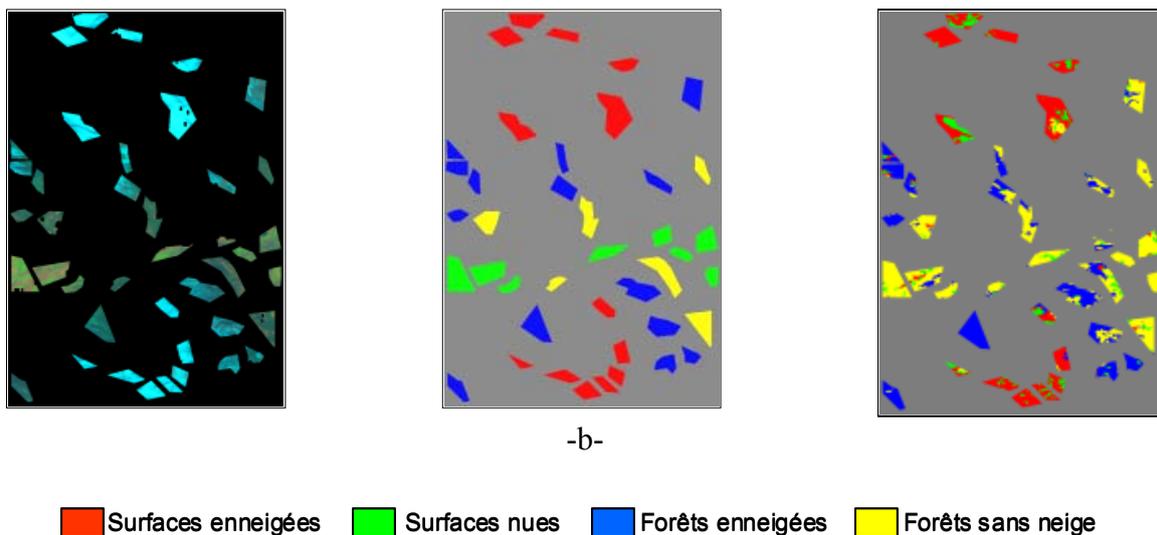


Figure IV-45 Résultats de la classification pour les différentes zones de la carte de référence sur le site de Risoul

-a- Image optique Landsat, -b- carte de référence, -c- classification des résultats de cartographie

**La probabilité de bonne classification calculée pour les quatre classes est de 61.06%.**

Dans ce cas, la fusion des différentes classes en une carte binaire indiquant la présence ou l'absence de neige donne une **probabilité de bonne classification calculée pour ces deux classes de 79.17%**.

IV.6.2.2.b Site d'Izoard

Les résultats de classification, dans cette configuration, sont montrés sur la figure IV-46 pour le site d'Izoard.

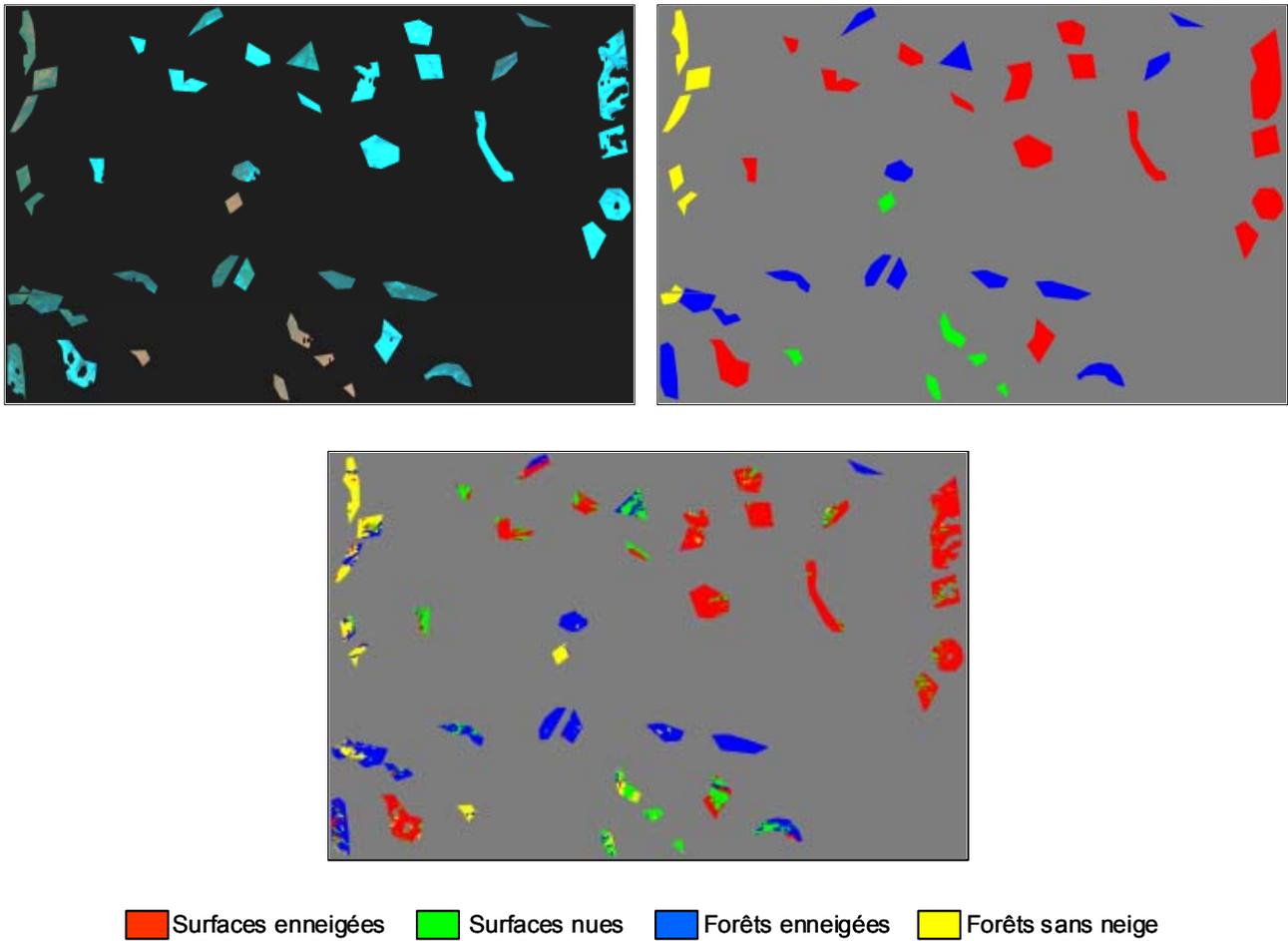


Figure IV-46 Résultats de la classification pour les différentes zones de la carte de référence sur le site d'Izoard

-a- Image optique Landsat, -b- carte de référence, -c- classification des résultats de cartographie

**La probabilité de bonne classification calculée pour les quatre classes est de 66.43%.**

La fusion des différentes classes en une carte binaire indiquant la présence ou l'absence de neige donne une **probabilité de bonne classification calculée pour ces deux classes de 82.99%.**

IV.6.2.2.c Discussion

Les mêmes remarques que celles énoncées lors de l'analyse de la classification précédente peuvent être formulées dans ce cas présent. Les résultats sur des images complètes laissent apparaître des performances légèrement inférieures à celles de l'approche multi-fréquentielle.

### IV.6.3 Récapitulatif

Les tableaux IV-3 et IV-4 résument les résultats de classification obtenus avec les différentes approches.

Procédure	Risoul		
	Multi-fréquentielle	Mono-fréquentielle développée à partir de la bande L	Mono-fréquentielle adaptée à la bande C
$P_c$ (4 classes)	77.65%	66.15%	61.06%
$P_c$ (2 classes)	81.00%	78.20%	79.17%

Tableau IV-3 Tableau récapitulatif des taux de classification sur le site de Risoul

Procédure	Izoard		
	Multi-fréquentielle	Mono-fréquentielle développée à partir de la bande L	Mono-fréquentielle adaptée à la bande C
$P_c$ (4 classes)	77.09%	77.06%	66.43%
$P_c$ (2 classes)	81.39%	82.88%	82.99%

Tableau IV-4 Tableau récapitulatif des taux de classification sur le site d'Izoard

De manière générale, les probabilités de détection de la neige obtenues avec les différentes approches proposées avoisinent la valeur très satisfaisante de 80%. La différence principale entre l'approche multi-fréquentielle et les approches mono-fréquentielles réside dans les difficultés de ces dernières à classifier les milieux sous jacents.

## IV.7 Conclusion

L'objectif de cette partie concerne la localisation de couverts de neige que ce soit sur les forêts ou sur les sols nus. Toutefois les approches proposées diffèrent en fonction des caractéristiques polarimétriques des milieux étudiés.

Les données SAR sont tout d'abord traitées au moyen d'une méthode de filtrage de speckle et d'une procédure de regroupement des pixels afin de réduire le bruit d'une part et d'homogénéiser les régions de l'image. Cette étape permet une meilleure lisibilité des images et ainsi une interprétation plus fiable des phénomènes de rétrodiffusion.

A partir des données SAR polarimétriques des sites de Risoul et d'Izoard, une étude des variations fréquentielles et temporelles des paramètres polarimétriques  $H$  et  $\bar{\alpha}$  est proposée afin d'estimer leur pouvoir de discrimination de la neige. Il est ainsi observé que seules les variations temporelles en bande C de l'angle  $\bar{\alpha}$  sur les régions forestières rendent possible la détection d'un couvert neigeux. Cette partie révèle la nécessité de localiser indépendamment les différents milieux naturels des sites à partir des données d'octobre. En effet leur comportement polarimétrique spécifique ne rend pas possible la mise en place d'une méthode unique pour discriminer la neige. Ainsi la cartographie des régions de surfaces et de forêts ainsi que l'élaboration de procédures de détection de neige adaptées à chaque milieu sont développées.

Une approche multi-temporelle et multi-fréquentielle est tout d'abord présentée. Les performances de la bande L dans les études de classification et de cartographie des milieux naturels sont utilisées pour développer les procédures de cartographie des surfaces et des forêts à partir des données en bande L.

La méthode de décomposition d'un modèle de diffusion, proposé par A. Freeman, habituellement employée pour les études des zones forestières a montré une nette surestimation de la diffusion de volume. Une technique de localisation des forêts, établie à partir d'une combinaison entre l'entropie et l'anisotropie, est adoptée. Les zones de surfaces sont localisées au moyen d'une procédure qui évalue le type des mécanismes dominants en se basant sur une décomposition aux valeurs et vecteurs propres.

Une fois cette étape achevée, deux méthodes distinctes sont proposées pour détecter la présence de la neige sur les forêts et les surfaces à partir des données en bande C. Il est montré que dans le cas des régions forestières l'indicateur  $\bar{\alpha}$  est un paramètre pertinent. Ainsi à partir d'un seuil fixé sur ses variations d'été à hiver, une carte des forêts enneigées peut être construite.

Le faible contraste polarimétrique existant entre l'été et l'hiver sur les surfaces enneigées a mené au développement d'une méthode d'optimisation de contraste polarimétrique. Une première méthode basée sur l'OPCE (Optimization of Polarimetric Contrast Enhancement) est appliquée. Cependant des limitations intrinsèquement liées au principe de cette méthode ont été observées. Afin de dépasser ces limitations une nouvelle technique, appelée PCVE (Polarimetric Contrast Variation Enhancement), est exposée. Il s'agit d'une technique supervisée reposant sur la maximisation des variations du contraste polarimétrique.

Afin de restreindre la discrimination de la neige à une étude mono-fréquentielle, des analyses des milieux naturels en été sont proposées pour établir des cartographies des forêts et des surfaces en bande C.

Les procédures utilisées dans le cas de la bande L sont appliquées à la bande C et comparées aux résultats obtenus pour des procédures fondées sur l'analyse de la réponse rétrodiffusée en bande C. Il a été observé que l'entropie seule suffit à détecter les forêts à cette fréquence du fait du caractère très aléatoire de tels milieux. Les surfaces quant à elles sont estimées à partir de l'indicateur moyen  $\bar{\alpha}$ .

A partir de ces cartographies estivales, la neige est détectée sur chaque milieu en appliquant les mêmes méthodes que celles décrites précédemment.

Finalement la validité de ces méthodes de discrimination d'un couvert neigeux sont évaluées en comparant les résultats obtenus avec les images optiques Landsat projetées dans le plan d'incidence radar. Les différentes approches proposées affichent des performances similaires et très

satisfaisantes avec un taux de bonne détection de la neige qui atteint des valeurs de l'ordre de 80%. L'approche multi-fréquentielle est néanmoins préférée aux approches mono-fréquentielles car elle permet une discrimination efficace des milieux sous jacents. Cependant, dans le cas où le but premier est la détection de la neige, une approche mono-fréquentielle suffit. De plus cette technique s'inscrit dans le cadre des nouveaux capteurs qui travaillent à une seule bande de fréquence.



# CHAPITRE V.

## ANALYSE POLARIMETRIQUE

### ALTITUDINALE DU MANTEAU NEIGEUX

---

#### V.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de mettre en évidence des comportements polarimétriques spécifiques sur des régions de surfaces enneigées en fonction de certaines caractéristiques du couvert neigeux.

Dans la première partie de ce chapitre, une analyse est menée afin d'estimer les possibles relations entre l'altitude, l'épaisseur du couvert neigeux et des variations de comportement de paramètres polarimétriques pertinents. Dans un premier temps, des résultats de simulation des conditions d'enneigement fournis par le modèle CROCUS, mis au point au Centre d'Etude de la Neige, sont présentés. L'examen des données permet d'associer l'altitude d'un point à la hauteur de la neige en fonction de la pente locale et de son orientation, mais aussi de connaître la limite inférieure de l'altitude du couvert neigeux. Une comparaison est alors effectuée avec des informations extraites des données optiques Landsat. Dans un second temps, les variations temporelles été-hiver de paramètres polarimétriques en fonction de l'altitude sont étudiées, pour les sites de Risoul et Izoard dans différentes configurations d'exposition.

La comparaison des différentes sources de mesures, comme les campagnes de terrain, les données optiques ou mêmes les données SAR, met en évidence la difficulté d'inversion des paramètres polarimétriques pour l'extraction de la hauteur du couvert neigeux.

Dans une seconde partie, une approche alternative est proposée en se basant sur les variations temporelles d'indicateurs polarimétriques en fonction de l'altitude. Le but de cette approche est non pas de restituer directement la hauteur de la neige à partir de données SAR polarimétriques mais simplement d'associer un comportement polarimétrique spécifique à une altitude appelée alors altitude équivalente. L'information liée à la différence entre l'altitude équivalente d'un point, estimée à l'aide de son comportement polarimétrique et son altitude physique permet d'observer le degré d'hétérogénéité d'un couvert neigeux.

## V.2 Analyse des paramètres physiques et polarimétriques

### V.2.1 Modélisation du couvert neigeux par CROCUS

Le Centre d'Etude de la Neige (CEN) a mis au point un modèle du manteau neigeux qui prévoit son évolution en fonction des mécanismes de métamorphoses de la neige et des conditions météorologiques [Brun 89], [Durand 93], [Brun 94]. Les Alpes sont découpées en 23 massifs, représentatifs des conditions locales d'évolution du manteau neigeux. Le massif du "Parpaillon", comprenant les deux sites d'études de Risoul et d'Izoard, a été sélectionné dans la base de données fournie par le CEN.

L'épaisseur du couvert neigeux est donné en fonction de l'altitude pour chaque orientation et pour une pente locale de 20°, comme indiqué dans le tableau V-1. L'observation de ces valeurs, simulées par le modèle CROCUS, montre que l'épaisseur augmente avec l'altitude mais reste faible pour des sites orientés au sud.

De plus il apparaît que les épaisseurs prévues par CROCUS pour des altitudes données ne sont pas en totale adéquation avec les mesures effectuées in situ, présentées dans le chapitre II, comme l'expose le tableau V-2. En effet le profil stratigraphique acquis au Clos Chardon sur le site de Risoul indique une épaisseur du couvert de neige de 2 m à une altitude de 2550 m.

Nord Pente: 20°		Est Pente: 20°		Sud-Est Pente: 20°	
Altitudes (m)	Epaisseur (cm)	Altitudes (m)	Epaisseur (cm)	Altitudes (m)	Epaisseur (cm)
900	3	900	1.5	900	0
1200	5.3	1200	3.1	1200	1.9
1500	27	1500	7.2	1500	5.7
1800	58.1	1800	9.4	1800	7.6
2100	83.6	2100	43.9	2100	10.6
2400	128.9	2400	79.8	2400	54.2

Sud Pente: 20°		Sud Ouest Pente: 20°		Ouest Pente: 20°	
Altitudes (m)	Epaisseur (cm)	Altitudes (m)	Epaisseur (cm)	Altitudes (m)	Epaisseur (cm)
900	0	900	0	900	0.1
1200	1.5	1200	1.7	1200	2.2
1500	5.2	1500	5	1500	6.2
1800	7.2	1800	7.3	1800	8.4
2100	10	2100	10.3	2100	41.2
2400	42.6	2400	51.6	2400	78.3

Tableau V-1 Résultats de simulation de CROCUS de l'épaisseur du couvert neigeux en fonction de l'altitude, pour différentes configurations d'exposition du site

Site	Orientation	Pente (°)	Altitude (m)	Épaisseur du couvert neigeux (cm)
Risoul Météo France	NE	17	2550	192
Izoard - EDF	N-NW	14.9	2280	100
Izoard Météo France	N	4.6	2100	122
Prapic - EDF	W	2.2	2480	200

Tableau V-2 Mesures de terrain de l'épaisseur du couvert neigeux en fonction de l'altitude et de l'orientation

La figure V-1 donne la limite inférieure de la neige en fonction de l'orientation et de la pente du site.

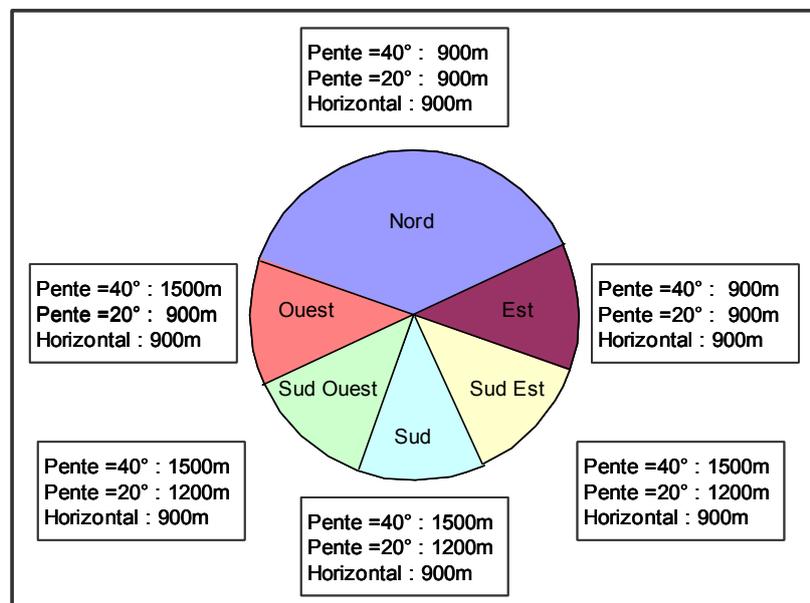


Figure V-1 Limite inférieure du manteau neigeux du massif du Parpaillon pour le 12 avril 1994, donnée par CROCUS

Le tableau V-3 représente les altitudes inférieures de la neige selon les données Landsat TM du 14 avril 1994. La limite inférieure observée par Landsat se trouve à des altitudes plus élevées que celles données par le modèle CROCUS. En effet il est à noter que la limite inférieure de la neige estimée par CROCUS tient compte des zones partiellement enneigées avec une épaisseur du couvert généralement très mince. Il apparaît alors évident que ces zones sont difficilement détectées par les systèmes d'observation qu'ils soient optiques ou SAR. Ce phénomène explique les différences observées entre les limites inférieures fournies par les différents systèmes de mesure.

Altitude inférieure de la neige  
selon les données Landsat TM  
du 14/04/1994 à 9h45 TU

Exposition	Altitudes (m)
Nord	1390
Est	1626
Sud-Est	1900
Sud	2023
Sud Ouest	1724
Ouest	1520

Tableau V-3 Limite inférieure de la neige selon les données optiques Landsat pour différentes expositions

## V.2.2 Relations entre les paramètres polarimétriques et l'altitude

L'utilisation du modèle numérique de terrain (MNT) permet d'associer aux données SAR l'information sur l'altitude, l'orientation et la pente d'un point de l'image.

Il a été montré dans les précédents chapitres que l'angle  $\bar{\alpha}$  et l'entropie sont des paramètres pertinents permettant d'analyser le comportement polarimétrique de régions enneigées. De plus, dans le chapitre III, dédié à la modélisation de la diffusion d'un couvert neigeux, il a été remarqué qu'en bande C la réponse rétrodiffusée est principalement due à la diffusion de volume pour des angles d'incidence supérieurs à  $35^\circ$ . Ce phénomène de diffusion est généralement associé au coefficient de rétrodiffusion en polarisation croisée  $\sigma_{hv}$ .

Une étude des variations été-hiver de ces paramètres polarimétriques en fonction de l'altitude, est menée sur les régions de surfaces enneigées obtenues par cartographie.

### V.2.2.1 Les variations temporelles de l'indicateur $\bar{\alpha}$ en fonction de l'altitude

La figure V-2 représente la répartition par cluster des variations été-hiver de l'indicateur  $\bar{\alpha}$  en fonction de l'altitude, pour les trois orientations nord, est, ouest et pour les sites de Risoul et Izoard. L'observation des résultats révèle un comportement globalement équivalent pour les trois azimuts considérés sur les deux sites. Il apparaît que le tracé des variations  $\Delta\bar{\alpha}_{H-E}$  dénote deux tendances différentes en fonction de l'altitude. En dessous de 2000 m les variations sont quasi constantes ce qui implique que la neige n'a pas une influence significative sur la réponse de ces zones. Au contraire, pour des altitudes supérieures à 2000 m et allant jusqu'à environ 3000 m, les variations  $\Delta\bar{\alpha}_{H-E}$  suivent un comportement linéaire croissant. Ces remarques sont valables pour les trois orientations nord, est et ouest.

Pour rendre compte du comportement moyen des variations temporelles de l'indicateur  $\bar{\alpha}$ , une droite de régression, correspondant aux altitudes comprises entre 2000 m et 3000 m, est tracée pour chaque orientation, comme le montre la figure V-3. Les variations  $\Delta\bar{\alpha}_{H-E}$  sur les zones orientées nord et est sont quasiment similaires et s'étendent de  $-5^\circ$  à  $25^\circ$  sur le site de Risoul et de  $-3^\circ$  à  $20^\circ$  pour Izoard. Les domaines de ces variations se restreignent dans le cas de l'orientation ouest à  $[-5^\circ; 17^\circ]$  pour Risoul et à  $[2^\circ; 12^\circ]$  pour Izoard. Les valeurs négatives de  $\Delta\bar{\alpha}_{H-E}$  indiquent que la neige rehausse le mécanisme de diffusion de surface.

Les régions illuminées par le radar présentent principalement une orientation au nord, avec plus de 50% des clusters pour moins de 3% d'entre eux exposés au sud, ce qui correspond à 15600 échantillons sur un total de 657000 pour les deux sites de Risoul et Izoard confondus. La faible représentativité de ces zones ne permet pas d'étudier correctement de façon statistique, leur comportement polarimétrique moyen en fonction de l'altitude. Les variations temporelles des trois paramètres polarimétriques ne sont donc pas présentées pour cet azimut.

### V.2.2.2 Les variations temporelles de l'entropie en fonction de l'altitude

La figure V-4 représente la répartition par cluster des variations été-hiver de l'entropie  $H$  en fonction de l'altitude, pour les trois orientations nord, est, ouest et pour les sites de Risoul et Izoard. Les mêmes remarques que celles formulées lors de l'observation des tracés obtenus avec le paramètre  $\bar{\alpha}$  peuvent être faites. Les droites de régression, figure V-5, indiquent que les variations  $\Delta H_{H-E}$  sur les zones orientées nord et est s'étendent, de -0.05 à 0.3 sur le site de Risoul et de -0.06 à 0.27 pour Izoard, pour des altitudes comprises entre 2000 m et 3000 m. Les domaines de ces variations se restreignent dans le cas de l'orientation ouest à  $[-0.02; 0.2]$  pour Risoul et à  $[0; 0.15]$  pour Izoard.

### V.2.2.3 Les variations temporelles du coefficient $\sigma_{hv}$ en fonction de l'altitude

La répartition par clusters des variations été-hiver du coefficient de rétrodiffusion en polarisation croisée  $\sigma_{hv}$  est représentée en fonction de l'altitude sur la figure V-6, pour les trois orientations nord, est, ouest et pour les sites de Risoul et Izoard.

Il apparaît que sur le site de Risoul et pour les deux azimuts nord et est, les variations temporelles  $\Delta\sigma_{hvH-E}$  suivent un comportement similaire à celui observé dans le cas de l'angle  $\bar{\alpha}$  et de l'entropie. Les droites de régression de la figure V-7 indiquent que pour ces deux orientations,  $\Delta\sigma_{hvH-E}$  varie de -1 dB à 7 dB pour des altitudes allant de 2000 m à 3000 m. La répartition des clusters est plus confuse pour le site d'Izoard, quelle que soit l'orientation ainsi que pour les zones orientées à l'ouest sur le site de Risoul. La dynamique des droites de régression pour ces régions est de 6 dB pour l'est, 4 dB pour le nord et environ 2 dB pour l'ouest.

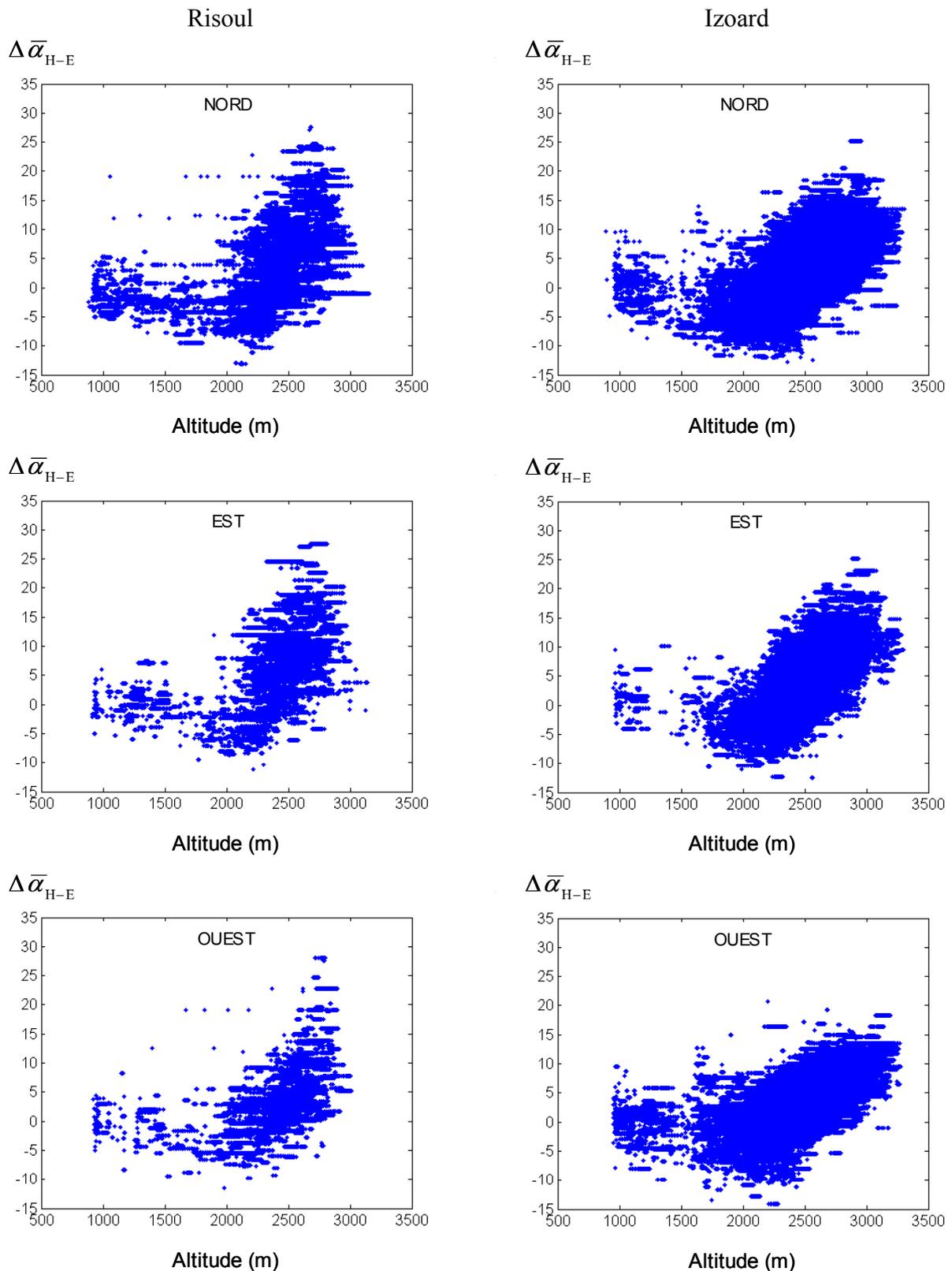


Figure V-2 Variations temporelles de l'indicateur  $\bar{\alpha}$  en fonction de l'altitude pour les sites de Risoul et d'Izoard

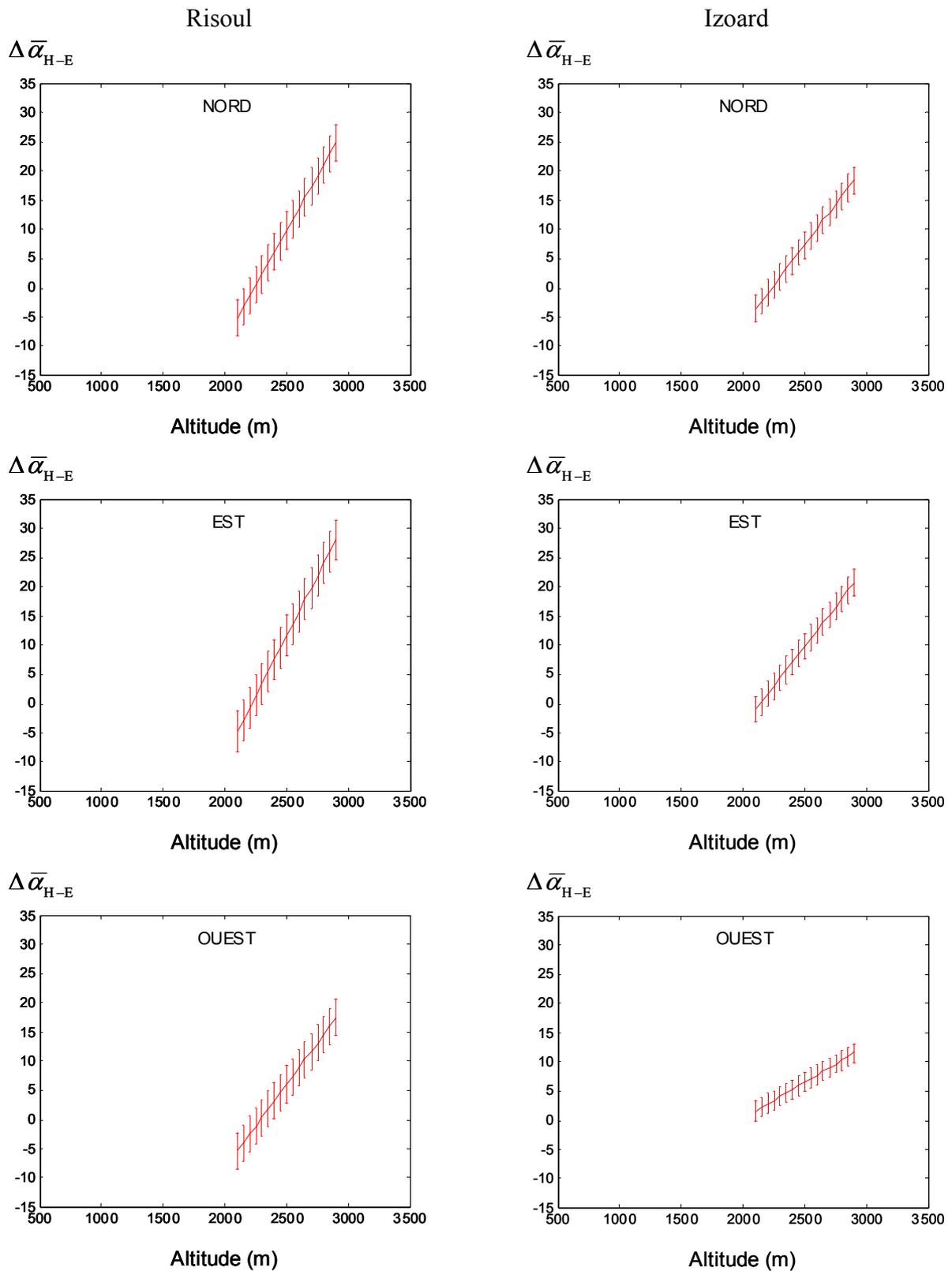


Figure V-3 Droites de régression des variations temporelles  $\Delta \bar{\alpha}_{H-E}$  en fonction de l'altitude pour les sites de Risoul et Izoard

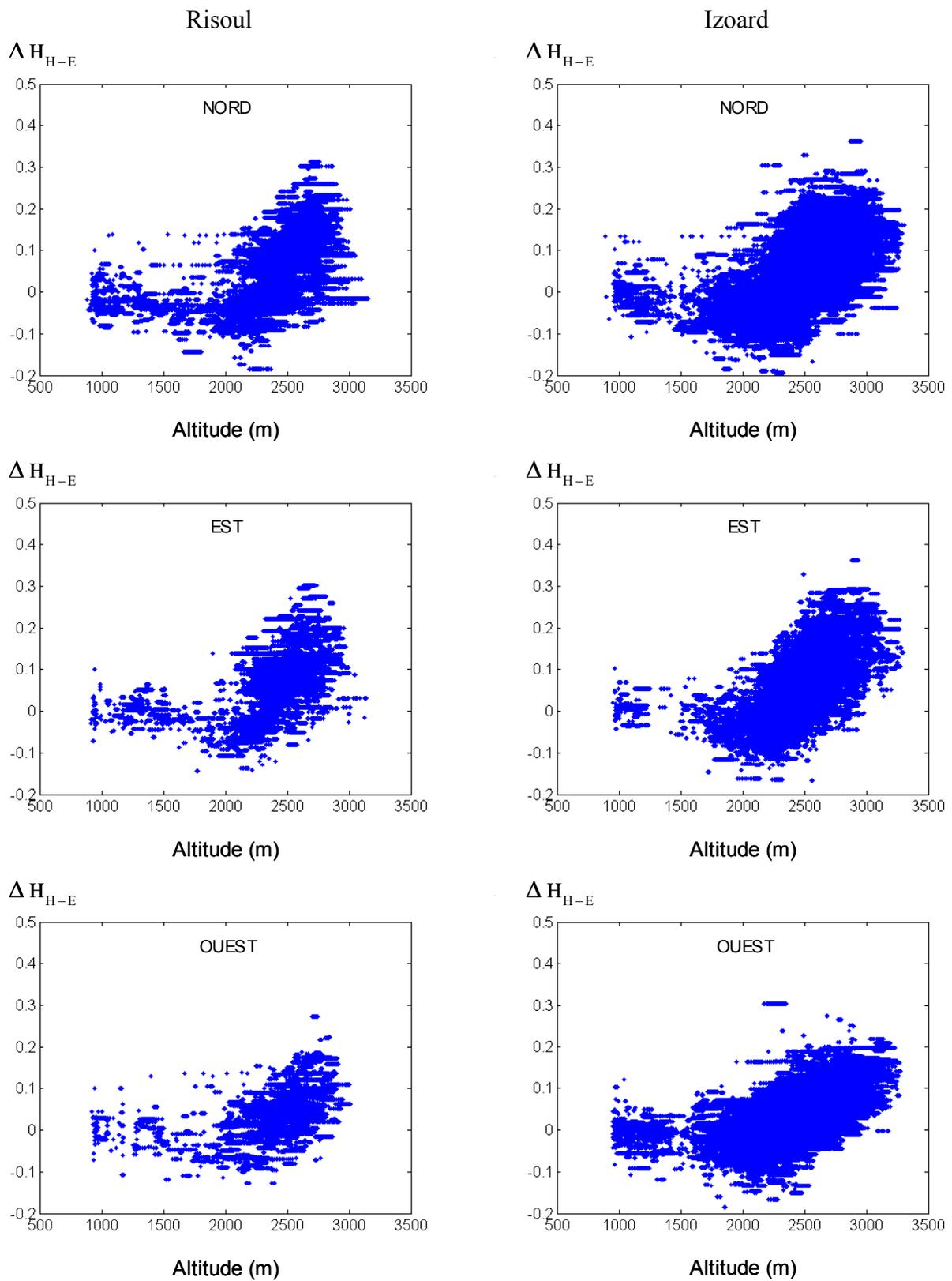


Figure V-4 Variations temporelles de l'entropie  $H$  en fonction de l'altitude pour les sites de Risoul et d'Izoard

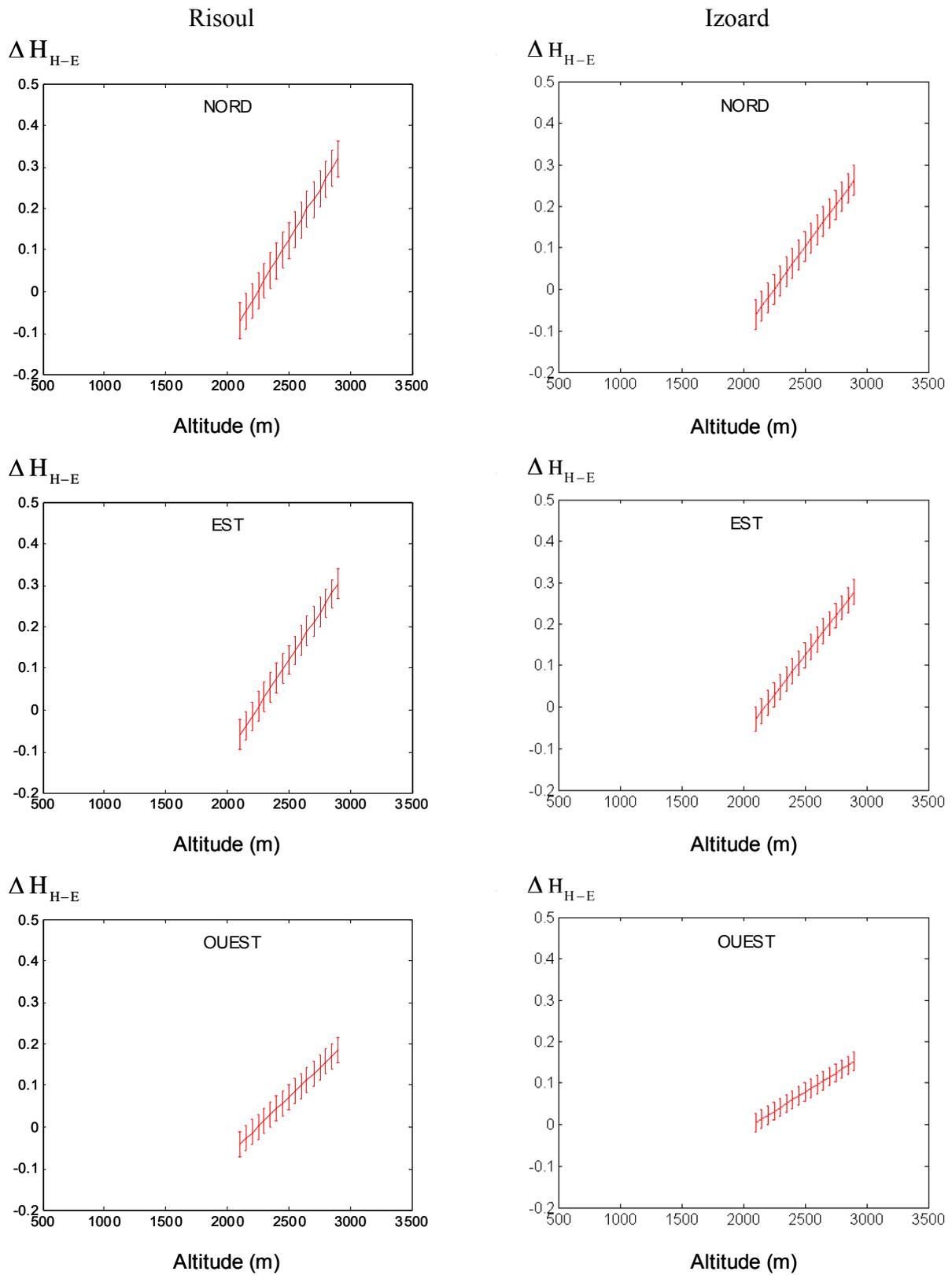


Figure V-5 Droites de régression des variations temporelles  $\Delta H_{H-E}$  en fonction de l'altitude pour les sites de Risoul et Izoard

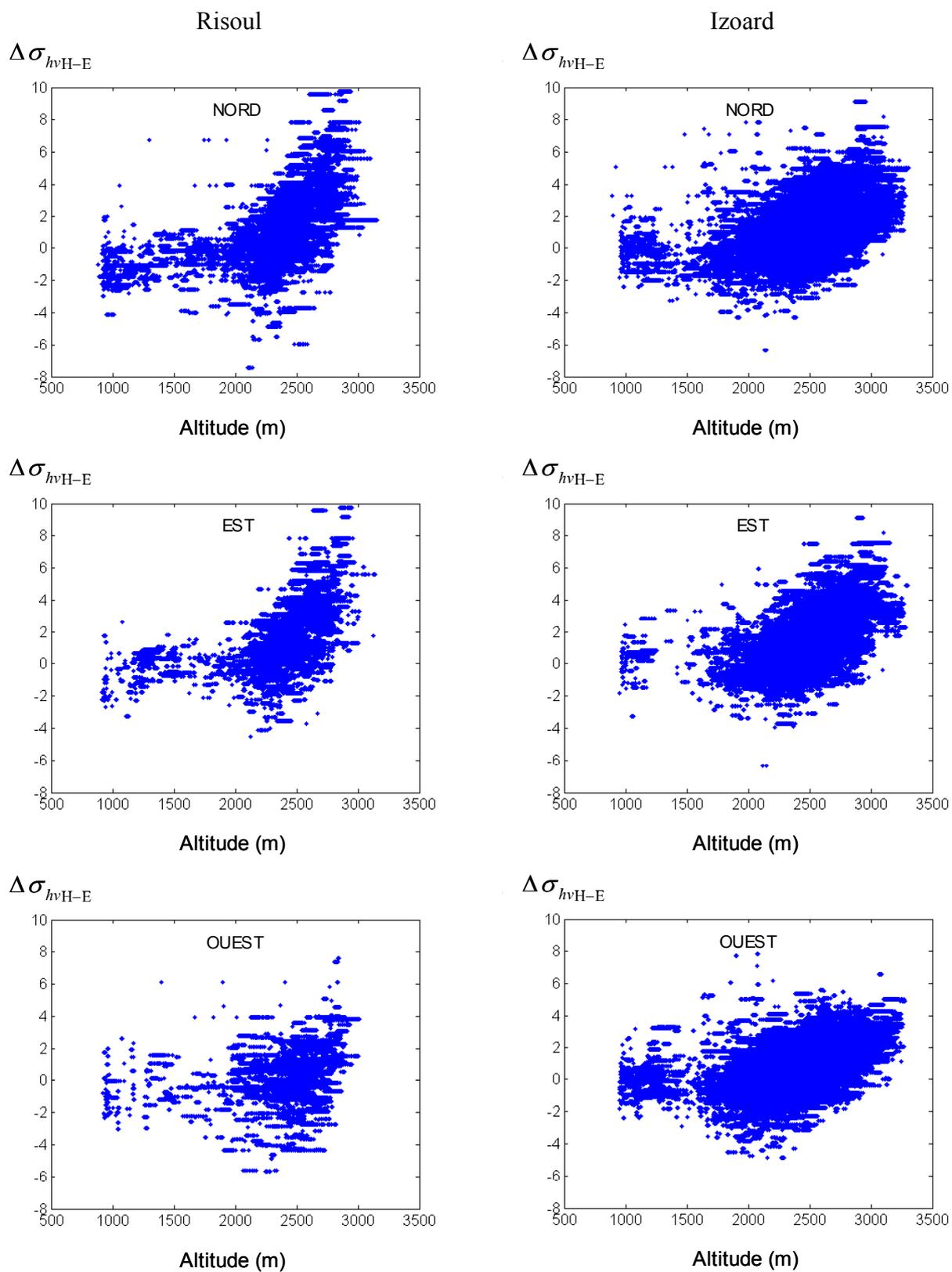


Figure V-6 Variations temporelles du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma_{hv}$  en fonction de l'altitude pour les sites de Risoul et d'Izoard

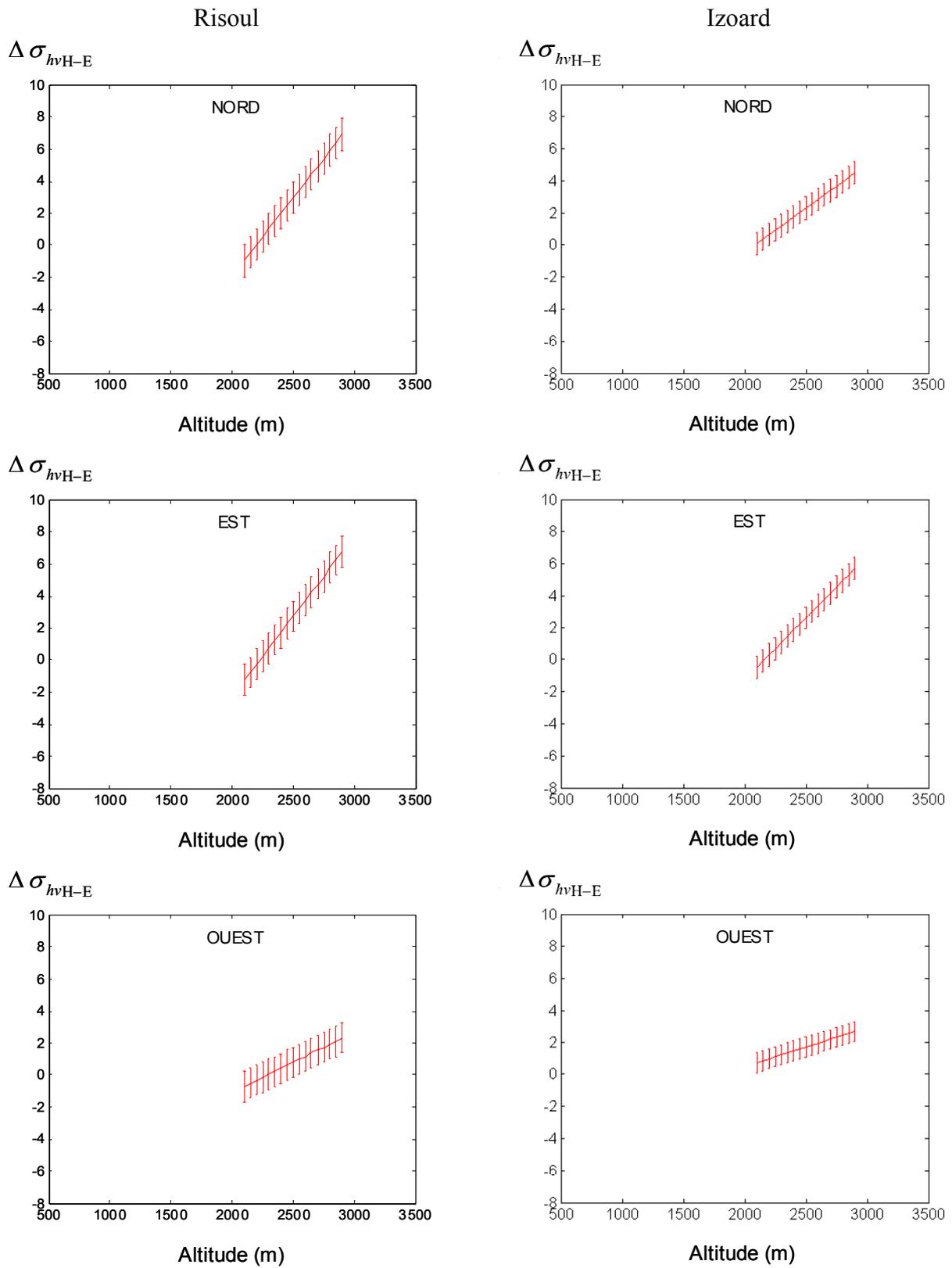


Figure V-7 Droites de régression des variations temporelles  $\Delta \sigma_{hvH-E}$  en fonction de l'altitude pour les sites de Risoul et Izoard

#### **V.2.2.4 Le comportement polarimétrique toutes orientations confondues**

Il apparaît aussi important d'étudier le comportement global des variations temporelles des indicateurs polarimétriques pour toutes les orientations confondues.

La figure V-8 représente la répartition par clusters des variations été-hiver des paramètres polarimétriques  $\bar{\alpha}$ , H et  $\sigma_{hv}$  en fonction de l'altitude, pour tous les azimuts confondus et pour les sites de Risoul et Izoard. Les variations temporelles de l'indicateur  $\bar{\alpha}$  suivent le même comportement que celui observé dans le cas des orientations nord, est et ouest. Les mêmes remarques peuvent être faites que celles avancées dans le partie V.2.2.1. Néanmoins il est possible de constater dans le cas d'Izoard que la dynamique des courbes de régression diminue comme le montre la figure V-8. Ce phénomène est expliqué par la faible dynamique des variations temporelles observées pour les régions orientées à l'ouest.

L'utilisation de ces courbes de régression permet de mener une analyse polarimétrique globale sur l'ensemble d'un massif montagneux et d'associer une altitude aux variations temporelles de paramètres polarimétriques.

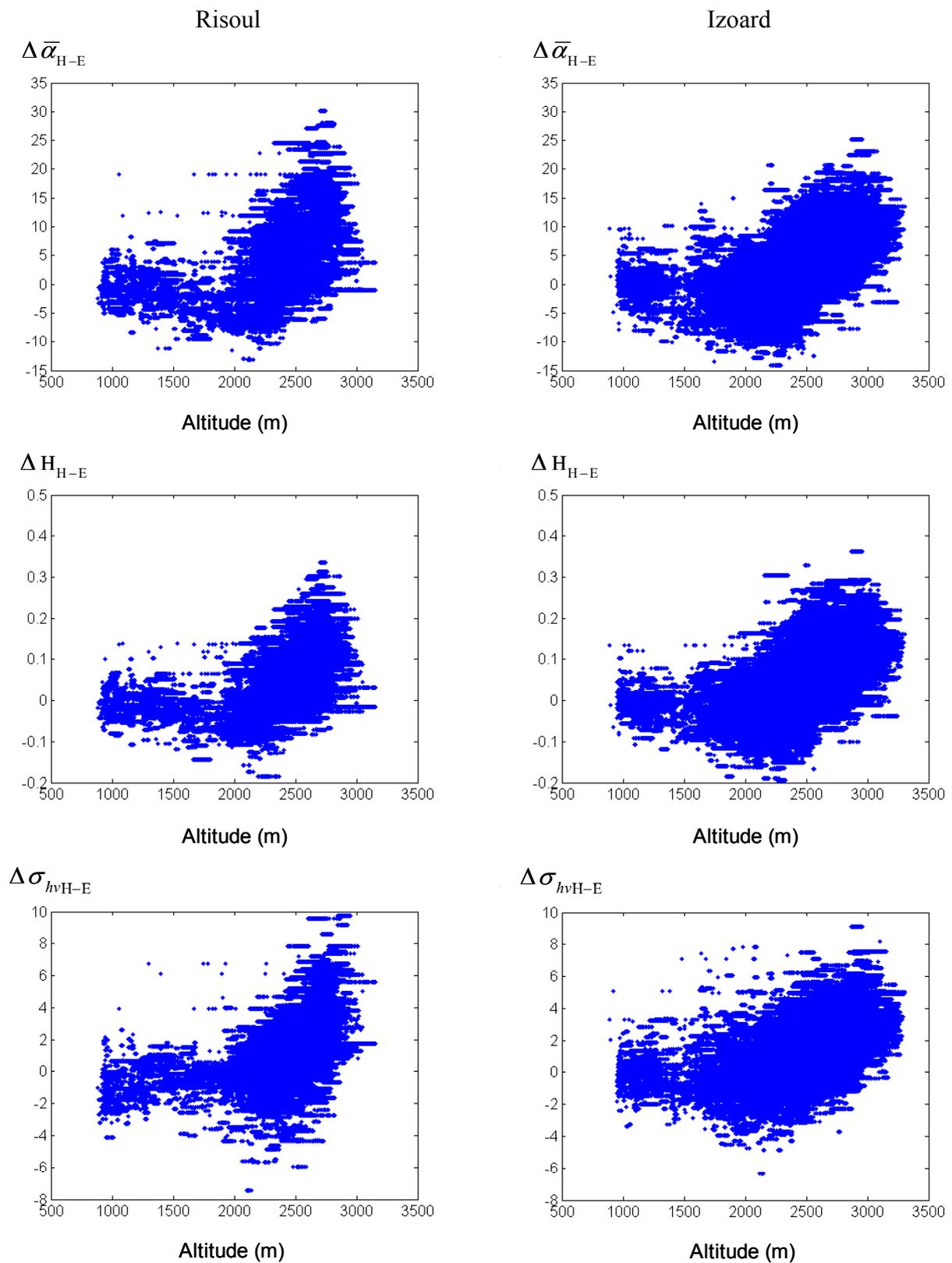


Figure V-8 Variations temporelles de l'indicateur  $\bar{\alpha}$  en fonction de l'altitude pour toutes les orientations confondues sur les sites de Risoul et d'Izoard

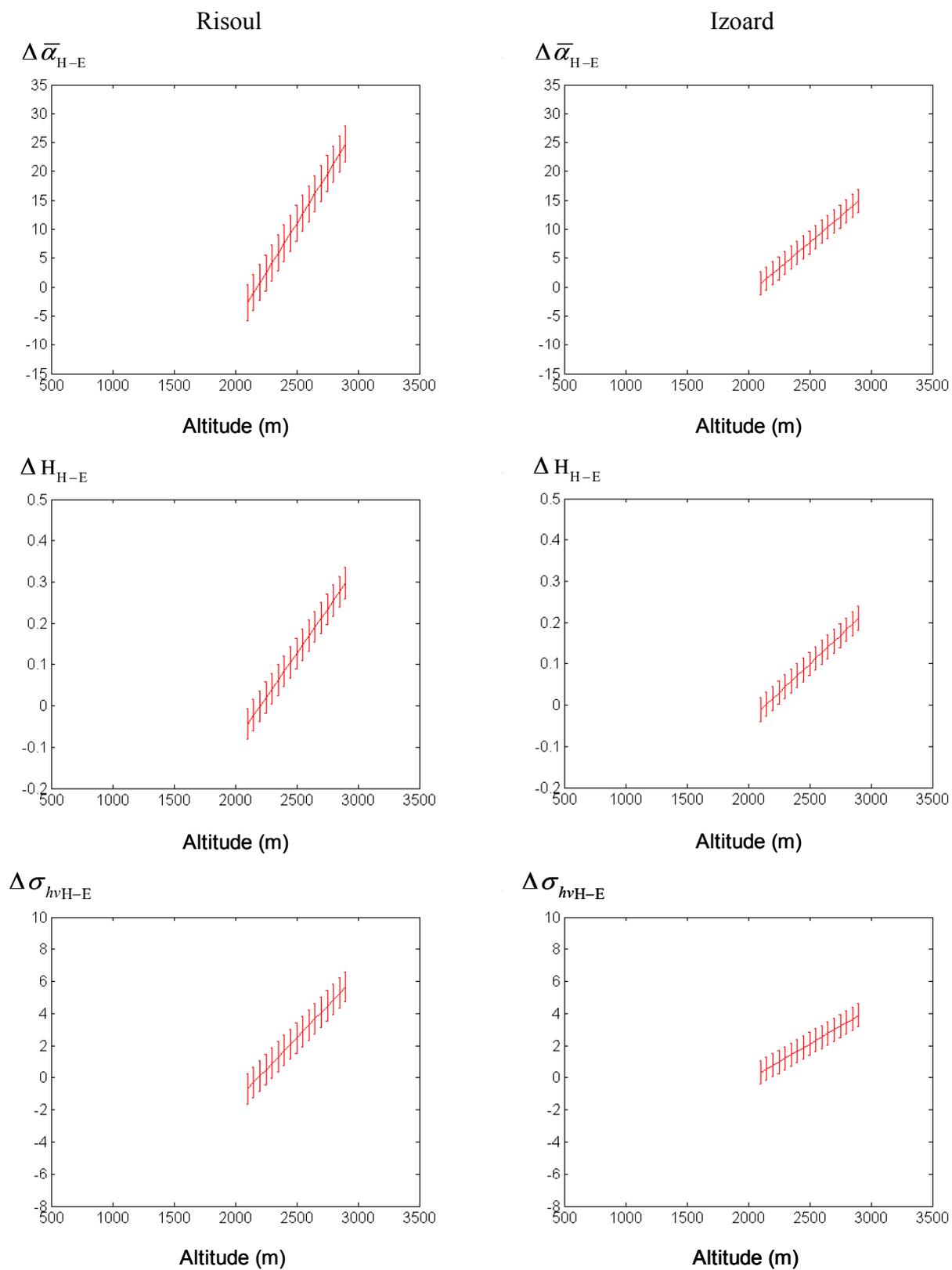


Figure V-9 Droites de régression des variations temporelles en fonction de l'altitude pour toutes les orientations confondues sur les sites de Risoul et Izoard

#### V.2.2.5 Discussion

Deux remarques importantes peuvent être formulées. La première concerne la grande variabilité des caractéristiques du couvert fournies par les mesures terrain et le simulateur CROCUS, qui rend difficile une comparaison avec le comportement des indicateurs polarimétriques. Il peut aussi être remarqué que les variations altitudinales du comportement polarimétrique sont fonction de nombreux paramètres physiques tels que l'épaisseur du couvert, la densité ou les caractéristiques du milieu sous jacent. De ce fait, l'information disponible n'est pas suffisante pour tenter d'établir une relation non ambiguë entre les variations des paramètres polarimétriques et une seule des caractéristiques physiques de la neige. Par contre, les variations temporelles d'indicateurs polarimétriques avec l'altitude montrent une évolution sensible et de forme linéaire. Il est alors possible d'associer cette relation à la variation altitudinale du comportement polarimétrique global du couvert neigeux.

### V.3 Approche alternative pour l'estimation du comportement polarimétrique de l'épaisseur du couvert neigeux

Puisqu'il n'est pas possible à l'heure actuelle d'extraire la hauteur du couvert neigeux à partir des paramètres polarimétriques, en fonction de l'altitude, une solution alternative et originale est proposée.

L'analyse précédente a montré que les variations temporelles été-hiver de certains paramètres polarimétriques comme l'angle  $\bar{\alpha}$ , l'entropie H et le coefficient de rétrodiffusion  $\sigma_{hv}$  pouvaient être mise sous la forme suivante  $\Delta x_{H-E} = f(h)$  où  $x$  représente un indicateur polarimétrique,  $f(\ )$  une fonction linéaire et  $h$  l'altitude du couvert. Il donc possible à partir d'une image des différences été-hiver de ces paramètres de produire une image des altitudes équivalentes par rétro-projection, à partir des droites de régression de la figure V-9. Cette carte fournit alors pour un point non pas directement l'épaisseur du couvert neigeux mais une altitude équivalente à partir de laquelle il est possible de déduire une estimation du comportement moyen du manteau. Les valeurs de l'altitude équivalente peuvent être calculées à partir de l'expression  $h_{eq} = f_x^{-1}(\Delta x_{H-E})$ .

La figure V-10 représente les cartes des altitudes équivalentes pour les sites de Risoul et Izoard obtenues par rétro-projection des variations temporelles des paramètres polarimétriques  $\bar{\alpha}$ , H et  $\sigma_{hv}$ .

La figure V-11 représente, pour les sites de Risoul et Izoard, les cartes de la différence entre l'altitude équivalente d'un point et son altitude vraie, donnée par le MNT.

En effet, la neige n'est pas un milieu uniforme du fait des variations topographiques et des conditions météorologiques durant la période d'enneigement. En milieu alpin, des hétérogénéités sont fréquemment rencontrées sous la forme de zones d'accumulation, principalement dues au transport de la neige par les vents et des zones d'ablation.

Lorsqu'un point présente un comportement égal au comportement moyen donné par son altitude physique, la différence entre les altitudes équivalente et vraie est nulle.

Une valeur positive indique que le point considéré possède un comportement généralement observé à des altitudes physiques supérieures. Ceci pourrait traduire une épaisseur plus importante et ainsi être utilisé pour décrire l'hétérogénéité du couvert due à des phénomènes d'accumulation et

de variations locales de relief couramment rencontrées dans les Alpes. Inversement, des valeurs négatives pourraient être reliées à une épaisseur inférieure à la moyenne altitudinale.

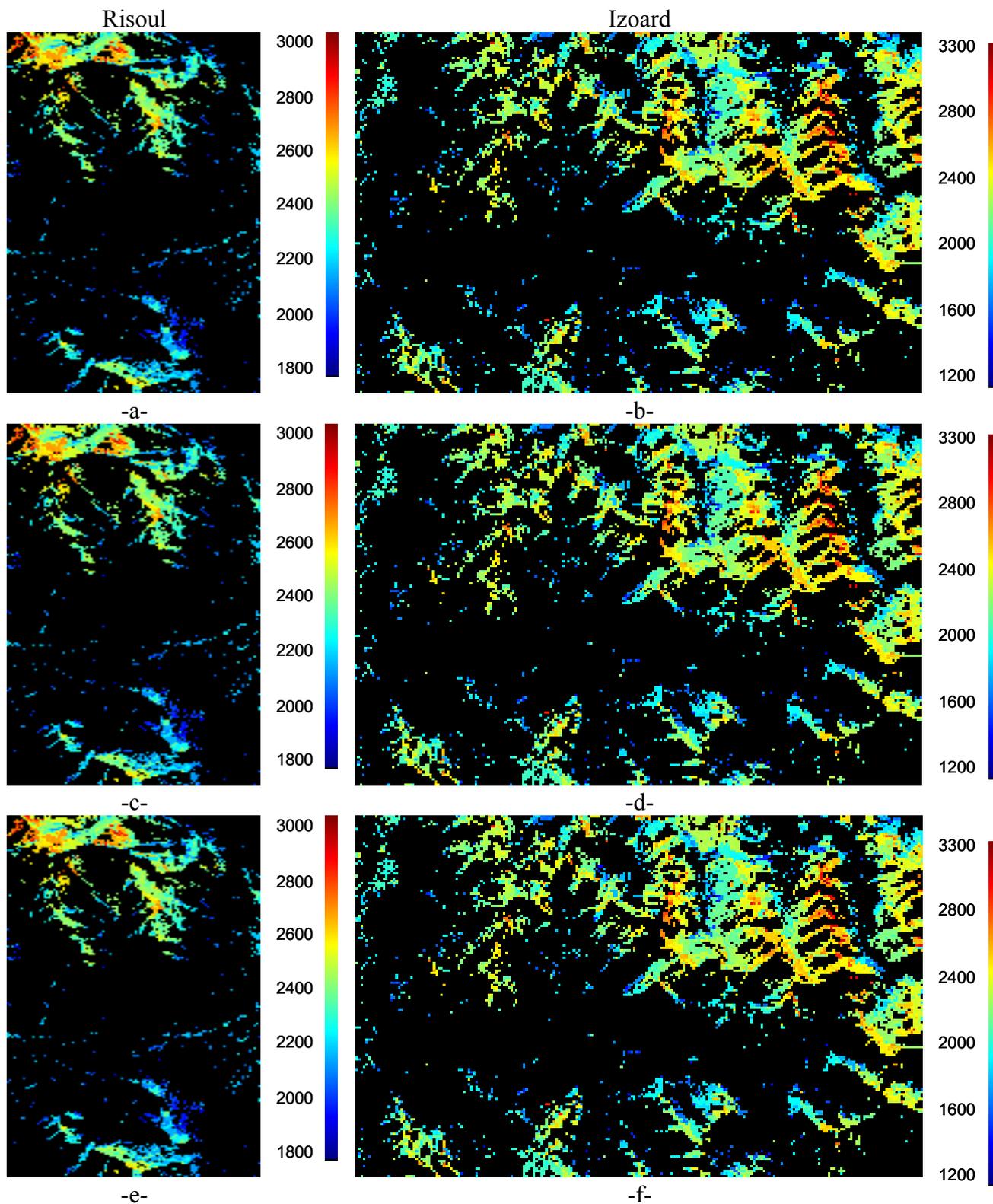


Figure V-10 Cartes des altitudes équivalentes, pour les sites de Risoul et Izoard, obtenues à partir des variations temporelles été-hiver des paramètres polarimétriques de : -a- et -b- l'angle  $\bar{\alpha}$ , -c- et -d- l'entropie  $H$ , -e- et -f- le coefficient de rétrodiffusion  $\sigma_{hv}$

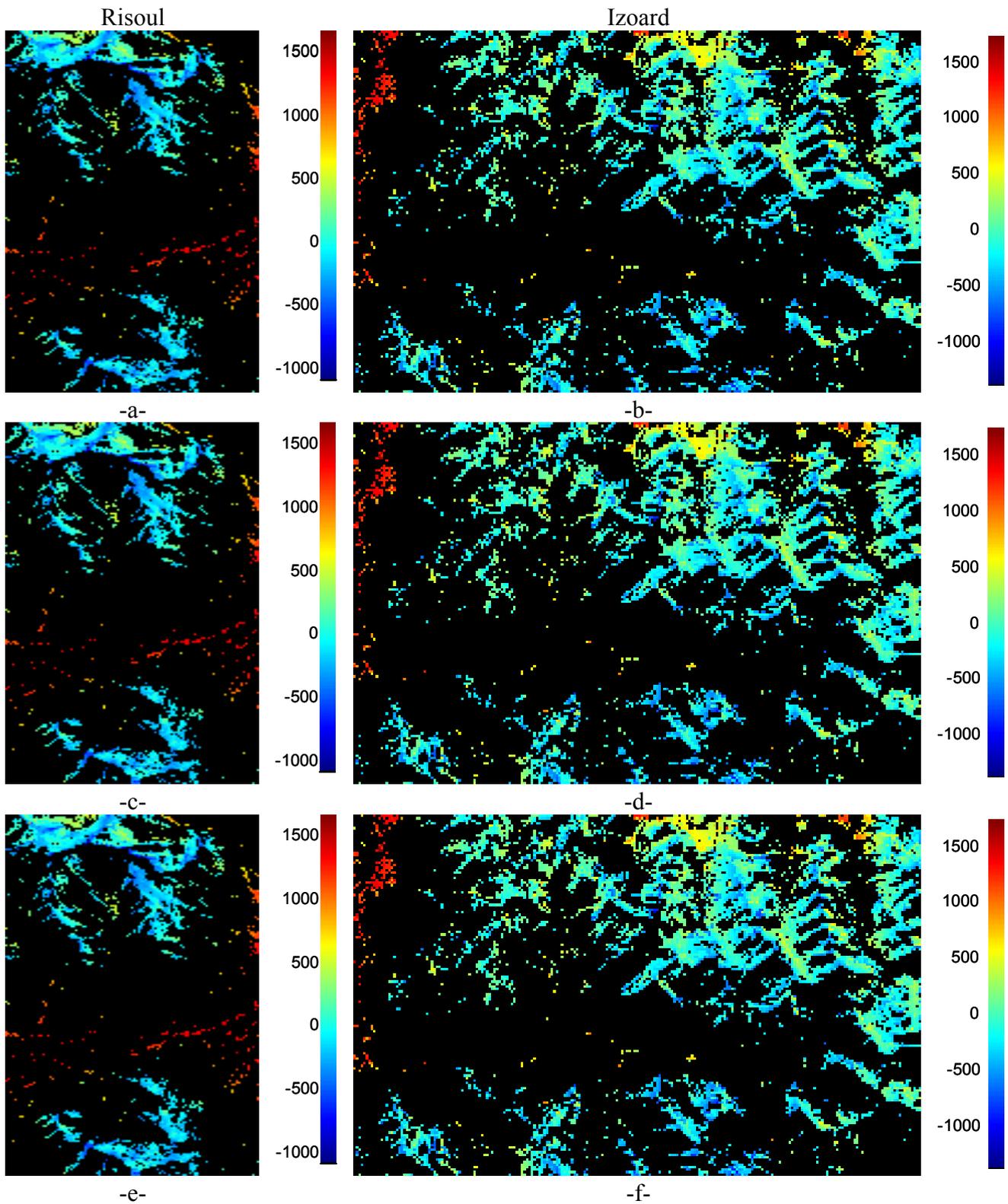


Figure V-11 Cartes de la différence entre l'altitude vraie et l'altitude équivalente, pour les sites de Risoul et Izoard, obtenues à partir des variations temporelles été-hiver des paramètres polarimétriques de : -a- et -b- l'angle  $\bar{\alpha}$ , -c- et -d- l'entropie  $H$ , -e- et -f- le coefficient de rétrodiffusion  $\sigma_{hv}$

## V.4 Conclusion

L'analyse de milieux naturels au moyen de données SAR polarimétriques a souvent comme perspective l'extraction des paramètres bio- et géo-physiques de l'environnement. Ce chapitre présente une étape préliminaire, à l'inversion de données SAR, qui consiste à estimer le comportement polarimétrique altitudinal d'un couvert neigeux.

Dans un premier temps, un examen des données fournies par différents systèmes de mesure est mené. Des résultats de simulation de l'épaisseur de la neige en fonction de l'altitude obtenus par le modèle CROCUS, sont comparés à des épaisseurs de neige mesurées sur le terrain ainsi qu'à des informations extraites des données optiques Landsat. Il apparaît un manque d'adéquation entre toutes ces données.

De plus une étude des variations été-hiver en fonction de l'altitude de paramètres polarimétriques tels que l'angle  $\bar{\alpha}$ , l'entropie H et le coefficient  $\sigma_{hv}$  conduite pour différentes orientations, nord, est et ouest, montre l'influence non significative de la neige sur la réponse rétrodiffusée à des altitudes inférieures à 2000 m. Néanmoins, un comportement linéaire des variations temporelles en fonction de l'altitude est mis en évidence pour des altitudes supérieures à 2000 m environ. Des droites de régression sont alors tracées reliant ainsi directement une altitude à une variation été-hiver d'un indicateur donné.

Ainsi, dans un second temps, une approche alternative est proposée pour évaluer les variations du comportement polarimétrique en fonction de l'altitude. Une carte d'altitude équivalente est construite à partir d'une carte des variations temporelles et de la droite de régression associée.

En outre, une information sur la déviation du comportement polarimétrique peut être obtenue à partir de l'altitude vraie et de l'altitude équivalente.

L'information contenue alors dans une carte d'altitude équivalente permet une interprétation du comportement moyen du couvert neigeux.

# CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

Le travail présenté dans cette thèse s'oriente autour de deux axes majeurs qui sont d'une part l'élaboration d'un modèle de diffusion dans le but de caractériser la diffusion électromagnétique d'un couvert de neige au moyen de paramètres polarimétriques et d'autre part la mise en place de méthodes de cartographie d'un manteau de neige sèche, en régions alpines, à partir de données SAR polarimétriques.

Les travaux de recherche développés dans ce mémoire ont été validés à partir des données SAR polarimétriques multi-temporelles et multi-fréquentielles acquises par le capteur polarimétrique SIR-C sur les Alpes françaises. Ces données sont complétées par des mesures terrain et des images optiques Landsat Thematic Mapper. De plus, afin de pouvoir comparer les images SAR, définies dans le plan oblique de visée et les images optiques, dont le référentiel est généralement lié à une projection au sol, il a été nécessaire de mettre au point une transformation géométrique permettant de passer d'un référentiel à l'autre. Pour ce faire, un modèle numérique de terrain (MNT), produit à partir de données SRTM, est utilisé.

Dans le but d'évaluer le comportement polarimétrique d'un couvert neigeux, un modèle de diffusion incohérent est présenté dans le troisième chapitre. Cette étape nécessite la connaissance des propriétés physiques et électromagnétiques permettant de caractériser un tel milieu, généralement défini par sa densité, sa teneur en eau liquide, son épaisseur et sa constante diélectrique.

Le modèle de diffusion présenté est développé à partir de la méthode du transfert radiatif et permet de modéliser la réponse électromagnétique d'une couche de neige. Une résolution semi-analytique et itérative à l'ordre un de l'équation intégral-différentielle du transfert radiatif vectorielle permet de mettre en évidence les différents mécanismes de diffusion participant au phénomène global ainsi que leur origine physique. Une procédure de quadrature gaussienne est utilisée afin de rendre possible le calcul de la diffusion d'une surface rugueuse sur toutes les particules du couvert neigeux. L'importance relative de chaque mécanisme dans la réponse rétrodiffusée totale est analysée en fonction de paramètres pertinents comme la fréquence d'observation, l'angle d'incidence, l'épaisseur du couvert neigeux et la densité. Une étude du comportement polarimétrique d'un couvert de neige est finalement conduite, dans un premier temps pour chaque mécanisme de diffusion puis pour la réponse rétrodiffusée totale. La nature de la diffusion et son caractère aléatoire sont définis au moyen de l'angle  $\bar{\alpha}$  et de l'entropie. Des comportements spécifiques à la fréquence d'observation se dégagent de cette étude. En effet en bande L, il apparaît que le mécanisme de diffusion dominant, quel que soit l'angle d'incidence est la rétrodiffusion de surface engendrée

par l'interface neige-sol. Au contraire en bande C, les mécanismes liés à la diffusion des particules deviennent prépondérants pour des angles supérieurs à  $35^\circ$ .

Le quatrième chapitre concerne l'élaboration de méthodes polarimétriques permettant de discriminer la neige sèche en milieu alpin.

Une analyse statistique des variations temporelles et fréquentielles des données SAR polarimétriques des sites d'étude est menée au moyen des paramètres polarimétriques H et  $\bar{\alpha}$  afin d'estimer leur pouvoir de discrimination de la neige. Il apparaît que seules les variations temporelles en bande C de l'angle  $\bar{\alpha}$  sur les régions forestières rendent possible la détection d'un couvert de neige sèche. Cette étude met en évidence la nécessité de mettre au point des méthodes de classification des milieux sous jacents à partir des données automnales et d'adapter les procédures de discrimination de la neige en fonction de ces milieux.

Une première approche séquentielle, multi-temporelle et multi-fréquentielle est présentée. La classification automnale des surfaces et des forêts est établie à partir des données en bande L. Une méthode de localisation des forêts, basée sur une combinaison entre l'entropie et l'anisotropie, est appliquée sur ces données. La détection de régions de surfaces est, quant à elle, effectuée à partir d'une technique qui évalue le type des mécanismes dominants à partir d'une décomposition polarimétrique aux valeurs et vecteurs propres.

Deux méthodes spécifiques à chaque milieu sont alors développées pour discriminer la présence de la neige à partir des données en bande C. La présence de la neige sur les régions forestières est détectée au moyen des variations temporelles de l'indicateur  $\bar{\alpha}$ . Sur les régions de surface une méthode d'optimisation de la variation du contraste polarimétrique, appelée PCVE (Polarimetric Contrast Variation Enhancement), est développée. Cette méthode originale et novatrice est une technique supervisée nécessitant la connaissance a priori de zones d'apprentissage enneigées et non enneigées des données en période hivernale afin d'évaluer l'état de polarisation optimal pour des zones de références. La dernière étape de cette technique consiste à appliquer cet état de polarisation à l'ensemble des données pour discriminer les régions de surface enneigées.

Dans le but de restreindre la localisation de la neige sèche à une étude mono-fréquentielle, des procédures de classification des surfaces et des forêts sont appliquées aux données en bande C. Dans un premier temps, les techniques utilisées en bande L sont employées dans le cas de la bande C. Les résultats de cette approche sont ensuite comparés à ceux obtenus pour des procédures adaptées au comportement polarimétrique spécifique des milieux sous jacents en bande C, où l'entropie seule suffit à détecter les régions forestières et l'angle  $\bar{\alpha}$  les surfaces. La neige est alors discriminée sur chaque milieu à partir des mêmes méthodes que celles décrites précédemment.

La validité de ces méthodes de cartographie de la neige sèche est estimée en comparant les résultats obtenus avec les images optiques Landsat projetées dans le plan d'incidence radar. Il apparaît alors que ces différentes approches présentent des performances similaires et très satisfaisantes avec un taux de bonne détection de la neige atteignant des valeurs de l'ordre de 80%.

Finalement le dernier chapitre propose une analyse du comportement polarimétrique altitudinal d'un couvert neigeux. Une étude des variations été-hiver des paramètres polarimétriques comme l'entropie, l'angle  $\bar{\alpha}$  et le coefficient de rétrodiffusion en polarisation croisée en fonction de l'altitude affiche un comportement linéaire pour des altitudes supérieures à 2000 m. Des relations reliant directement une altitude à une variation été-hiver d'un indicateur donné sont alors obtenues à partir de droites de régression. Au vue de la difficulté à établir des relations directes d'inversion, une approche alternative est proposée pour évaluer les variations du comportement polarimétrique en

---

fonction de l'altitude. Une carte d'altitude équivalente est alors construite par rétro-projection à partir des droites de régression et d'une image des variations temporelles du paramètre polarimétrique considéré. De plus en tenant compte de l'altitude vraie d'un point, fournie par le MNT, il est possible d'estimer la déviation de son comportement polarimétrique.

Les objectifs initiaux de cartographie de la neige sèche et de caractérisation de son comportement altitudinal au moyen de paramètres polarimétriques pertinents ont été atteints.

Les principales perspectives de cette étude peuvent être regroupées selon deux axes majeurs.

Le premier concerne l'amélioration des techniques développées durant ces travaux de thèse. Il apparaît en effet important de tester la robustesse des procédures de détection de la neige sèche en les appliquant sur des nouvelles scènes qui diffèrent en terme d'enneigement, de topographie et de localisation géographique. La prise en compte du relief lors de la discrimination de la neige devrait permettre d'augmenter les taux de détection, déjà importants, en améliorant la localisation sur des zones à très forte topographie, pour des angles d'incidence supérieurs à 60°.

La partie supervisée de la méthode PCVE présentée pourrait être évitée au moyen d'une étude comparative des états de polarisation maximisant le rapport de contraste. Cette comparaison devrait permettre de dégager un état de polarisation moyen, qui constituerait une solution générale au problème d'optimisation et qui pourrait être utilisé *a priori* lors de la formation du contraste été-hiver utilisé lors de la discrimination de la neige sur les surfaces.

Le second aspect des perspectives concerne l'estimation quantitative des paramètres physiques du couvert neigeux. Une analyse qualitative a été développée durant ce travail de thèse, qui laisse entrevoir des possibilités d'inversion de paramètres comme par exemple la hauteur du manteau neigeux et sa densité.



---

# RÉFÉRENCES

---

- [Abramowitz 70] Abramowitz M., I. A. Stegun, "Handbook of mathematical functions," Dover publications, INC., New York, ISBN 486-61272-4, 1970.
- [Allain 03] Allain S., "Caractérisation d'un sol nu à partir de données SAR polarimétriques – Etudes multi-fréquentielle et multi-résolutions," Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, France, Décembre 2003.
- [Bernier 95] Bernier M., J. P. Fortin, J. P. Dedieu, "Suivi du couvert nival par Radarsat dans les Alpes françaises; application d'une approche développée au Québec," Journal Canadien de Télédétection, vol. 22, no 1, pp. 53-64, 1995.
- [Bernier 98a] Bernier M., J. P. Fortin, "The potentiel of time series of C-band SAR data to monitor dry and shallow cover," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.36, no.1, pp. 226-241, 1998.
- [Bernier 98b] Bernier M., J. P. Fortin, Y. Gauthier, "EQ-Eau : an operational monitoring prototype for snow water equivalent estimation from Radarsat images," Prog. In Electromag. Res. Symp. 1998, JIPR4, Nantes, France, Juillet 1998.
- [Boerner 90] Boerner W. M., W. C. Yan, "Introduction to radar polarimetry, with assessments of the historical development and of the current state of art," JIPR, Nantes, France, Mars 1990.
- [Boerner 91] Boerner W. M., W.-L. Yan, A.-Q. Xi, Y. Yamaguchi, "On the principles of radar polarimetry : the target characteristic polarization state theory of Kennaugh, Huynen's polarization fork concept, and its extension to the partially polarized case," IEEE Proc., Special Issue on Electromagnetic Theory, vol. 79.10, pp. 1538-1550, October 1991.
- [Boerner 92] Boerner W. M., "Direct and inverse methods in radar polarimetry," Dorecht, Boston, London, Kluwer academy publishers, 1992.
- [Boerner 93] Boerner W. M., C. L. Liu and X. Zhang, "Comparison of the optimisation procedures for the 2 x 2 Sinclair and the 4 x 4 Mueller matrices in the coherent polarimetry application to radar target versus background clutter discrimination in microwave sensing and imaging," Int. J. Adv. Remote Sensing, vol. 2, pp. 55-82, January 1993.

- [Boerner 95] Boerner W. M., E. Lueneburg, H. Mott, Z. H. Czyz, J. J. Van Zyl, P. Dubois, S. R. Cloude, M. Tanaka, Y. Yamaguchi, A. I. Kozlov, "Formulation of unique sets of polarimetric radar scattering matrices for the forward propagation (similarity) versus backward scattering (con-similarity) arrangements and the development of the associated optimal polarimetric contrast enhancement coefficient," JIPR3, Nantes, France, Mars 1995.
- [Borgeaud 87] Borgeaud M., R. T. Shin, J. A. Kong, "Theoretical models for polarimetric radar clutter," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 1, no. 1, pp. 73-89, 1987.
- [Bouteloup] Bouteloup D., "Module expérimental de formation à distance en géodésie," Institut Géographique National, Ecole Nationale des Sciences Géographiques,  
[http://www.ensg.ign.fr/~bouteloup/www/wwwfad/site\\_fad/pdf/index\\_pdf.htm](http://www.ensg.ign.fr/~bouteloup/www/wwwfad/site_fad/pdf/index_pdf.htm).
- [Brun 89] Brun E., E. Martin, V. Simon, C. Gendre, C. Coleou, "An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting," *Journal of Glaciology*, vol. 35, no 121, pp. 333-342, 1989.
- [Brun 94] Brun E., Y. Durand, E. Martin, L. Braun, "Snow modelling as an efficient tool to simulate snow cover evolution at different spatial scales," IAHS publication, n° 223, pp. 163-176, 1994.
- [Cloude 86] Cloude S. R., "Polarimetry : the characterisation of the polarisation effects in EM scattering," Ph. D. Dissertation, University of Birmingham, United Kingdom, October 1986.
- [Cloude 96] Cloude S. R. and E. Pottier, "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34. no. 2, March 1996.
- [Cloude 97] Cloude S. R. and E. Pottier, "An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, no. 1, pp. 68-78, January 1997.
- [Colbeck 82] Colbeck S. C., "The geometry and permittivity of snow at high frequencies," *Journal of Applied Physics*, vol. 53, pp. 4495-4500, 1982.
- [Corbane 05] Corbane C., J. Somma, M. Bernier, J. P. Fortin, Y. Gauthier, J. P. Dedieu, "Estimation de l'équivalent en eau du couvert nival en montagne libanaise à partir des images RADARSAT-1," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 50, no. 2, Avril 2005.
- [Cumming 52] Cumming W., "The dielectric properties of ice and snow at 3.2 cm," *Journal of Applied Physics*, vol. 23, pp. 768-773, 1952.

- 
- [Dahon 04] Dahon C., "Contribution à l'analyse de la réponse polarimétrique d'un couvert forestier," Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, France, Décembre 2004.
- [Debye 29] Debye P., "Polar molecules," New York : The Chemical Catalog Company Inc., 1929.
- [Denoth 84] Denoth A., A. Foglar, P. Weiland, C. Mätzler, H. Aebischer, M. Tiuri, A. Sihvola, "A comparative study of instruments for measuring the liquid water content of snow," *Journal of Applied Physics*, vol. 56, pp. 2154-2160, 1984.
- [Durand 93] Durand Y., E. Brun, L. Mérindol, G. Guyomarch, B. Lesaffre, R. Martin, "Meteorological estimation of relevant parameters for snow models," *Annals of glaciology*, vol. 18, pp. 65-72, 1993.
- [Durden 89] Durden S. L., J. J. van Zyl, H. A. Zebker, "Modeling and observation of the radar polarization signatures of forested areas," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 27, no. 3, pp. 290-301, May 1989.
- [Eom 84] Eom H. J. and A. K. Fung, "A scatter model for vegetation up to Ku-band," *Remote Sensing of Environment*, 19, pp. 139-149, 1984.
- [Ferro-Famil 00] Ferro-Famil L., "Télé-détection multi-fréquentielle et multi-temporelle d'environnements naturels à partir de données SAR polarimétriques," Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, Décembre 2000.
- [Ferro-Famil 03] Ferro-Famil L., E. Pottier, J. S. Lee, "Unsupervised classification of natural scenes from polarimetric interferometric SAR data," in "Frontiers of remote sensing information processing," pp. 105-137, C. H. Chen Chief Editor, Ed. World Scientific Publishing, July 2003, ISBN 981-238-344-1.
- [Floricioiu 97] Floricioiu D., "Polarimetric signatures and classification of alpine terrain by means of SIR-C / X-SAR," Thèse, Université d'Innsbruck, Autriche, Octobre 1997.
- [Freeman 98] Freeman A., S. L. Durden "A three-component scattering model for polarimetric SAR data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 3, pp. 963-973, May 1998.
- [Fung 92] Fung A. K., Z. Li and K. S. Chen, "Backscattering from a randomly rough dielectric surface," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 356-369, March 1992.
- [Fung 94] Fung A. K., "Microwave scattering and emission models and their applications," Artech House, 1994.

- [Gailhard 05] Gailhard J., "Comparaison de différentes approches pour quantifier le couvert neigeux à l'échelle d'un bassin versant," Société Hydrotechnique de France, 16 pp., Paris 2005.
- [Germond 01] Germond A. L., E. Pottier, J. Saillard, "Bistatic radar polarimetry theory," in "Ultra-wideband radar technology," pp. 379-414, James D. Taylor, PE., CRC Presse, 2001.
- [Gunteriusen 97] Gunteriusen T., "Backscattering properties of a wet snow cover derived from DEM corrected ERS-1 SAR data," *Int. J. Remote Sensing*, vol. 18, no. 2, pp. 375-392, 1997.
- [Hallikainen 82] Hallikainen M. T., F.T. Ulaby, M. Abdelrazik, "Measurements of the dielectric properties of snow in the 4-18 GHz frequency range," In 12<sup>th</sup> European Microwave Conference Proceeding's, pp. 151-156, Tunbridge Wells, Kent, United Kingdom : Microwave Exhibitions, 1982.
- [Hallikainen 86] Hallikainen M. T., F.T. Ulaby, M. Abdelrazik, "Dielectric properties of snow in the 3 to 37 GHz range," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-34, no.11, pp. 1329-1340, November 1986.
- [Hallikainen 01] Hallikainen M., J. Pulliainen, J. Praks, A. Arslan, "Progress and challenges in radar remote sensing of snow," Proceeding of. 3<sup>rd</sup> International Symposium, Retrieval of Bio- and geophysical parameters for SAR data, Sheffield, United Kingdom, September 2001.
- [Huynen 70] Huynen J. R., "Phenomenological theory of radar targets," Ph. D. Dissertation, Drukkerij Bronder-Offset N.V., Rotterdam, The Netherlands, 1970.
- [Ioannidis 79] Ioannidis G. A. and D. E. Hammers, "Optimum antenna polarizations for target discrimination in clutter," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-27, pp. 357-363, March 1979.
- [Ishimaru 78] Ishimaru A., "Wave propagation and scattering in random media," vol. I-II, New York Academic, 1978.
- [Ishimaru 80] Ishimaru A., R. L.-T. Cheung, "Multiple scattering effects on wave propagation due to rain," *Ann. Telecommunication*, vol. 35, pp. 373-379, 1980.
- [Karam 83] Karam M. A. and A. K. Fung, "Scattering from randomly orientated circular disks with applications to vegetation," *Radio Science*, vol. 18, pp. 557-565, 1983.
- [Kendra 95] Kendra J. R., "Microwave remote sensing of snow : An empirical / theoretical scattering model for dense random media," Ph. D. Dissertation, University of Michigan, United State of America, 1995.

- 
- [Kendra 97] Kendra J. R., K. Sarabandi, F. T. Ulaby, "Radar measurement of snow: Experiment and analysis," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, no. 3, May 1997.
- [Koskinen 97] Koskinen J.T., J.T. Pulliainen, M.T. Hallikainen, "The use of ERS-1 SAR data in snow melt monitoring", IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 35, no. 3, May 1997.
- [Kostinski 86] Kostinski A.B., W.M. Boerner, "On foundations of radar polarimetry," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-34, pp. 1395-1404, December 1986.
- [Kostinski 87] Kostinski A.B., W.M. Boerner, "On the polarimetric contrast optimization," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-35, pp. 988-991, August 1987.
- [Lee 99] Lee J. S., M. R. Grunes, G. de Grandi, "Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.37, no.5, September 1999.
- [Lee 01] Lee J. S., M. R. Grunes, E. Pottier, "Quantitative comparison of classification capability: fully polarimetric versus dual and single-polarization SAR," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.39, no.11, November 2001.
- [Magagi 03] Magagi R., M. Bernier, "Optimal conditions for wet snow detection using Radarsat SAR data," Remote sensing environments, vol. 84, no. 2, pp. 221-233, 2003.
- [Malnes 02] Malnes E., T. Guneriussen, "Mapping of snow covered area with Radarsat in Norway," In Proceeding of IGARSS'02, Toronto, Canada, Juillet 2002.
- [Marbouty 83] Marbouty D., "La neige: propriétés physiques," Etablissement d'études et de recherches Météorologiques, Saint-Martin d'Hères, ISSN 0245-9280, 1983.
- [Martini 03] Martini A., L. Ferro-Famil, E. Pottier, "Polarimetric study of scattering from dry snow cover in alpine areas," In Proceeding of IGARSS'04, Toulouse, France, Juillet 2003.
- [Martini 04a] Martini A., L. Ferro-Famil, E. Pottier, "A polarimetric contrast variation enhancement method to discriminate dry snow in alpine areas," In 4<sup>th</sup> International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Innsbruck, Autriche, Novembre, 2004.
- [Martini 04b] Martini A., L. Ferro-Famil, E. Pottier, "Snow Extent Discrimination in Alpine Areas from Polarimetric and Multi-Frequency SAR Data," In Proceeding of EUSAR 2004, Ulm, Allemagne, Mai 2004.
-

- [Martini 04c] Martini A., L. Ferro-Famil, E. Pottier, "Multy-frequency polarimetric snow discrimination in alpine areas," In Proceeding of IGARSS'04, Anchorage, Alaska, Septembre 2004.
- [Martini 05a] Martini A., L. Ferro-Famil, E. Pottier, J. P. Dedieu, "Dry snow discrimination in alpine areas from multi-frequency and multi-temporal SAR data," *Accepté pour la revue IEE Radar, Sonar and Navigation*, 2005, (Papier invité).
- [Martini 05b] Martini A., L. Ferro-Famil, E. Pottier, J. P. Dedieu, "Dry snow mapping in mountainous regions from fully polarimetric SAR data," In Proceeding of POLINSAR'05, Frascati, Italie, Janvier 2005.
- [Martini 05c] Martini A., L. Ferro-Famil, E. Pottier, "Dry snow extent monitoring in strong topography conditions," In Proceeding of IGARSS'05, Séoul, Corée, Juillet 2005.
- [Martini 05d] Martini A., J. P. Dedieu, L. Ferro-Famil, M. Niang, Y. Durand, E. Paquet, M. Bernier, E. Pottier, "Snow extent mapping in alpine areas using different SAR polarimetric configurations," In Proceeding of EARSeL 2005, Remote Sensing of Snow and Ice, Bern, Suisse, Février 2005.
- [Mätzler 84] Mätzler C., H. Aebischer, E. Schanda, "Microwave dielectric properties of surface snow," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, OE-9, pp. 366-371, 1984.
- [Mätzler 87] Mätzler C., "Applications of the interaction of microwaves with the natural snow cover," *Remote Sensing Reviews*, vol.2, pp. 259-387, 1987.
- [Mätzler 96] Mätzler C., "Microwave permitivity of dry snow," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34-2, pp. 573-581, 1996.
- [Nägler 96] Nägler T., "Methods and analysis of synthetic aperture radar data from ERS-1 and X-SAR for snow and glacier applications," Thèse, Université d'Innsbruck, Autriche, Octobre 1996.
- [Nägler 00] Nagler T., H. Rott, "Retrieval of wet snow by means of multi-temporal SAR data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 2, pp. 754-765, March 2000.
- [Nägler 05] Nagler T., H. Rott, "Snow cover retrieval using Envisat ASAR," In Proceeding of EARSeL 2005, Remote Sensing of Snow and Ice, Bern, Suisse, Février 2005.
- [Nyfors 83] Nyfors E., "On the dielectric properties of dry snow in the 800 MHz to 13 GHz region," Helsinki University of Technology, Radio Laboratory, Report S. 135, 1983.

- 
- [Oh 92] Oh Y., K. Sarabandi, F. T. Ulaby, "An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 370-381, March 1992.
- [Pahaut 75] Pahaut E., "Les cristaux de neige et leurs métamorphoses," Monographie n° 96 de la Météorologie Nationale, 1975.
- [Pahaut 91] Pahaut E. et C. Sergent, "La neige - Formation et Evolution," Centre National de Recherches Météorologiques, Centre d'Etudes de la Neige, St Martin D'Hères, Octobre 1991.
- [Paquet 01] Paquet E, R. Garçon, "Caprices du climat et de l'hydrologie en haute montagne : nos prévisions d'apports plurimensuels sont-elles encore fiables ?," Société Hydrotechnique de France, 15 pp., Paris 2001.
- [Polder 46] Polder D. and J. H. van Santen, "The effective permeability of mixtures of solids," *Physica*, vol. 12, no. 5, pp. 257-271, 1946.
- [Pottier 90] Pottier E., "Contribution de la polarimétrie dans la discrimination de cibles radar. Application à l'imagerie électromagnétique haute résolution," Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, France, Décembre 1990.
- [Pottier 92] Pottier E., J. Saillard, "Fondements mathématiques de la polarimétrie et son application au domaine du radar," *Annales des télécommunications*, 47, no. 7-8, 1992.
- [Sergent 93a] Sergent C., E. Pougatch, M. Sudul, B. Bourdelles, "Experimental investigation of optical properties for various types of snow," *Annals of glaciology*, vol. 17, pp. 281-287, 1993.
- [Sergent 93b] Sergent C., "Propriétés physiques de la neige," Centre National de Recherches Météorologiques, Centre d'Etudes de la Neige, St Martin D'Hères, Novembre 1993.
- [Sergent 98] Sergent C., "Les métamorphoses de la neige," *Neige et Avalanches*, n° 83, Septembre 1998.
- [Shi 93] Shi J., J. Dozier and H. Rott, "Modeling and observation of polarimetric SAR response to dry snow," *Proceedings of IGARSS'93*, Tokyo, Japan, 1993.
- [Shi 94] Shi J., J. Dozier, H. Rott, "Snow mapping in Alpine regions with synthetic aperture radar", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 1, January 1994.

- [Shi 00a] Shi J., J. Dozier, "Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR, Part I : Inferring snow density and subsurface properties," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, no. 6, pp. 2465-2474, November 2000.
- [Shi 00b] Shi J., J. Dozier, "Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR, Part II : Inferring snow depth and particle size," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, no. 6, pp. 2475-2488, November 2000.
- [Storvold 05] Storvold R., E. Malnes, I. Lauknes, "Snow covered retrieval using Envisar ASAR in mountainous areas," In Proceedins of EARSeL 2005, Remote Sensing of Snow and Ice, Bern, Suisse, Février 2005.
- [Tiuri 84] Tiuri M., A. H. Sihvola, E. G. Nyfors, M. T. Hallikainen, "The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies," IEEE J. Oceanic Engin., OE-9, pp. 377-382, 1984.
- [Tsang 85] Tsang L., J. A. Kong, R. T. Shin, "Theory of microwave remote sensing," Wiley Interscience Publication, New-York, 1985.
- [Tsang 00] Tsang L., J. A. Kong, K.-H. Ding, "Scattering of electromagnetic waves - Theories and applications," Wiley Interscience Publication, New-York, 2000.
- [Ulaby 86] Ulaby F. T., R. K. Moore, A. K. Fung, "Microwave remote sensing: active and passive," vol. I, II, III, Dedham, MA: Artech House, 1986.
- [Ulaby 90] Ulaby F. T. and C. Elachi, "Radar polarimetry for geoscience applications," Artech House, ISBN 0-89006-406-7, 1990.
- [Van Zyl 89 ] Van Zyl J. J., "Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 27, no. 1, pp. 36-45, January 1989.
- [Van Zyl 87] Van Zyl J. J., H. A. Zebker, C. Elachi, "Imaging radar polarization signatures : Theory and observation", Radio Sciences, vol. 22, pp. 529-543, August 1987.
- [Yang 00] Yang J., Y. Yamaguchi, W. M. Boerner, S. Lin, "Numerical methods for solving the optimal problem of contrast enhancement", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, no. 2, March 2000.
- [Ya Qui Jin 93] Ya Qui Jin, "Electromagnetic scattering modelling for quantitative remote sensing," World Scientific, ISBN 981-02-1648-3, 1993.

---



# ANNEXE A

## VALIDATION DES METHODES DE CARTOGRAPHIE: APPLICATION AU SITE DE NEZER

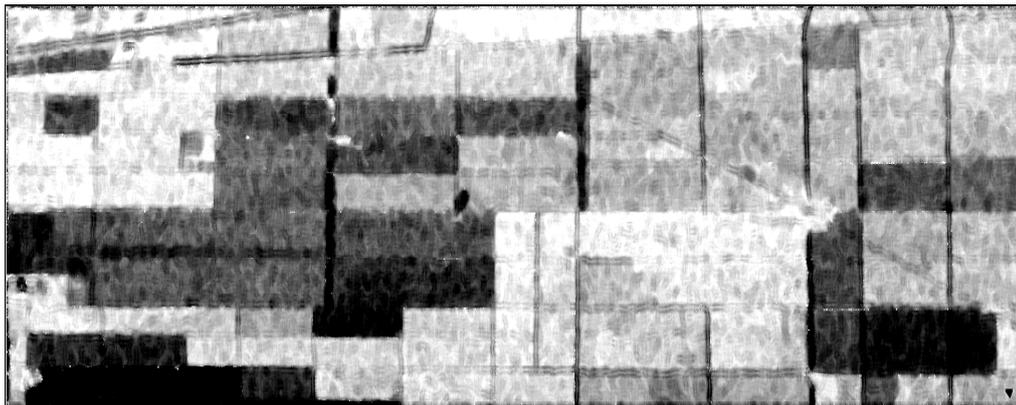
---

La forêt de Nezer est un site naturel qui est largement exploité dans la classification et les analyses du milieu forestier [Lee 01] [Dahon 04]. Ses parcelles bien définies et sa topographie peu marquée en font un site d'étude de référence.

◆ **Les données radar du site d'étude**

Le site de Nezer se situe dans la forêt des Landes dans le sud ouest de la France. Les données radar ont été acquises le 12 Août 1989, lors de la campagne MAESTRO-1 par le système SAR AIRSAR, en bandes de fréquence L et C et dans les quatre configurations de polarisation *HH*, *VV*, *HV* et *VH*. La résolution spatiale au sol des images acquises est de 12 mètres x 12 mètres. Les données sont échantillonnées en pixel de dimensions 3 mètres sur 6.6 mètres.

La figure A-1 représente une image en puissance du site. La forêt de Nezer se décompose en parcelles de sol nu et en parcelles peuplées de manière homogène de pins de même âge. L'âge des parcelles varie de 5 ans à plus de 41 ans.



*Figure A-1 Image du span de la forêt de Nezer en bande L*

L'étude de ce site est destinée à l'analyse du comportement polarimétrique des zones forestières en bandes L et C afin de valider les approches faites sur les sites de Risoul et Izoard. La nature des arbres constituant la forêt de Nezer n'est pas la même que celle des forêts alpines, néanmoins un comportement global associé à un couvert forestier peut être déduit.

◆ **Les mesures terrain**

Les mesures terrain ont été fournies gracieusement par le docteur Thuy le Toan et le laboratoire CESBIO, sous la forme d'une carte représentant symboliquement la répartition des parcelles de forêt et indiquant l'âge des arbres comme le montre la figure A-2. Le site est décomposé en huit types de parcelles dont l'âge des arbres varie de 5 ans à plus de 41 ans.

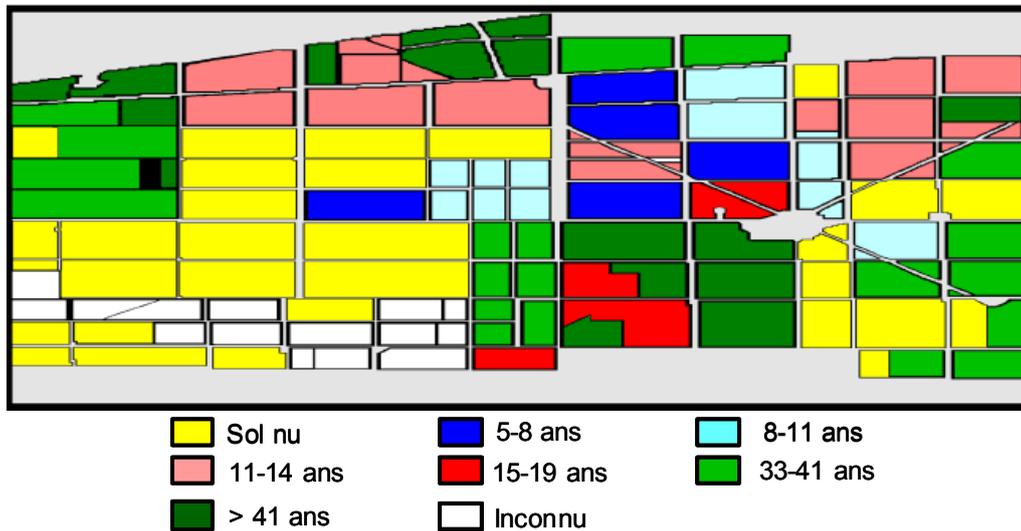


Figure A-2 Vérité terrain de la forêt de Nezer

◆ **Cartographie des forêts et des surfaces**

Les procédures de détection des forêts et des surfaces, présentées précédemment, sont appliquées sur les données AIRSAR de Nezer en bande L.

La figure A-3 décrit la cartographie complète du site, où les surfaces sont représentées en marron et les forêts en vert.

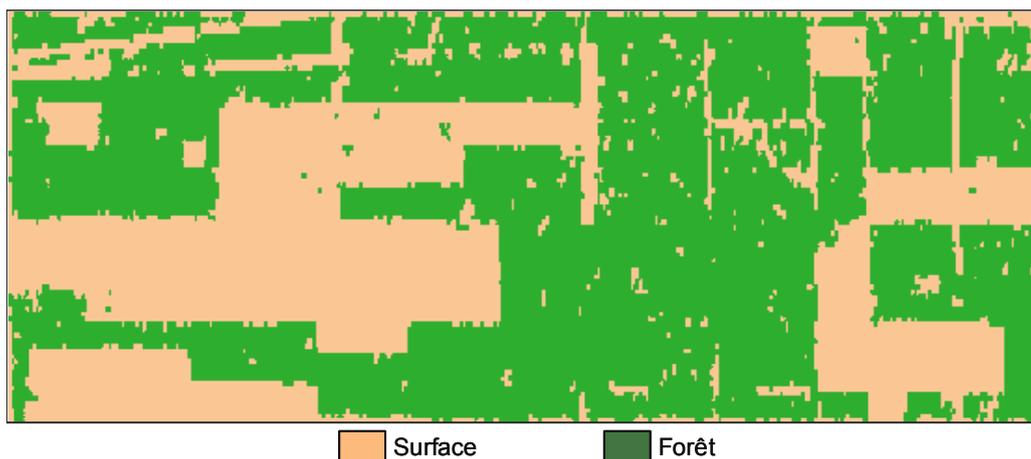


Figure A-3 Cartographie des surfaces et des forêts à partir des données en bande L de la forêt de Nezer

Bien que le site de Nezer ait des caractéristiques différentes du site alpin sur lequel les méthodes ont été adaptées, leur application à la forêt de Nezer expose un résultat très concluant quant à la séparation des deux milieux naturels présents.

# ANNEXE B

## SOLUTION NUMERIQUE DE L'OPCE

---

Parmi les différentes solutions énoncées dans la littérature, la solution numérique proposée par [Yang 00] est facile d'application et converge rapidement.

L'équation  $[\mathbf{g}_{opt}, \mathbf{h}_{opt}] = Arg \max_{(\mathbf{g}, \mathbf{h})} \left( \rho_{opce} = \frac{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_a \mathbf{g}}{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_b \mathbf{g}} \right)$  peut s'écrire sous la forme suivante pour un vecteur  $\mathbf{h}$  donné [Yang 00] :

$$[\mathbf{g}_{opt}, \mathbf{h}_{opt}] = Arg \max_{(\mathbf{g}, \mathbf{h})} \left( \rho_{opce} = \frac{A_0 + A_1 g_1 + A_2 g_2 + A_3 g_3}{B_0 + B_1 g_1 + B_2 g_2 + B_3 g_3} \right) \quad (\text{B-1})$$

où  $\mathbf{A} = [A_0 \ A_1 \ A_2 \ A_3] = \mathbf{h}^T \mathbf{K}_a$  et  $\mathbf{B} = [B_0 \ B_1 \ B_2 \ B_3] = \mathbf{h}^T \mathbf{K}_b$ .

Posons  $r_m$  la valeur maximale du rapport donné par (B-1). Alors quel que soit  $\mathbf{g}$ ,  $r_m$  vérifie l'inéquation

$$r_m \geq \frac{A_0 + A_1 g_1 + A_2 g_2 + A_3 g_3}{B_0 + B_1 g_1 + B_2 g_2 + B_3 g_3} \quad (\text{B-2})$$

La solution du problème est de trouver  $\mathbf{g}$  tel que la partie droite de l'inéquation (B-2) soit maximale. Le vecteur  $\mathbf{g}$  qui maximise cette inéquation est donné par :

$$g_i = \frac{A_i - r_m B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^3 (A_i - r_m B_i)^2}}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (\text{B-3})$$

La valeur de  $r_m$  dans (B-3) est calculée à partir de  $\mathbf{A}$  et  $\mathbf{B}$  tel que :

$$r_m = \frac{z_{12} + \sqrt{z_{12}^2 - z_1 z_2}}{z_2}$$

$$z_1 = A_0^2 - A_1^2 - A_2^2 - A_3^2 \quad (\text{B-4})$$

$$z_2 = B_0^2 - B_1^2 - B_2^2 - B_3^2$$

$$z_{12} = A_0 B_0 - A_1 B_1 - A_2 B_2 - A_3 B_3$$

De même, pour un vecteur  $\mathbf{g}$  donné, (B-1) est maximisée par :

$$h_i = \frac{A'_i - r_m B'_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^3 (A'_i - r_m B'_i)^2}}, (i = 1, 2, 3) \quad (B-5)$$

où  $\mathbf{A}' = [A'_0 \ A'_1 \ A'_2 \ A'_3] = \mathbf{K}_a \mathbf{g}$ ,  $\mathbf{B}' = [B'_0 \ B'_1 \ B'_2 \ B'_3] = \mathbf{K}_b \mathbf{g}$  et  $r_m$  est défini par (B-2), dans laquelle  $\mathbf{A}$  et  $\mathbf{B}$  sont remplacés par  $\mathbf{A}'$  et  $\mathbf{B}'$ .

L'algorithme de cette méthode numérique est représenté sur la figure B-12.

La première étape consiste à donner une valeur initiale  $\mathbf{g}_0$  au vecteur  $\mathbf{g}$  à partir duquel le vecteur  $\mathbf{h}_{n+1}$  est calculé, comme indiqué dans (B-5). Le vecteur  $\mathbf{g}_{n+1}$  est alors obtenu à partir de  $\mathbf{h}_{n+1}$  et de (B-3).

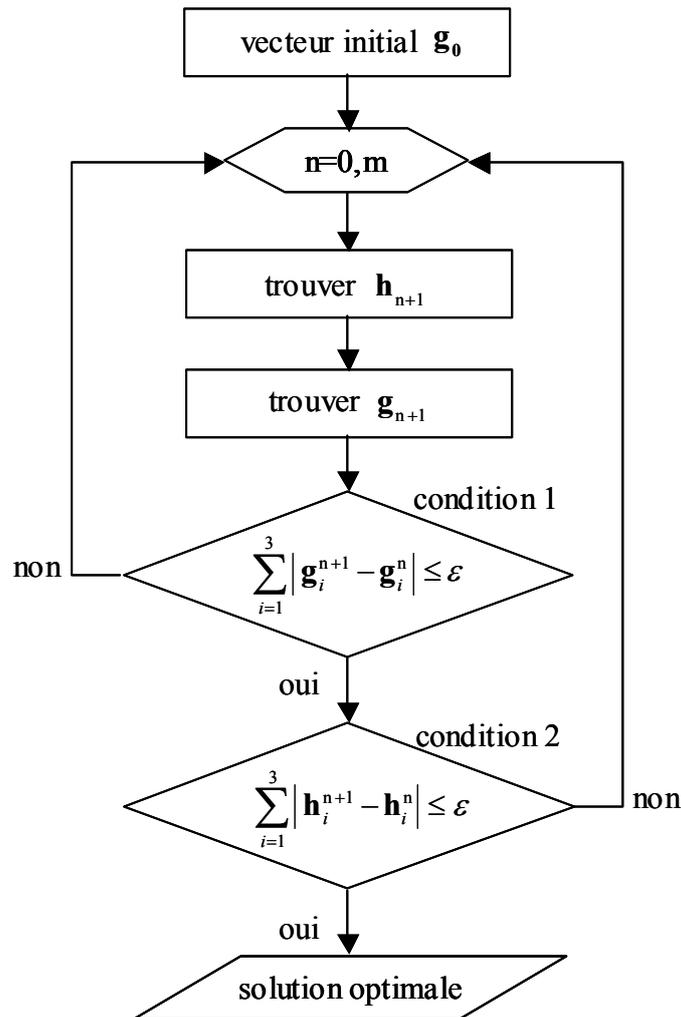


Figure B-12 Algorithme de résolution numérique de l'OPCE

