Imagerie Radar à Synthèse dOuverture interférométrique et polarimétrique. Application au suivi des glaciers alpins.

Gabriel Vasile

▶ **To cite this version:**

Gabriel Vasile. Imagerie Radar à Synthèse dOuverture interférométrique et polarimétrique. Application au suivi des glaciers alpins.. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Savoie; Université Polytechnique de Bucarest, 2007. Français. NNT : . tel-00252141

HAL Id: tel-00252141

https://theses.hal.science/tel-00252141

Submitted on 12 Feb 2008

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.

THESE

présentée conjointement à

l'UNIVERSITÉ DE SAVOIE

discipline : Électronique - Électrotechnique - Automatique

l'UNIVERSITÉ POLYTECHNIQUE DE BUCAREST

discipline : Électronique - Télécommunications - Technologie de l'Information

pour obtenir le grade de DOCTEUR par

M. Gabriel VASILE

Imagerie Radar à Synthèse d'Ouverture interférométrique et polarimétrique. Application au suivi des glaciers alpins.

Soutenue à Annecy-le-vieux le 20 juillet 2007 devant le jury d'examen :

Président :	
Eric POTTIER	Professeur - Université de Rennes I, IETR (France)
Rapporteurs :	
Philippe RÉFRÉGIER	Professeur - École Centrale de Marseille, Institut Fresnel (France)
Ridha TOUZI	Directeur de Recherche, HDR - Centre Canadien de Télédétection (Canada)
Examinateurs :	
Mihai CIUC	Maître de Conférences - Université Polytechnique de Bucarest, LAPI (România)
Jong-Sen LEE	Directeur de Recherche émérite - Naval Research Laboratory (USA)
Directeurs :	
Philippe BOLON	Professeur - Université de Savoie, LISTIC (France)
Vasile BUZULOIU	Professeur - Université Polytechnique de Bucarest, LAPI (România)
Emmanuel TROUVÉ	Maître de Conférences, HDR - Université de Savoie, LISTIC (France)
Invité :	
Michel GAY	Ingénieur de Recherche CNRS - INP Grenoble, GIPSA-lab (France)

Remerciements

Cette thèse est l'aboutissement d'une collaboration entre le Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC, Université de Savoie, France) et le Laboratoire d'Analyse et Traitement d'Images (LAPI, Université Polytechnique de Bucarest, România).

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers mes directeurs de thèse M. Emmanuel Trouvé, Maître de Conférences HDR à l'Université de Savoie, ainsi que M. le Professeur Philippe Bolon, directeur du LISTIC, et M. le Professeur Vasile Buzuloiu, directeur du LAPI. Je leur suis reconnaissant, évidemment, pour leurs contributions effectives à mon travail en tant que spécialistes dans le domaine du traitement du signal et des images. Mais ce dont je leur suis surtout reconnaissant sont les relations, j'oserais dire, d'amitié qu'ils ont su cultiver avec moi.

Je souhaite exprimer mes remerciements à M. le Professeur Philippe Réfrégier, École Centrale de Marseille et M. Ridha Touzi, Directeur de Recherche au Centre Canadien de Télédétection, pour avoir accepté d'être rapporteurs de ces travaux, et à M. le Professeur Eric Pottier, Université de Rennes I, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant ce jury. Toute ma gratitude va également à M. Jong-Sen Lee, Directeur de Recherche émérite, US Naval Research Laboratory, M. Michel Gay, Ingénieur de Recherche CNRS, GIPSA-lab et à M. Mihai Ciuc, Maître de Conférences à l'Université Polytechnique de Bucarest pour avoir accepté de faire partie du jury et pour leurs commentaires pertinents sur mes travaux.

Les résultats présentés dans ce mémoire doivent beaucoup aux travaux menés en collaboration avec M. le Professeur Jean-Marie Nicolas, ENST, M. Michel Gay, Ingénieur de Recherche CNRS, GIPSA-lab, M. Lionel Valet, Maître de Conférences à l'Université de Savoie, l'équipe de Mme. Irena Hajnsek, Chercheur Scientifique Principal, DLR-HR, l'équipe de M. Rolf Scheiber, Chercheur Scientifique Principal, DLR-HR, et l'équipe de M. le Professeur Pierre Grussenmeyer, INSA Strasbourg, ainsi qu'aux doctorants avec lesquels j'ai pu travailler, en particulier Ivan Pétillot, Lionel Bombrun, Andreea Julea, Lavinia Dârlea, Florentin Bujor, Yoann Chambenoit et Serban Oprisescu.

Je remercie finalement tous les membres du LISTIC, du LAPI et du GIPSA-lab pour l'atmosphère chaleureuse et accueillante existant dans les trois établissements de recherche.

Merci à ma famille qui a toujours été là : ma mère Angela, mon père Gheorghe et mon frère Costin. Je remercie tout particulièrement Elvira pour son aide et pour être constamment proche de moi.

Je tiens également à remercier tous les amis qui étaient là pendant la thèse : Bogdan, Filip, Mihai, Mircea, Gigi, George, Catalin, Cristi, Petre, Dia, Vladimir, Amori, Greg, Sylvie, Ludo, Fabien, Mohamed et tous les autres que j'oublie certainement et qui m'en voudront à mort de les avoir oubliés, mais sans le soutien de qui je n'aurais pas pu finir cette thèse aujourd'hui.

Les gens se divisent en deux catégories :
les uns cherchent et ne trouvent pas,
les autres trouvent et ne sont pas contents.

Mihai EMINESCU

À mon oncle Eugen,
dont la vision scientifique reste un exemple pour moi.

Table des matières

Notations **v**

Introduction **1**

I Première partie - Contexte Méthodologique **5**

1 Imagerie Radar à Synthèse d'Ouverture **7**

1.1 Introduction 8

1.2 Principes du radar à synthèse d'ouverture (SAR) 8

1.2.1 Propagation de champs électromagnétiques 8

1.2.2 Polarisation 11

1.2.3 Radar imageur 12

1.3 Formation des données SAR 14

1.3.1 Caractéristiques du signal SAR 14

1.3.2 Résolution en distance et filtrage adapté 15

1.3.3 Synthèse en azimut 18

1.3.4 Exemple des données ERS 20

1.4 Représentation incohérente d'une cible radar 21

1.5 Statistiques des données SAR multivariées 23

1.6 Théorèmes de décomposition polarimétrique incohérente 24

1.6.1 La décomposition polarimétrique $H/\alpha/A$ 24

1.7 Classification POLSAR 27

1.7.1 Partition nette de l'espace $H/\alpha/A$ 27

1.7.2 Classification C-moyennes avec la distance de Wishart 27
1.7.3 Segmentation par fusion interactive floue de l'espace $H/\alpha/A$ 28
1.8 Conclusions 30

2 L'interférométrie Radar à Synthèse d'Ouverture 33

2.1 Introduction 34
2.2 Les principes de l'interférométrie SAR 34
2.3 Formation des interférogrammes scalaires mono-polarisation 35
2.3.1 Recalage interférométrique 36
2.3.2 Calcul des images issues d'un couple interférométrique 36
2.3.3 Modèle statistique des images InSAR mono-polarisation 36
2.3.4 Interférométrie différentielle 37
2.3.5 Développement de phase 38
2.4 Formation des interférogrammes vectoriels multi-polarisation 38
2.4.1 Estimation de la cohérence complexe 38
2.4.2 Changements de base en interférométrie polarimétrique 39
2.4.3 Optimisation de la cohérence 40
2.4.4 Classification 41
2.4.5 Perspectives : Équation de Sinclair et mesures différentielles SAR 41
2.5 Conclusions 43

3 Méthodes multicomposantes de filtrage de speckle 45

3.1 Introduction 46
3.1.1 Modélisation statistique du bruit de speckle 46
3.1.2 Filtres SAR multicomposantes 49
3.2 Support spatial 51
3.2.1 Opérateur local à voisinages fixes - BN 52
3.2.2 Opérateur local à voisinages directionnels - DN 52
3.2.3 Opérateurs locaux à voisinages adaptatifs - IDAN 54

3.3 Méthode d'estimation 57
3.3.1 Estimateur multi-vues complexe - ML 58
3.3.2 Estimateur LLMMSE 58
3.3.3 Synthèse voisinage/estimateur 60
3.3.4 Filtrage des données SAR à dimension réduite 61
3.4 Compensation des composantes déterministes du signal InSAR 61
3.4.1 Franges interférométriques : Modèle sinusoïdal 2D multi-résolution 62
3.4.2 Estimation Haute Résolution - Fonction d'auto-corrélation 63
3.4.3 Application aux interférogrammes SAR 64
3.5 Résultats et évaluation des performances 66
3.5.1 SAR polarimétrique 66
3.5.2 Estimation des fréquences locales 67
3.5.3 Interférométrie SAR 73
3.5.4 Interférométrie SAR polarimétrique 75
3.6 Conclusions 87

4 Conclusions de la partie méthodologique 91

II Deuxième Partie - Application à l'observation des glaciers du massif du Mont-Blanc 93

5 Introduction 95

5.1 Présentation des glaciers étudiés : Mer-de-glace et Argentière 97
5.2 Données SAR 101
5.2.1 Données satellitaires 101
5.2.2 Données aéroportées 101
5.3 Données de terrain 102

6 Déplacements des glaciers mesurés par D-InSAR 107

6.1 Synthèse SAR : DIAPSON, ROI-PAC et SYTER 108

6.2 Génération d'interférogrammes 110
6.2.1 Évaluation de la visibilité des glaciers par ERS 111
6.2.2 Analyse des résultats InSAR 111
6.2.3 Générations d'interférogrammes différentiels SAR 115
6.3 Filtrage, développement de phase D-InSAR et géoréférencement 117
6.4 Champs de vitesse 3D 119
6.4.1 Du déplacement en ligne de visée (LOS) au champs de vitesse 3D 119
6.4.2 Comparaison avec les données terrain 121
6.4.3 Confiance de la mesure D-InSAR 123
6.5 Conclusions 126

7 Caractérisation des glaciers par imagerie POL(-In)SAR 127
7.1 Données POLSAR : comparaison entre les bandes de fréquence L et P 129
7.1.1 Cibles ponctuelles 129
7.1.2 Cibles étendues 132
7.1.3 Comparaison avec le profil GPR 135
7.2 Données POL-InSAR en bande L 137
7.3 Conclusions 143

8 Conclusions de la partie expérimentale 147

Conclusions générales et perspectives 149

Bibliographie 152

III Annexe 167

3 publications les plus significatives 169

Notations

Notations mathématiques :

$\nabla = \left[\frac{\delta}{\delta x}\ \frac{\delta}{\delta y}\ \frac{\delta}{\delta z}\right]^T$ est l'opérateur gradient.

t est la variable temps.

ω est la fréquence angulaire.

λ est la longueur d'onde.

$k = 2\pi/\lambda$ est le nombre d'onde.

$\overrightarrow{r}$ est le vecteur de position défini par rapport à un système de coordonnées spécifiques.

$\overrightarrow{E}$ est le vecteur champ électrique.

$\overrightarrow{H}$ est le vecteur champ magnétique.

$c = 2.998 \times 10^8\ m/s$ est la célérité de l'onde électromagnétique dans le vide.

$[S]$ est la matrice de diffusion.

$\vec{k}$ est le vecteur cible.

$[T]$ est la matrice de cohérence polarimétrique.

$[C]$ est la matrice de covariance polarimétrique.

$\det[A]$ est le déterminant de la matrice $[A]$.

$card(A)$ est le cardinal de l'ensemble A.

$\Gamma(x)$ est la fonction gamma.

$\overline{1, N}$ est l'ensemble formé par les indices $\{1, 2, ..., N\} \subset \mathbb{N}$.

Acronymes :

ASL (*Above Sea Level*).

BN (*Boxcar Neighborhood*) : voisinage boxcar.

ddp : densité de probabilité.

DN (*Directional Neighborhoods*) : voisinage directionnel.

FFI : système de fusion floue interactif.

GPR (*Ground Penetrating Radar*) : radar à pénétration de sol.

HR (*High Resolution*) : haute résolution.

IDAN (*Intensity Driven Adaptive Neighborhood*) : voisinage adaptatif dirigé par les intensités SAR.

LR (*Low Resolution*) : basse résolution.

LLMMSE (*Local Linear Minimum Mean Square Error*) : estimateur localement linéaire de l'erreur quadratique moyenne minimum.

LOS (*Radar Line of Sight*) : ligne de visée du radar.

MEGATOR : Mesure de l'Évolution des Glaciers Alpins par Télédétection Optique et Radar - des archives à ORFEO ; http ://gipsa-lab.inpg.fr/megator

ML (*Complex MultiLooking*) : estimateur multivues complexe.

MLE (*Maximum Likelihood Estimator*) : estimateur du maximum de vraisemblance.

MNT : modèle numérique du terrain.

MSE (*Mean Square Error*) : erreur quadratique moyenne.

MSL (*Mean Sea Level*) : niveau moyen de la mer.

SAR (*Synthetic Aperture Radar*) : radar à synthèse d'ouverture.

POLSAR (*Polarimetric Synthetic Aperture Radar*) : radar à synthèse d'ouverture polarimétrique.

InSAR (*Synthetic Aperture Radar Interferometry*) : interférométrie radar à synthèse d'ouverture.

POL-InSAR (*Polarimetric Synthetic Aperture Radar Interferometry*) : interférométrie radar à synthèse d'ouverture polarimétrique.

D-InSAR (*Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry*) : interférométrie différentielle radar à synthèse d'ouverture.

VCM (*Vector Covariance Matrix*) : méthode utilisée pour estimer les fréquences locales qui repose sur la structure bloc de la matrice de covariance d'un vecteur formé en concaténant les lignes d'une fenêtre signal [Trou-96].

Introduction

La télédétection consiste à mesurer ou plus généralement acquérir de l'information sur un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument n'ayant pas de contact avec l'objet étudié. Ce type de méthode d'acquisition utilise généralement la mesure du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchis par les objets étudiés dans un certain domaine de fréquence. Dans ce contexte, l'imagerie optique et l'imagerie radar à synthèse d'ouverture représentent deux sources d'informations complémentaires utilisables pour l'observation des objets géophysiques terrestres.

L'imagerie optique utilise la réflexion du rayonnement solaire dans le domaine spectral visible et infrarouge. L'information fournie par les capteurs optiques offre l'avantage majeur d'une interprétation visuelle aisée du contenu des images, car cette information est conforme à la perception de l'environnement par l'oeil humain. Mais ces capteurs requièrent la présence d'une source d'illumination externe (capteurs passifs) et leur utilisation est contrainte entre autre par la présence du rayonnement solaire (révolution de la Terre autour du Soleil) et par les conditions météorologiques (couverture nuageuse).

Les capteurs employés par l'imagerie radar possèdent leur propre source d'illumination (capteurs actifs) et opèrent dans le domaine des micro-ondes. Ainsi, les images radar ont le grand avantage d'être indépendantes de l'éclairement solaire et quasi-indépendantes de la couverture nuageuse. Cependant, ces données ne sont que peu exploitées par la communauté thématicienne à cause de deux phénomènes :

- le bruit de speckle (chatoiement) qui affecte la radiométrie et rend difficile l'interprétation visuelle de la scène,
- la géométrie radar qui modifie l'échantillonnage au sol des zones de fort relief.

L'imagerie radar a connu un développement rapide grâce à la technique appelée synthèse d'ouverture qui utilise le déplacement du porteur pour générer une antenne synthétique de longueur très grande. Ceci permet aux images SAR (Synthetic Aperture Radar) d'atteindre des résolutions spatiales proches de celles des images optiques.

L'intérêt porté aux données radar vient de la richesse de l'information acquise par les capteurs radar à synthèse d'ouverture. Grâce à la répétitivité des orbites, les satellites tels que ERS 1/2 ont acquis progressivement des séries d'images d'une même zone vue sous le même angle de visée. Ainsi, une première technique de l'imagerie SAR multivariée a surgit : l'interférométrie (InSAR). Cette technique analyse la différence de phase entre deux images radar à synthèse d'ouverture

acquises à partir de deux positions légèrement différentes. Les image multicomposantes InSAR présentent un grand intérêt du point de vue géophysique car elles apportent des informations régulières sur l'évolution d'un site.

En janvier 2006, le satellite japonais ALOS a été mis en orbite avec le premier capteur SAR pleinement polarimétrique embarqué sur une plateforme satellitaire civile. Il permet la mesure du champ électromagnétique rétrodiffusé par la surface terrestre comme un champ vectoriel (le cas le plus général) en préservant toute l'information polarimétrique sur le processus de rétrodiffusion. Une seconde extension multivariée de l'imagerie radar à synthèse d'ouverture, la polarimétrie (POLSAR), exploite cette information polarimétrique pour caractériser l'information liée à la nature des interactions entre l'onde électromagnétique radar et le milieu rétrodiffusant.

Depuis la fin des années 1990, les acquisitions radar aéroportées ont permis de combiner les deux techniques, InSAR et POLSAR, donnant naissance à l'imagerie multivariée radar à synthèse d'ouverture polarimétrique et interférométrique (POL-InSAR)[1]. Ces données offrent à la fois les avantages de l'interférométrie qui caractérise le trajet de l'onde électromagnétique et les avantages de la polarimétrie qui donne une information précise sur les interactions entre l'onde radar et la cible.

L'utilisation des données radar multicomposantes pose de nouveaux problèmes méthodologiques en traitement de l'information et se heurte à un ensemble de difficultés liées aux domaines d'applications. Au cours de cette thèse, nous nous sommes intéressé à ces deux aspects en développant des méthodes de traitement (filtrage, estimation de paramètres POL(-In)SAR...) et en étudiant l'apport de l'imagerie radar dans le domaine de l'observation des glaciers alpins. Ce manuscrit est ainsi structuré en deux parties. La première est consacrée aux développements méthodologiques, la seconde à l'application traitée : l'utilisation des données InSAR issues des archives satellitaires et POL(-In)SAR issues de campagnes aéroportées dans le contexte des glaciers de montagne (fort relief, milieu neige/névé/glace...).

La première partie de ce mémoire a pour objectif de présenter la problématique des données SAR polarimétriques et interférométriques dans le contexte du traitement d'images multicomposantes. La démarche proposée suit les étapes classiques d'une chaîne d'analyse et traitement de l'information illustrée dans la figure 1. Elle est composée de trois étapes :

1. **Estimation des paramètres**. Les images SAR multicomposantes POLSAR / InSAR / POL-InSAR fournissent une information "bas niveau" qui est riche mais difficile à interpréter. L'objectif de cette étape consiste à réduire la dimensionnalité des données et à extraire des attributs robustes à la fois pertinents et discriminants par rapport à l'information recherchée. L'estimation et le filtrage des données SAR multicomposantes permet le calcul d'attributs tels que la cohérence et la phase interférométriques, l'entropie, l'angle α et l'anisotropie polarimétriques, ou encore des paramètres POL-InSAR après optimisation des cohérences.

[1]Dans la suite de ce manuscrit nous avons adopté l'acronyme anglais SAR de l'imagerie radar à synthèse d'ouverture pour assurer une unité avec les acronymes POLSAR, InSAR et POL-InSAR qui n'ont pas un équivalent français généralement accepté.

2. **Classification/mesure**. La fusion des attributs est effectuée en intégrant éventuellement d'autres sources d'informations "a priori" en fonction du domaine d'application. Par exemple, la classification POLSAR non-supervisée H-α-A est une partition de l'espace des attributs avec des règles d'appartenance aux classes recherchées définies par l'expert. Dans le cas particulier de l'interférométrie SAR, cette étape correspond par exemple au développement de phase, où l'expert améliore les performances de l'algorithme par le masquage des régions non-développables. La phase développée ainsi obtenue devient une mesure de l'élévation ou du déplacement des cibles. Généralement, on obtient à la sortie de cette étape une information de plus "haut niveau" qui caractérise la scène traitée (champs de deplacement/vitesse, MNT, occupation du sol ...).
3. **Géoréférencement**. Cette dernière étape de traitement est spécifique à la télédétection radar appliquée à l'étude d'objets géophysiques terrestres. En effet, si les deux premières étapes se retrouvent dans la majorité des systèmes de traitement de l'information, les échanges entre la communauté méthodologique (traitement d'images et du signal) et la communauté thématique (géophysique) nécessitent le plus souvent une mise en géométrie terrain de l'information "haut niveau" issue de l'étape classification/mesure. De plus, dans le contexte de l'imagerie SAR, cette étape n'est pas triviale car elle nécessite des techniques de traitement sophistiquées comme la prise en compte des contraintes géométriques liées au mouvement relatif du capteur SAR par rapport à la Terre, la simulation de la composante géométrique de la rétrodiffusion des ondes électromagnétiques et le rééchantillonnage de données multivariées hétérogènes.

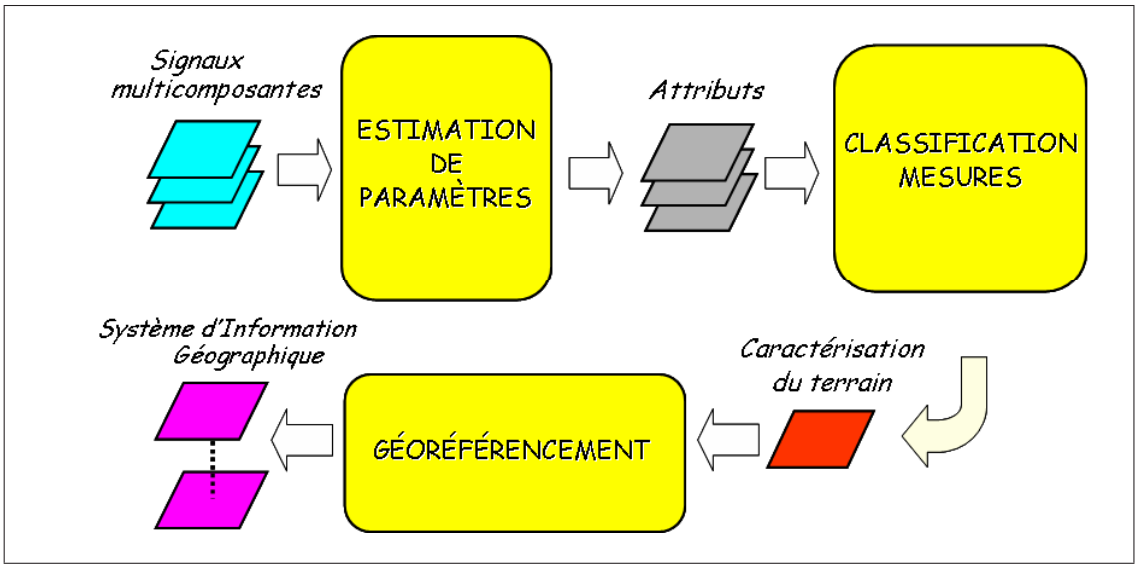


FIG. 1 – Chaîne d'analyse et traitement de l'information appliquée aux données SAR polarimétriques et interférométriques.

La deuxième partie de ce manuscrit est dédiée à l'application de l'imagerie radar à l'observation des glaciers tempérés. Elle illustre la mise en œuvre d'une chaîne de traitement allant des données SAR à des mesures géophysiques ainsi que la nécessité de prendre en compte la physique du milieu et des phénomènes étudiés. Alors que de nombreux domaines thématiques utilisent aujourd'hui la télédétection radar, la glaciologie est un domaine où les données POL(-In)SAR

sont actuellement très peu utilisées, alors qu'elles peuvent devenir une source d'informations privilégiée. En effet, les difficultés d'accès et la dangerosité de la plupart des glaciers ne permettent généralement pas d'effectuer des mesures de terrain de façon régulière au cours de l'année ou avec une couverture spatiale importante. L'imagerie optique étant quant à elle limitée par les nuages et la neige une grande partie de l'année, la plupart des mesures disponibles caractérisent l'évolution soit pendant l'été [Bert-05], soit d'une année sur l'autre [Vinc-04]. Grâce à son caractère "tous temps" et à la pénétration des ondes électromagnétiques dans la neige seiche, l'imagerie radar présente un fort potentiel pour l'observation des glaciers. Les problèmes posés par cette application et les réponses qui peuvent être apportées par l'imagerie SAR multivariée sont étudiés au travers du traitement de données des satellites ERS et des données aéroportées E-SAR acquises récemment sur le site test "Chamonix Mont-Blanc". Nous nous intéressons en particulier à la mesure des champs de déplacement par interférométrie et à la possibilité de caractériser les couches superficielles des glaciers à l'aide de données polarimétriques dans différentes bandes de fréquences.

Chacune des deux parties de ce manuscrit comprend quatre chapitres. Le chapitre 1 décrit les principales étapes du traitement de l'information employées dans l'imagerie SAR. Le formalisme utilisé est celui de la représentation polarimétrique du champ électromagnétique rétrodiffusé. Après avoir présenté les bases de la polarimétrie et la formation des images radar à synthèse d'ouverture, ce chapitre présente un ensemble d'attributs POLSAR destinés à extraire de l'information liée aux interactions entre l'onde radar et la cible. Ces attributs sont ensuite combinés en utilisant des méthodes de clustering statistique ainsi que des méthodes supervisées et non-supervisées issues de l'interprétation thématique. Les méthodes sur lesquelles nous nous sommes appuyés sont relativement classiques : les matrices de cohérence polarimétriques, la décomposition de Cloude et Pottier et la classification basée sur la distance de Wishart. Nous avons proposé également une nouvelle approche pour la fusion des attributs polarimétriques qui s'appuie sur les systèmes de fusion à base de règles floues.

Le chapitre 2 présente les bases de l'interférométrie SAR en deux sections distinctes. La première section est dédiée au traitement des images multivariées (D-)InSAR dans le cas monopolarisation. La chaîne (D-)InSAR correspond à des traitement conventionnels qui ont été déjà validés par la communauté thématique : recalage, calcul de la cohérence et de la phase interférométriques, compensation des franges orbitales et topographiques, développement de phase et orthorectification. La deuxième section présente l'état de l'art des principales étapes de traitement POL-InSAR des images.

Le chapitre 3 aborde la problématique de réduction de speckle dans les images SAR multicomposantes. Il propose un formalisme unifié pour le filtrage de données POLSAR / InSAR / POL-InSAR. Dans le contexte général de la théorie de l'estimation, l'approche proposée s'appuie sur des voisinages adaptatifs couplés avec des estimateurs adaptatifs pour réaliser un meilleur compromis entre la préservation de la résolution spatiale et la nécessaire réduction du biais et de la variance d'estimation. Les méthodes que nous avons développées sont présentées dans la suite du chapitre, ainsi qu'une évaluation subjective et objective de leurs performances sur trois jeux de données aéroportées. Les conclusions de cette première partie méthodologique sont données

dans le chapitre 4.

La deuxième partie de cette thèse est dédiée à l'application de la télédétection radar à l'observation des glaciers tempérés du massif du Mont-Blanc. Le chapitre 5 introduit le site test "Chamonix Mont-Blanc", ainsi que les données SAR et les mesures "in situ" utilisées.

Le chapitre 6 est consacré à la mesure du déplacement des glaciers alpins par interférométrie différentielle et aux problèmes méthodologiques posés par le relief de haute montagne. L'utilisation d'images TANDEM ERS des glaciers alpins permet l'analyse du potentiel de l'interférométrie SAR en bande C pour déterminer des champs de vitesses.

Le chapitre 7 présente les premiers résultats issus de la chaîne de traitement POLSAR/POL–InSAR appliquée aux glaciers alpins dans le massif de Mont-Blanc. Les données POL(-In)SAR multibandes et multipolarisations employées dans cette étude sont issues de la première campagne du système aéroporté E-SAR sur le site test proposé. Les conclusions de la partie expérimentale sont présentées dans le chapitre 8.

Le manuscrit se termine par les conclusions générales et les perspectives de ce travail.

Première partie

Contexte Méthodologique

Chapitre 1

Imagerie Radar à Synthèse d'Ouverture

Sommaire

1.1 Introduction 8
1.2 Principes du radar à synthèse d'ouverture (SAR) 8
1.2.1 Propagation de champs électromagnétiques 8
1.2.2 Polarisation 11
1.2.3 Radar imageur 12
1.3 Formation des données SAR 14
1.3.1 Caractéristiques du signal SAR 14
1.3.2 Résolution en distance et filtrage adapté 15
1.3.3 Synthèse en azimut 18
1.3.4 Exemple des données ERS 20
1.4 Représentation incohérente d'une cible radar 21
1.5 Statistiques des données SAR multivariées 23
1.6 Théorèmes de décomposition polarimétrique incohérente 24
1.6.1 La décomposition polarimétrique $H/\alpha/A$ 24
1.7 Classification POLSAR 27
1.7.1 Partition nette de l'espace $H/\alpha/A$ 27
1.7.2 Classification C-moyennes avec la distance de Wishart 27
1.7.3 Segmentation par fusion interactive floue de l'espace $H/\alpha/A$ 28
1.8 Conclusions 30

1.1 Introduction

L'intérêt porté aux données radar, aussi bien du point de vue traitement du signal que du point de vue géophysique, vient de la richesse de l'information acquise par les capteurs SAR (Radar à Synthèse d'Ouverture). Grâce à la répétitivité des orbites et aux caractéristiques "tous temps" du capteur AMI (Active Microwave Instrument), les satellites tels que ERS 1/2 (European Remote Sensing) ont acquis progressivement des séries d'images d'une même zone vue sous le même angle de visée. Les données ainsi obtenues présentent un grand intérêt du point de vue géophysique (météorologie, climatologie, océanographie, inventaire et surveillance des ressources naturelles) car elles apportent des informations régulières sur l'évolution d'un site. De plus, l'avènement des satellites haute résolution (HR) optiques et radar tels que TerraSAR-X (German Space Agency - DLR), RADARSAT-2 (Agence Spatiale Canadienne - CSA), Pléiades et Cosmo-SkyMed du programme ORFEO (Optical and Radar Federated Earth Observation) va accroître considérablement les possibilités de surveillance par imagerie spatiale.

Lancé en 2006, le satellite ALOS (Advanced Land Observing Satellite - Japan Aerospace Exploration Agency) a été conçu pour faciliter les activités de cartographie des sols, observer avec précision la couverture terrestre, surveiller les catastrophes et évaluer les ressources naturelles. Son instrument radar à synthèse d'ouverture à antenne réseau à commande de phase fonctionnant dans la bande L (PALSAR), est le premier capteur embarqué sur une plateforme satellitaire civile qui permet la mesure du champ électromagnétique rétrodiffusé par la surface terrestre comme un champ vectoriel (le cas le plus général) en préservant toute l'information polarimétrique sur le processus de rétrodiffusion.

Le but de ce chapitre est de présenter les étapes de traitement utilisées en imagerie SAR de télédétection. Le choix qui a été fait est de rester le plus longtemps possible avec une représentation vectorielle polarimétrique du champ électromagnétique qui donne le contexte général. Le cas scalaire monopolarisation (les satellites SAR civils avant ALOS) devient ainsi un cas particulier d'imagerie SAR polarimétrique incomplète.

1.2 Principes du radar à synthèse d'ouverture (SAR)

Les images radar étant le résultat de la diffusion d'une onde électromagnétique, la phase et l'amplitude portent de l'information hétérogène liée à l'occupation du sol, l'interaction avec le milieu diffusant (mécanismes de diffusion). Ceci permet notamment de remonter à des mesures physiques telles que la hauteur de la végétation, la topographie, le déplacement...

1.2.1 Propagation de champs électromagnétiques

Le concept de propagation du champ électromagnétique est issu de l'interprétation des équations de propagation auxquelles conduisent les équations de Maxwell (équations différentielles du premier ordre reliant les champs électriques et magnétiques entre eux et les

champs aux charges). En absence de charge, le champ électrique $\overrightarrow{E}(\overrightarrow{r},t)$ se propageant dans un milieu homogène, linéaire et isotrope vérifie l'équation de propagation suivante :

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\vec{E}(\vec{r},t) = 0, \tag{1.1}$$

avec c étant la célérité de l'onde dans le vide, $\vec{r}$ le vecteur de position défini par rapport à un système de coordonnées spécifique et t le temps [Maxw-65].

Pour les applications radar en télédétection, la modélisation avec des champs d'onde harmonique–temps [Kost-86] est utilisée : les champs instantanés de vecteurs présentent une variation sinusoïdale dans le temps, avec une fréquence angulaire ω.

$$\vec{E}(\vec{r},t) = \Re\{\vec{E}(\vec{r})e^{j\omega t}\}, \tag{1.2}$$

où $\Re\{...\}$ est la partie réelle d'un nombre complexe.

Dans le cas d'une onde plane monochromatique, dans un repère cartésien orthonormé $(O,\widehat{x},\widehat{y},\widehat{z})$ avec $\widehat{z}$ dans la direction donnée par le vecteur d'onde $\widehat{k}$, les champs électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{H}$ sont situés dans un plan orthogonal à la direction de propagation. Les variations des champs électriques et magnétiques étant liées par les équations de Maxwell, on peut donc représenter l'onde par un seul de ces champs, en général le champ électrique [Pott-92] :

$$\vec{E}(z) = \vec{E}_0 e^{-jkz} \quad avec \quad E_{0z} = 0, \tag{1.3}$$

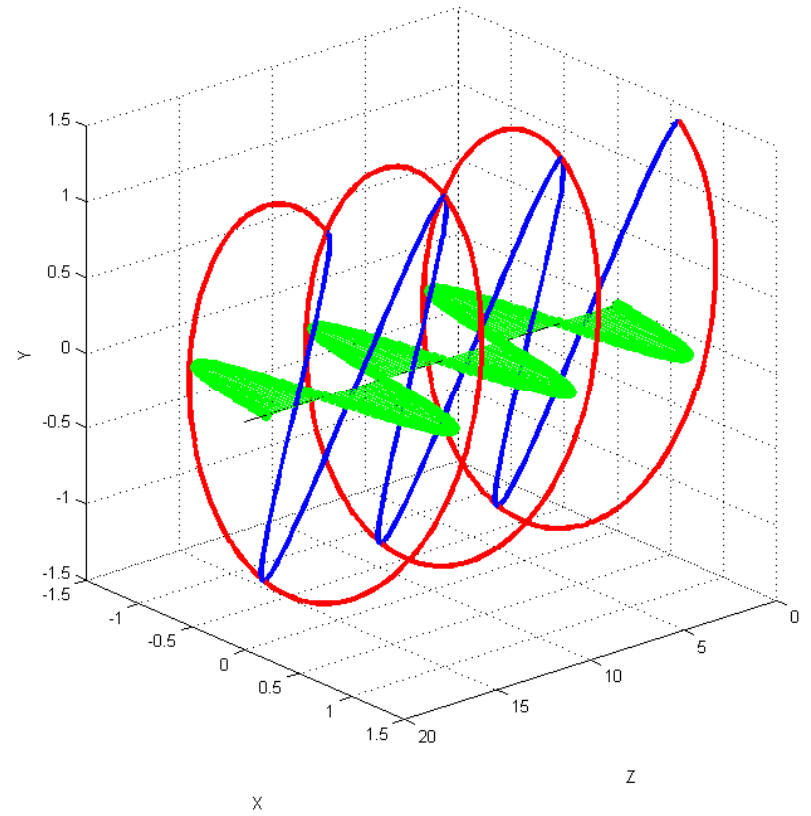
où $\vec{E}_0 = E_a e^{j\delta}$ est l'amplitude complexe de l'onde plane monochromatique. On peut alors écrire l'équation du champ électrique pour une onde plane monochromatique :

$$\vec{E}(z,t) = \Re\{E_a e^{j\delta} e^{-jkz} e^{j\omega t}\} = \begin{bmatrix} E_{Ox}\cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ E_{Oy}\cos(\omega t - kz + \delta_y) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{1.4}$$

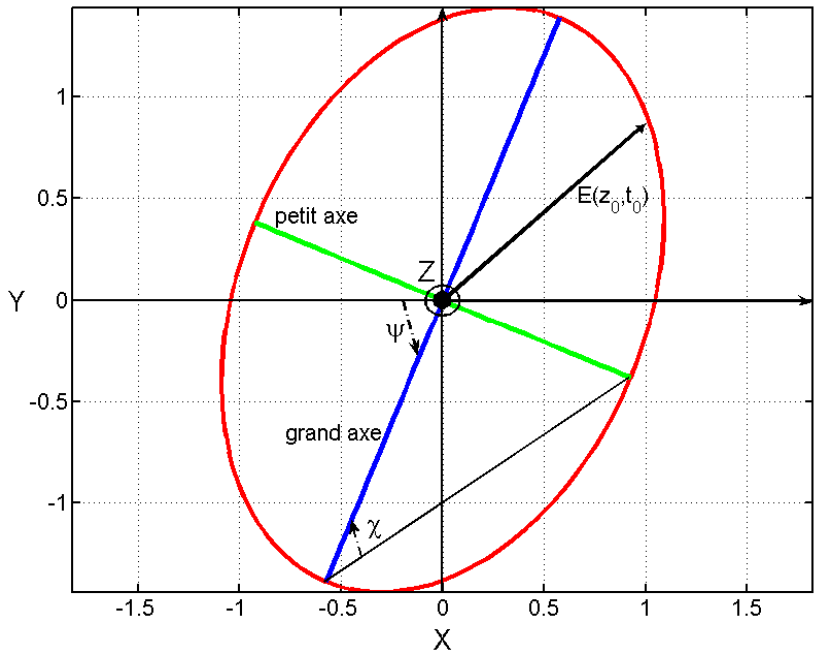
où δ_x et δ_y représentent les phases absolues des composantes pour $z = 0$ et $t = 0$. A un instant t donné, le vecteur champ électrique se propageant selon l'axe z décrit une trajectoire hélicoïdale (cf. Fig. 1.1-(a)).

La fréquence d'oscillation étant constante (onde monochromatique), il est possible d'utiliser la notion de phaseur pour le régime permanent (cf. Eq. 1.2) et ainsi enlever la composante indépendante du temps dans l'expression du champ électrique. La phase de $\vec{E}(z)$ est identique le long de l'axe de propagation $\widehat{z}$, donc en considérant $z = 0$, on conserve toutes les informations sur les amplitudes et les phases des composantes du champ électrique. En conséquence, le vecteur de Jones d'une onde transverse électromagnétique monochromatique $\underline{\vec{E}}$ est défini sous une forme complexe indépendante du temps et de la position le long de l'axe de propagation [Jone-41], [Jone-47], [Pott-92] :

$$\underline{\vec{E}} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{Ox}e^{j\delta_x} \\ E_{Oy}e^{j\delta_y} \end{bmatrix}. \tag{1.5}$$



(a)



(b)

FIG. 1.1 – Onde plane monochromatique : (a) trajectoire hélicoïdale du vecteur champ électrique $E(z,t)$ se propageant le long de l'axe $Z \equiv \widehat{z} \equiv \widehat{k}$; (b) ellipse de polarisation à l'abscisse $z = z_0$.

1.2.2 Polarisation

La polarisation d'une onde plane monochromatique décrit la direction d'oscillation du vecteur champ électrique dans le plan orthogonal au vecteur d'onde. Les composantes du champ électrique dans ce plan vérifient l'équation d'une ellipse [Born-59], [Ulab-90] :

$$\left(\frac{E_x}{E_{Ox}}\right)^2 - 2\frac{E_x E_y}{E_{Ox}E_{Oy}}\cos(\delta_y - \delta_x) + \left(\frac{E_y}{E_{Oy}}\right)^2 = \sin(\delta_y - \delta_x)^2. \tag{1.6}$$

Pour une onde non polarisée, ou naturelle, $\vec{E}(z,t)$ tourne autour de son axe de façon aléatoire et imprévisible au cours du temps. Polariser une onde correspond à donner une trajectoire définie au champ électrique :

- **polarisation elliptique**, cas général quand $\vec{E}(z,t)$ tourne autour de son axe et change d'amplitude pour former une ellipse ;
- **polarisation linéaire**, cas dégénéré quand $\vec{E}(z,t)$ reste toujours dans le même plan ;
- **polarisation circulaire**, cas dégénéré quand $\vec{E}(z,t)$ tourne autour de son axe en formant un cercle.

La figure 1.1-(b) présente l'ellipse de polarisation décrivant l'état de polarisation. L'angle d'orientation $\psi \in [-\pi/2, \pi/2]$ est l'angle entre l'horizontale et le grand axe de l'ellipse de polarisation. $\chi \in [-\pi/4, \pi/4]$ est l'angle d'ellipticité, dont la tangente est le rapport entre le petit axe de l'ellipse et son grand axe. Son signe donne le sens de la polarisation droite ou gauche (suivant la convention d'observation retenue). Pour une caractérisation complète de l'état de polarisation, on doit considèrer aussi l'angle d'inclinaison α qui donne l'information de déphasage pour $t = 0$ [Ulab-90].

Il est alors possible de caractériser les cas dégénérés de polarisation :

- polarisation linéaire avec $\chi = 0$ et

$$\begin{cases} \psi = 0 & - \quad \textit{polarisation horizontale} \\ \psi = \frac{\pi}{2} & - \quad \textit{polarisation verticale} \end{cases}$$

- polarisation circulaire avec $\psi = \pm\pi/4$ et

$$\begin{cases} \chi = \frac{\pi}{4} & - \quad \textit{polarisation droite} \\ \chi = -\frac{\pi}{4} & - \quad \textit{polarisation gauche} \end{cases}$$

Comme cela a été vu précédemment, le vecteur de Jones contient toute l'information sur l'état de polarisation d'une onde électromagnétique monochromatique transverse (moins celle sur la direction de l'onde) [Touz-04a]. La base la plus simple et la plus couramment utilisée pour exprimer le vecteur de Jones est la base orthogonale (H, V), appelée la base de polarisation, où V est l'état de polarisation verticale et H la polarisation horizontale. C'est cette base qui sera utilisée par la suite. La base de polarisation sert de référence à la définition des paramètres de l'ellipse de polarisation. Aussi, tout vecteur de Jones s'écrit comme une succession de trois transformations complexes :

$$\underline{\vec{E}} = A[U(\psi)][U(\chi)][U(\alpha)]u_x, \tag{1.7}$$

$$[U(\psi)] = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix}, \; [U(\chi)] = \begin{bmatrix} \cos(\chi) & j\sin(\chi) \\ j\sin(\chi) & \cos(\chi) \end{bmatrix},$$

$$[U(\alpha)] = \begin{bmatrix} e^{-j\alpha} & 0 \\ 0 & e^{j\alpha} \end{bmatrix},\ u_x = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

où $\{[U(\psi)], [U(\chi)], [U(\alpha)]\} \in SU(2)$ sont les trois matrices de transformation et u_x représente le vecteur de Jones normalisé d'une polarisation horizontale exprimé dans la base (H, V). Ainsi, tout état de polarisation est construit à partir d'une combinaison de polarisations linéaires.

1.2.3 Radar imageur

Une onde électromagnétique est émise $\vec{E}^{em}$ par une source et se réfléchit sur une cible. L'étude de l'onde réfléchie $\vec{E}^{re}$ permettra d'obtenir différentes informations sur les propriétés intrinsèques de la cible. Dans la plupart des cas, l'émetteur et le récepteur du radar partagent une antenne commune (radar monostatique). Le cas où l'émetteur et le récepteur sont séparés correspond à une configuration bistatique. La configuration monostatique s'est imposée comme référence grâce à sa simplicité d'utilisation. Elle est donc la plus couramment utilisée par les systèmes radars en télédétection.

Le radar imageur mesure la signature de l'onde électromagnétique pour chaque élément de résolution (pixel) afin d'obtenir une image radar de la région d'intérêt. Les avancées technologiques récentes, notamment en stockage de signaux numériques et en puissance de calcul, ont permis la réalisation de systèmes radar exploitant la diversité de polarisation. En choisissant un système de coordonnées cartésien, la position de l'antenne étant l'origine, le processus de diffusion s'écrit sous la forme d'une transformation linéaire décrite par la matrice complexe de diffusion $[S]$ [Sinc-48], [Sinc-50], [Kenn-51] :

$$\vec{E}^{re} = \begin{bmatrix} E_H^{re} \\ E_V^{re} \end{bmatrix} = \frac{e^{jk_0 r}}{r} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^{em} \\ E_V^{em} \end{bmatrix}. \tag{1.8}$$

où S_{HH}, S_{VV} sont les coefficients co-polarisés, S_{HV}, S_{VH} sont les éléments en polarisation croisée, r est la distance radar-cible et k_0 est le nombre d'onde. En général, l'information polarimétrique est représentée après la vectorisation de la matrice de rétrodiffusion permettant d'obtenir un vecteur cible $\vec{k}$. Les deux bases utilisées couramment sont la base lexicographique de Borgeaud B_L [Borg-89] et la base des matrices de Pauli modifiées B_P [Clou-86] :

$$B_L = \left\{ 2\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 2\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 2\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, 2\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\}, \tag{1.9}$$

$$B_P = \left\{ \sqrt{2}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \sqrt{2}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \sqrt{2}\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \sqrt{2}\begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix} \right\}, \tag{1.10}$$

où les facteurs 2 ou $\sqrt{2}$ apparaissent pour que la norme du vecteur cible, qui est égale à la puissance totale diffusée, soit indépendante de la base de vectorisation :

$$Span = |\vec{k}|^2 = \vec{k}_P^{*T}\vec{k}_P = \vec{k}_L^{*T}\vec{k}_L = (|S_{HH}|^2 + |S_{HV}|^2 + |S_{VH}|^2 + |S_{VV}|^2). \tag{1.11}$$

Pour une configuration monostatique dans un milieu homogène, la théorème de réciprocité [Ulab-90] assure l'égalité des composantes en polarisation croisée $S_{XX} = S_{HV} \equiv S_{VH}$. Dans le

cas monostatique, le nombre d'éléments du vecteur cible est réduit à trois :

$$\vec{k}_L = \begin{bmatrix} S_{HH} \\ S_{VV} \\ \sqrt{2}S_{XX} \end{bmatrix}, \quad \vec{k}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{XX} \end{bmatrix} \tag{1.12}$$

La vectorisation de la matrice de diffusion sur la base de Pauli rend possible une interprétation directe (cf. Tab. 1.1) de la cible à travers les mécanismes de diffusion déterministes décrits par les matrices de Pauli :

$$[S] = \begin{bmatrix} a+b & c-jd \\ c+jd & a-b \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} + c \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + d \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix}. \tag{1.13}$$

avec a, b, c, d proportionnels aux éléments du vecteur cible $\vec{k}_P$, dont la quatrième matrice n'intervient pas pour la rétrodiffusion (cas monostatique).

TAB. 1.1 – Interprétation des matrices de Pauli pour la base de polarisation (H, V).

Matrice Pauli	**Mécanisme rétrodiffusion**	**Interprétation**
$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	réflexion impaire	surface, sphère, corner reflectors (CR)
$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	réflexion paire	dièdre
$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	réflexion paire incliné à $\pi/4$	dièdre incliné à $\pi/4$
$\begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix}$	cross-polariser	n'existe pas en monostatique

A ce jour, les radars imageurs embarqués sur des plate-formes satellitaires civiles fonctionnent avec une seule polarisation à l'émission/réception en mode monostatique : polarisation VV dans le cas de ERS 1/2 ou HH pour RADARSAT-1. Pour une configuration polarimétrique préétablie, un seul coefficient de rétrodiffusion est mesuré pour chaque point de la fauchée. En conséquence, la mesure de l'onde rétrodiffusée (un champ vectoriel dans l'équation 1.8) se limite à un champ scalaire, toute information sur la cible située dans les propriétés polarimétriques étant perdue.

1.3 Formation des données SAR

Le premier système SAR polarimétrique aéroporté a été conçu au NASA Jet Propulsion Laboratory en 1985. Le CV990 SAR a fonctionné avec une longueur d'onde de 24.5 cm (bande L) et une résolution moyenne au sol de 10 m (en 4-vues) [Zebk-87]. La mesure des quatre éléments de la matrice de $[S]$ (cf. Eq. 1.8) se basait sur l'émission d'un premier chirp (rampe de fréquence linéaire) en mode H et la réception en H et V simultanée. Le second chirp était en configuration V à l'émission et toujours H et V à la réception. Ensuite, l'ouverture synthétique était générée par intégration cohérente de plusieurs chirps, chaque polarisation étant traitée indépendamment des autres. Pour atteindre une image SLC (Single Look Complex) avec une résolution de 3m, 1500 chirps étaient intégrés sur une durée de 2s. Ainsi, la décorrélation induite par le décalage entre les deux chirps après une intégration de 1500 chirps devient négligeable [Zebk-87].

La suite de cette section résume les principes du Radar à Synthèse d'Ouverture utilisé pour améliorer la résolution spatiale de l'image acquise par un radar imageur. Comme chaque polarisation est traitée d'une manière indépendante, le formalisme est décrit pour une seule polarisation. Le cas des satellites ERS 1/2 est utilisé pour illustrer ces principes.

1.3.1 Caractéristiques du signal SAR

Le principe du radar monostatique est basé sur la rétrodiffusion des ondes électromagnétiques (Sect. 1.2.3). Avec le radar imageur, le passage de 1D à 2D étant complexe, certains principes physiques doivent être énoncés :

1. La *résolution en distance* est une résolution temporelle : le radar positionne dans la même case distance toutes les cibles pour lesquelles le signal rétrodiffusé arrive sur l'antenne dans un intervalle du temps représentant la résolution temporelle du système récepteur (cf. Fig. 1.2). Améliorer la résolution revient à diminuer la période d'échantillonnage du signal reçu.
2. La *résolution en azimut* est liée aux principes de l'émission, propagation et réception d'ondes électromagnétiques cohérentes (lois d'antenne déterminées par les dimensions de l'antenne et la longueur d'onde) qui conduiront à définir la technique de l'antenne synthétique.

En général, un système radar imageur de télédétection est utilisé pour donner une image d'une portion du globe terrestre que l'on souhaite observer. L'angle défini par la direction de propagation de l'onde et la normale au sol au centre du lobe d'antenne (appelé angle d'incidence) conduit à des déformations géométriques. Ces effets sont illustrés dans la figure 1.3 :

– *Effet de repliement (basculement)* : la pente locale du relief devient plus grande que l'angle d'incidence et le relief est imagé en sens inverse (le point f est situé entre les points d et e dans l'image radar).
– *Effet de compression ou dilatation* : selon que la pente locale est orientée vers le radar ou non, les pixels $\overline{cd}$ ou $\overline{gh}$ de l'image radar ont une dimension réduite ou dilatée par rapport

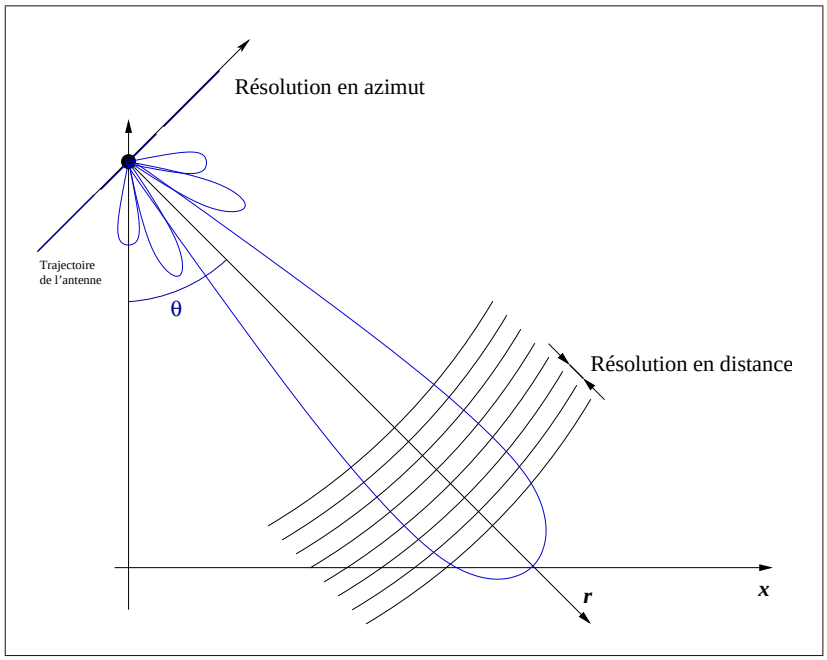


FIG. 1.2 – Échantillonnage d'une image SAR : résolution en distance et résolution en azimut.

à leurs projections au sol $\overline{CD}$ ou $\overline{GH}$.

– *Effet d'ombre* : la partie du sol $\overline{HI}$ n'est pas illuminée par le radar à cause des fortes variations locales d'altitude. Elle donne des pixels de très faible intensité (bruit seul) dans l'image radar $\overline{hi}$.

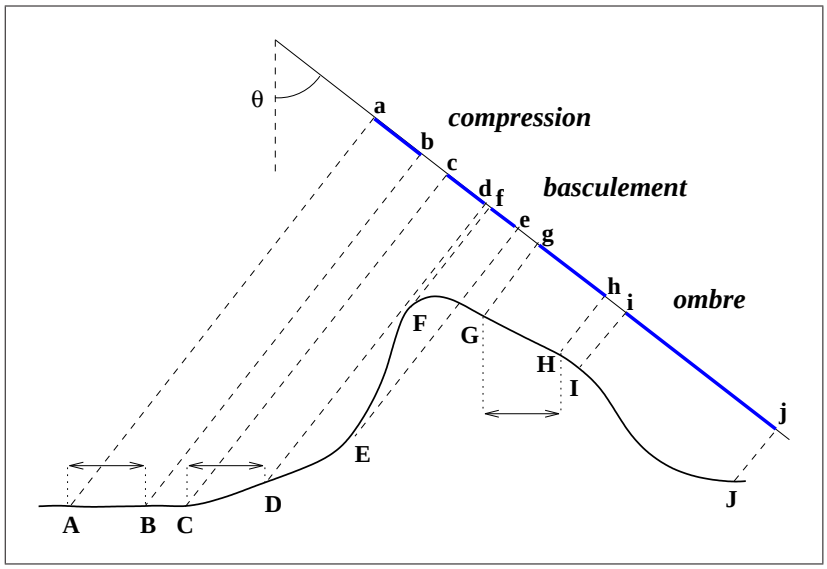


FIG. 1.3 – Déformations géométriques induites par le radar imageur à visée latérale.

1.3.2 Résolution en distance et filtrage adapté

Un signal est émis à l'instant $t_0 = 0$ sur une durée Δt. Le signal rétrodiffusé par une cible ponctuelle (située à une distance R_1 de la source) est reçu par l'antenne à l'instant t_1 :

$$t_1 = \frac{2R_1}{c}. \tag{1.14}$$

S'il existe une seconde cible située à la distance R_2, l'antenne reçoit ce nouveau signal à l'instant t_2 :

$$t_2 = \frac{2R_2}{c}. \tag{1.15}$$

Une condition nécessaire pour pouvoir séparer ces deux événements, en utilisant le signal temporel capté par l'antenne est :

$$|t_2 - t_1| \geq \Delta t \tag{1.16}$$

Donc, pour pouvoir séparer des cibles rapprochées, il est impératif d'émettre des signaux dont la durée soit la plus brève possible [Nico-04]. Si la résolution en distance recherchée est δr, il faut pouvoir mesurer des intervalles de temps δt, avec :

$$\delta t \leq \frac{2\delta r}{c}. \tag{1.17}$$

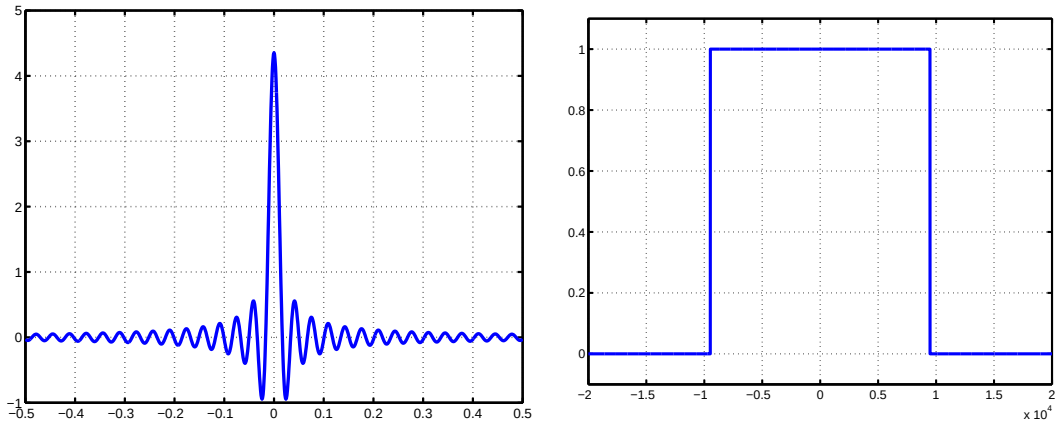
Cet objectif est à la base du principe du radar à impulsions [Nico-04], [Mait-01].

En pratique, soit un signal $s(t)$ d'énergie unitaire dont le spectre $S(f)$ est idéalement occupé en totalité sur une bande B centrée autour de la fréquence nulle. En supposant que la phase de ce spectre est nulle, le signal s'écrit comme :

$$s(t) = F^{-1}\{S(f)\} = \frac{1}{\sqrt{B}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} e^{2j\pi ft} df = \sqrt{B}\ sinc(\pi Bt), \tag{1.18}$$

où $F^{-1}\{...\}$ est la transformée de Fourier inverse, *sinc* est le sinus cardinal et dont le choix de la normalisation a été effectué ici pour avoir une énergie unitaire :

$$\int_{-B}^{B} |S(f)|^2 df = \int_{-\infty}^{\infty} [s(t)]^2 dt = 1. \tag{1.19}$$



(a) (b)

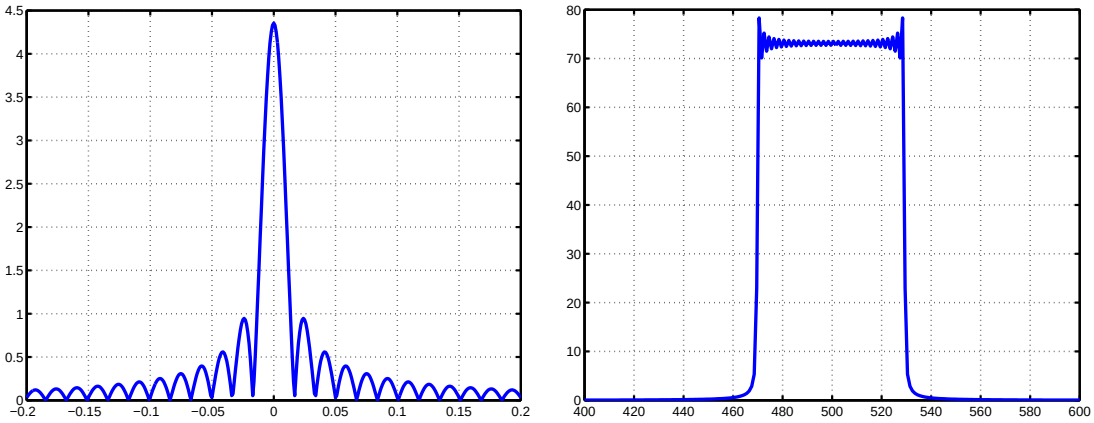
FIG. 1.4 – Le module du signal idéal à l'émission décrit par l'équation1.18 : (a) domaine temporel, (b) domaine spectral.

Sous la forme proposée, le signal donné par l'équation 1.18 (cf. Fig. 1.4) correspond à une impossibilité tant physique que technologique puisqu'il est centré autour de la fréquence nulle et c'est un signal de durée infinie. Pour s'affranchir de ce dernier point, il suffit d'utiliser une

modulation par une porteuse (cf. Fig. 1.5) en effectuant une translation de spectre autour d'une fréquence de référence f_0 :

$$\hat{S}'(f) = \delta(f - f_0) \star S(f) \Leftrightarrow s'(t) = e^{2j\pi f_0 t} s(t) \tag{1.20}$$

où $\delta(f)$ est la distribution de Dirac et $\star$ représente le produit de convolution.



(a) (b)

FIG. 1.5 – Le module du signal idéal à l'émission modulé par une porteuse décrit par l'équation 1.20 : (a) domaine temporel, (b) domaine spectral.

Si la bande B du signal est petite par rapport à la fréquence de la porteuse f_0 (cas ERS 1/2 $f_0 = 5.3\ GHz$ et $B = 18.96\ MHz$) le signal peut être considéré comme une onde quasi-monochromatique [Nico-04]. Dans le domaine du radar de télédétection, le signal émis est un *signal modulé linéairement en fréquence* (chirp), avec une fréquence instantanée variant linéairement avec le temps :

$$f(t) = f_0 + Kt. \tag{1.21}$$

où K est la constante de linéarité (cas ERS 1/2 $K = 0.41889 \cdot 10^{12}$). Ainsi, le signal émis (cf. Fig. 1.6) est défini pour $t \in [-T/2, T/2]$ comme :

$$s_e(t) = A_0 e^{2j\pi\left(f_0 t + \frac{K}{2}t^2\right)} \Pi\left(\frac{t}{T}\right), \quad S_e(f) = e^{-\frac{j\pi(f-f_0)^2}{K}} \sqrt{\frac{j}{K}} \Pi\left(\frac{f - f_0}{KT}\right). \tag{1.22}$$

A_0 étant l'amplitude du signal et

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } -1/2 \leq t \leq 1/2 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}.$$

A la réception, le signal est demodulé, puis convolué en appliquant le principe du *filtrage adapté* : convolution par la conjugué du signal émis retourné dans le temps

$$s_r(t) = s(t) \star s^*(-t), \quad S_r(f) = S(f)S^*(f) = |S(f)|^2 = \frac{1}{K}. \tag{1.23}$$

On a donc une transformé de Fourier constante dans une certaine bande de fréquence centrée à l'origine, et dont la phase est nulle (exactement le cas d'un signal idéal donné par l'équation 1.18).

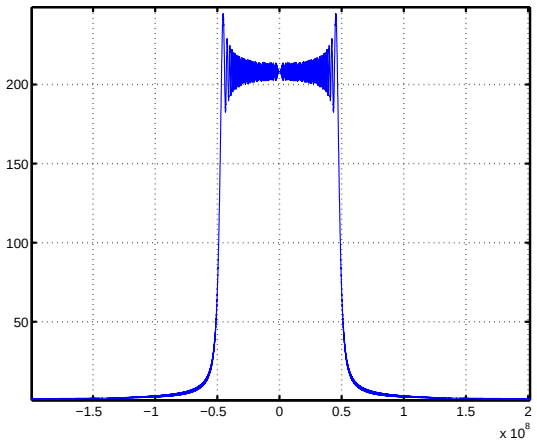


FIG. 1.6 – Le spectre du signal émis par les satellites ERS 1/2 (cf. *Eq. 1.22*).

Finalement, le signal synthétisé en distance est obtenu par la transformée de Fourier inverse de l'équation 1.23 [Nico-04], [Mait-01].

Par conséquent, sous l'hypothèse de linéarité, en appliquant le filtre adapté au signal reçu, pour une cible de réponse impulsonnelle $h(t)$ illuminée par un chirp $s_e(t)$ on obtient :

$$s_r(t) = s_e^*(-t) \star (h(t) \star s_e(t)) = (s_e^*(-t) \star s_e(t)) \star h(t),$$

$$s_r(t) = sinc(\pi K T t) \star h(t). \tag{1.24}$$

1.3.3 Synthèse en azimut

Dans le cadre de la télédétection satellitaire, où la distance antenne-cible R est grande par rapport aux dimensions de l'antenne L et l (supposée rectangulaire), l'hypothèse de *champ lointain* est respectée [Good-72] :

$$R = 10^6 m \gg \frac{L^2 + l^2}{2\lambda} = 883m. \tag{1.25}$$

Le calcul a été effectué avec les valeurs correspondants aux satellites ERS 1/2.

Soit un point P situé sur une perpendiculaire à la trajectoire du satellite. La contribution de l'antenne (supposée non-apodisée) sur le champ produit dans le point P s'écrit [Good-72] :

$$U(P) = A \int\int_{\Sigma} \frac{1}{4\pi r} e^{jkr} ds \approx \frac{A}{4\pi R} e^{jk\frac{y^2+z^2}{R}} \int\int_{\Sigma} e^{-jk(yY+zZ)} ds. \tag{1.26}$$

L'équation 1.26 représente la transformée de Fourier d'une antenne avec un champ électromagnétique uniformément distribué sur toute sa surface Σ. Dans le cas d'une antenne rectangulaire (ERS 1/2), la transformée de Fourier peut être exprimée sous une forme séparable, ce qui donne alors la PSF (Point Spread Function) :

$$U(y,z) = U_y(y)U_z(z) \approx e^{jk\frac{y^2}{R}} sinc\left(\pi \frac{Ly}{\lambda R}\right) e^{jk\frac{z^2}{R}} sinc\left(\pi \frac{Lz}{\lambda R}\right). \tag{1.27}$$

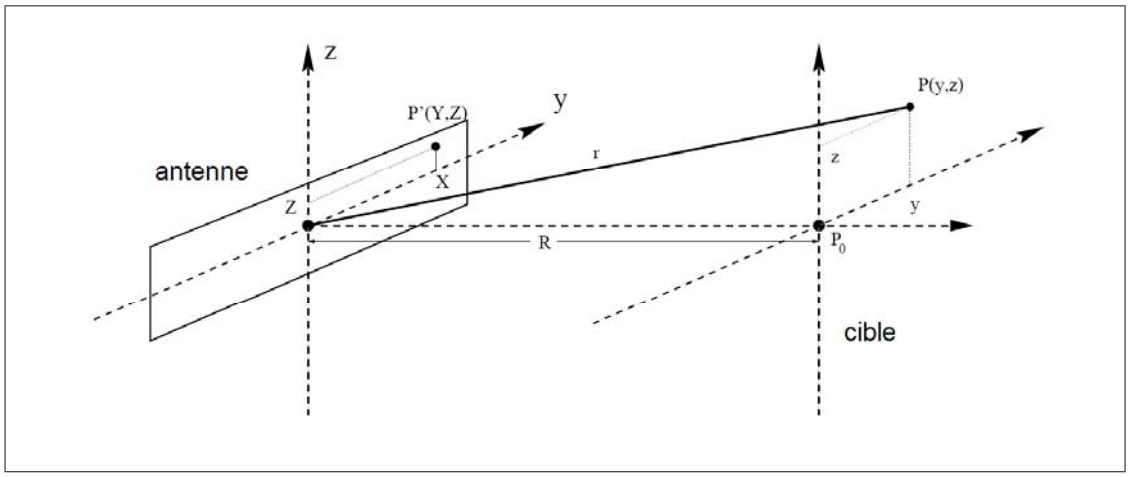


FIG. 1.7 – Analyse du champ créé par une antenne sur le plan perpendiculaire au vecteur d'onde.

Connaissant les propriétés du sinus cardinal et les paramètres de l'antenne ERS ($l = 1$m, $L = 10$m), les résolutions δy et δz sont calculées en utilisant l'équation 1.27 avec $R = 1000$km [Nico-04]. Dans les deux cas, on peut exprimer la résolution δ sous une forme générale :

$$\delta = \alpha \frac{\lambda R}{D}, \tag{1.28}$$

avec D la dimension de l'antenne (en particulier soit L en azimut, soit l en distance) et α un facteur spécifique à la résolution choisie. On constate que la résolution en azimut ainsi obtenue est kilométrique et du même ordre de grandeur que la résolution en distance avant le filtrage adapté, ce qui n'est pas suffisant pour les applications en télédétection [Nico-04].

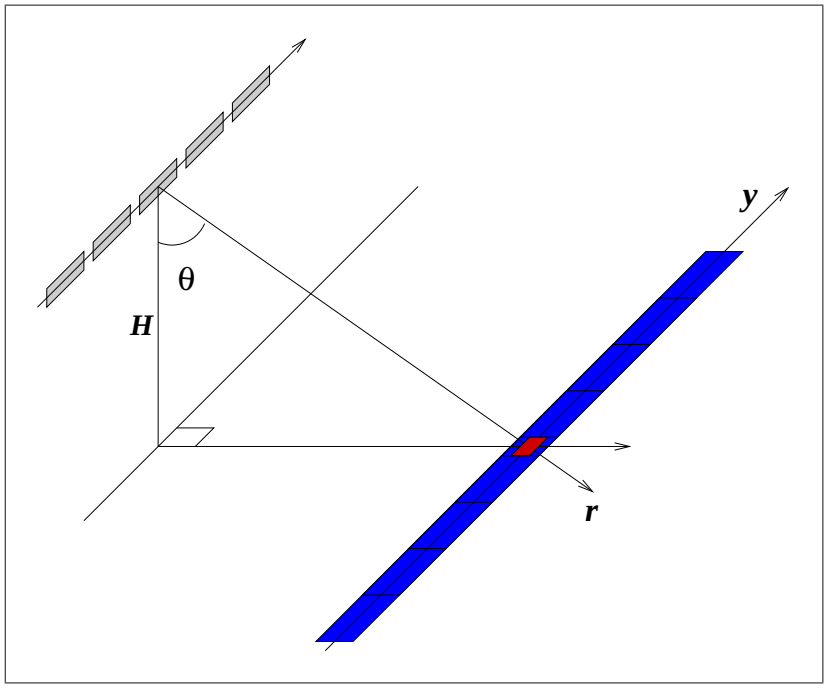


FIG. 1.8 – En juxtaposant plusieurs acquisitions, le principe de la synthèse d'ouverture offre une résolution égale à la dimension de l'antenne réelle.

Le principe de la synthèse d'ouverture offre une résolution en azimut de la dimension de l'antenne réelle, en exploitant le fait que l'antenne se déplace sur une orbite, que l'on peut

assimiler en première approximation à une trajectoire rectiligne, selon un mouvement uniforme (cf. Fig. 1.8). En utilisant l'équation 1.28, les positions de l'antenne, de dimension L, pour lesquelles la cible est effectivement vue sont :

$$y \in \left[-\frac{\widehat{Y}}{2};\ \frac{\widehat{Y}}{2} \right], \tag{1.29}$$

où $\widehat{Y} = \alpha\lambda R/L$. Pour le cas monochromatique, l'équation 1.27 donne le terme de déphasage pour toute position y :

$$e^{2j\pi\phi} = e^{2j\pi\frac{\widehat{K}}{2}y^2}, \tag{1.30}$$

avec $\widehat{K} = \frac{2}{R\lambda}$.

La fréquence spatiale instantanée f_i :

$$f_i = \frac{1}{2j\pi}\frac{\partial\phi}{\partial y} = \widehat{K}y \tag{1.31}$$

correspond à une rampe de fréquence centrée sur la fréquence nulle et dont la bande passante est donnée par [Nico-04] :

$$\widehat{B} = \widehat{K}\widehat{Y} = \alpha\frac{2}{L}. \tag{1.32}$$

Cette représentation est identique à celle rencontrée dans l'étude du filtrage adapté (cf. Eq. 1.21) : un signal modulé linéairement en fréquence spatiale (de paramètre $\widehat{K}$) et une bande de fréquence spatiale $\widehat{B} = 2\alpha/L$. Ainsi, on peut appliquer le filtrage adapté suivant l'axe azimut de même que dans le cas de la résolution en distance présenté dans la section 1.3.2.

1.3.4 Exemple des données ERS

Parmi les logiciels de synthèse SAR les plus utilisés dans le contexte académique, la grande majorité utilisent le principe du filtrage adapté dans le domaine spectral afin de minimiser le temps de calcul, une des grandes difficultés à l'époque de leur développement : Repeated Orbit Interferometry Package (ROI–PAC) [Rose-00], [Rose-04] développé au NASA Jet Propulsion Laboratory ; Differential Interferometric Automated Process Applied to Survey Of Nature (DIAPASON) [Mass-94] développé par le Centre National d'Études Spatiales. Dans les deux cas, la synthèse est effectuée en utilisant une altitude moyenne, hypothèse valable pour les satellites ERS 1/2 avec des faibles variations d'altitude dans la zone cible. Mais, si on se place dans une zone avec des fortes variations de relief, en utilisant des satellites avec une ouverture synthétique plus grande et une orbite plus basse, cette hypothèse risque de ne plus être valable. Par exemple dans la région Chamonix - Mont Blanc, la différence d'altitude entre la vallée de Chamonix et le sommet du Mont Blanc est de 4000 m, ce qui corresponds à une compression comparable avec le FOV (profondeur de champ) kilométrique de ERS 1/2 [Nico-07]. Avec la haute résolution (métrique) des futurs satellites SAR, l'utilisation d'un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) dans la synthèse SAR devient nécessaire.

Une nouvelle approche proposée par Nicolas et al. [Nico-07], appelée SYTER (SYnthèse TEmporelle Radar) correspond à une formation de voies dans le domaine temporel (cf. Eq. 1.27) rendue possible par la modélisation du déplacement relatif du satellite et de la Terre. Elle construit

des images pseudo SLC sur une grille régulière à la surface du géoïde. Par la suite, l'utilisation d'un MNE à la place du géoïde devrait permettre de prendre en compte les variations de distance dues à la topographie et d'éliminer les franges topographiques. La figure 1.9 présente les résultats de la synthèse SAR obtenus en utilisant SYTER avec des données ERS 1 acquises dans le massif de Mont Blanc [Nico-07].

1.4 Représentation incohérente d'une cible radar

Après avoir présenté les principes de la formation des images SAR, nous décrivons dans cette section les représentations dites "incohérentes" de la réponse des cellules de résolution. Ces représentations sont destinées à caractériser les cibles "non-cohérentes" aussi appelées cibles "distribuées" car leur réponse est la somme de réponses élémentaires réparties dans la cellule (surface ou volume) de rétrodiffusion, sans prédominance d'un réflecteur fort. Ces cibles correspondent à la grande majorité des surfaces naturelles imagées telles que les zones agricoles, les sols nus, les forêts, la glace... Le phénomène de speckle (détaillé au Chap. 3) qui affecte ces cibles ne permet pas de caractériser leur rétrodiffusion directement au niveau de la matrice de rétrodiffusion $[S]$ (cf. Eq. 1.8). La caractérisation s'effectue sous l'hypothèse de stationnarité au niveau des statistiques du deuxième ordre [Clou-96] :

$$[C] = E\{\vec{k}_L \vec{k}_L^{\dagger}\} = \begin{bmatrix} E\{S_{HH}S_{HH}^*\} & E\{S_{HH}S_{VV}^*\} & \sqrt{2}E\{S_{HH}S_{XX}^*\} \\ E\{S_{VV}S_{HH}^*\} & E\{S_{VV}S_{VV}^*\} & \sqrt{2}E\{S_{VV}S_{XX}^*\} \\ \sqrt{2}E\{S_{XX}S_{HH}^*\} & \sqrt{2}E\{S_{XX}S_{VV}^*\} & 2E\{S_{XX}S_{XX}^*\} \end{bmatrix}, \tag{1.33}$$

$$[T] = E\{\vec{k}_P \vec{k}_P^{\dagger}\} = \tag{1.34}$$

$$\begin{bmatrix} E\{(S_{HH}+S_{VV})(S_{HH}+S_{VV})^*\} & E\{(S_{HH}+S_{VV})(S_{HH}-S_{VV})^*\} & 2E\{(S_{HH}+S_{VV})S_{XX}^*\} \\ E\{(S_{HH}-S_{VV})(S_{HH}+S_{VV})^*\} & E\{(S_{HH}-S_{VV})(S_{HH}-S_{VV})^*\} & 2E\{(S_{HH}-S_{VV})S_{XX}^*\} \\ 2E\{S_{XX}(S_{HH}+S_{VV})^*\} & 2E\{S_{XX}(S_{HH}-S_{VV})^*\} & 4E\{S_{XX}S_{XX}^*\} \end{bmatrix},$$

où $[C]$ est la matrice polarimétrique de covariance, $[T]$ la matrice polarimétrique de cohérence (matrices hermitiennes positives semi-définies 3×3 en monostatique) et $E\{...\}$ représente l'espérance mathématique. Sans l'espérance mathématique le rang des deux matrices devient 1 et elles caractérisent un processus de rétrodiffusion complètement déterministe [Papa-99]. Ces deux matrices sont équivalentes et sont liées par la relation suivante :

$$[T] = [N][C][N]^T, \quad [N] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix}. \tag{1.35}$$

Dans le cas monopolarisé, les deux matrices $[C]$ et $[T]$ dans les équations 1.33 et 1.34 deviennent des scalaires, toute l'information sur les changements de l'état de polarisation emission/recepton étant perdue.

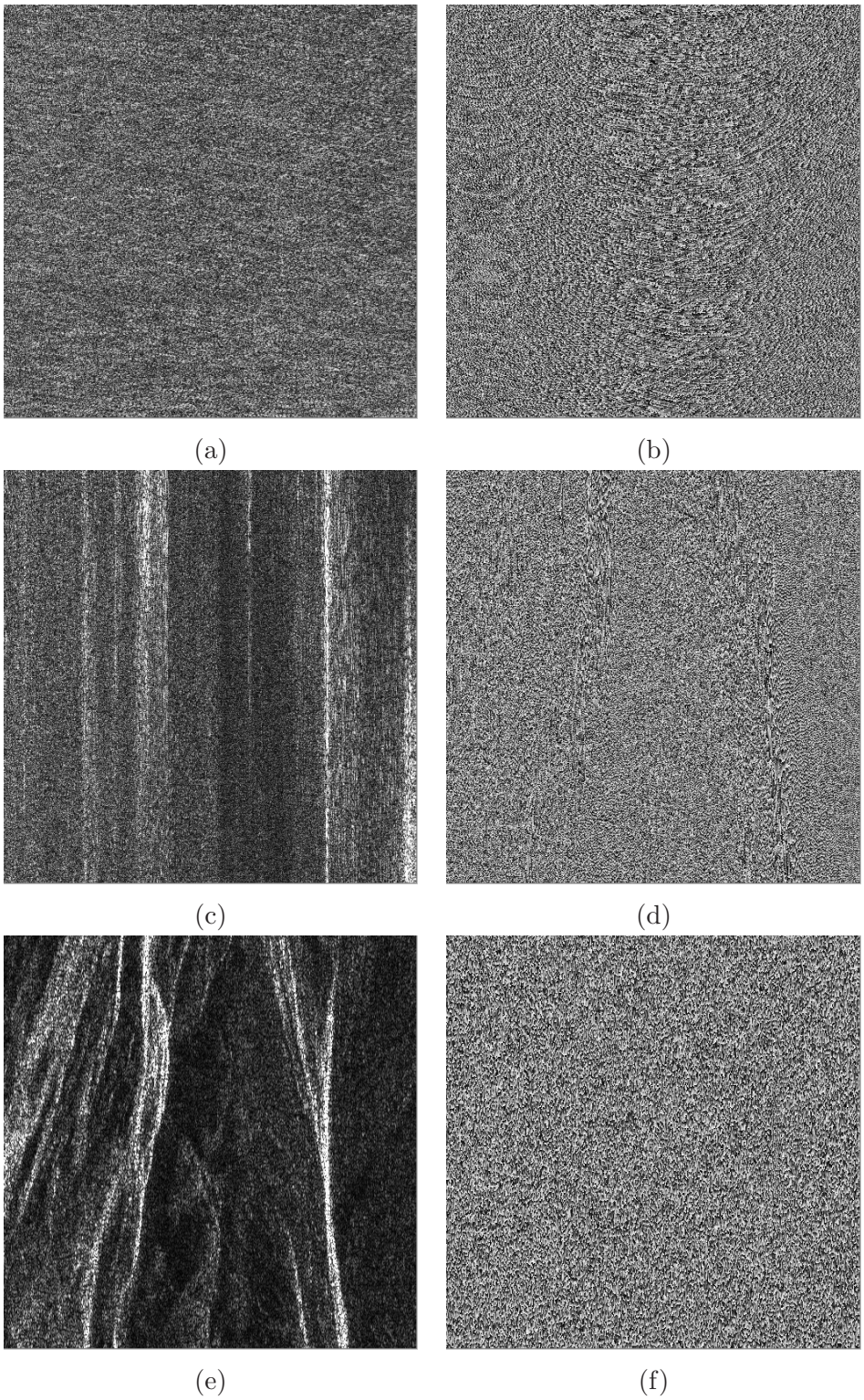


FIG. 1.9 – Formation d'images Radar à Synthèse d'Ouverture illustrée sur des données ERS 1 acquises dans le massif de Mont Blanc. Image brute RAW (©European Space Agency) : (a) amplitude, (b) phase. Filtrage adapté en distance : (c) amplitude, (d) phase. Synthèse d'ouverture en azimut (image Single Look Complex) effectuée par l'approche SYTER : (e) amplitude, (f) phase.

1.5 Statistiques des données SAR multivariées

Un système SAR mesure le champ électromagnétique rétrodiffusé par la cible sous la forme d'un vecteur à m composantes (variable aléatoire m-dimensionnelle) :

$$\vec{k} = [S_1\ S_2\ ...\ S_k\ ...\ S_m]^T. \tag{1.36}$$

Certaines hypothèses simplificatrices sont formulées :

- Le signal renvoyé par la cellule de résolution d'une cible distribuée est représentée comme une superposition linéaire des réponses des rétrodiffuseurs élémentaires ponctuels.
- L'amplitude et la phase de chaque onde élémentaire sont non-corrélées.
- Les phases élémentaires sont uniformément distribuées.

En appliquant la théorème central limite, les parties réelles et imaginaires de chaque composante S_k du vecteur $\vec{k}$ sont caractérisées par des distributions gaussiennes non-corrélées de moyennes nulles [Good-76]. Ainsi, le vecteur $\vec{k}$ suit une distribution gaussiennes complexe de moyennes nulles [Good-63], [Lee-94d] :

$$p_k(\vec{k}) = \frac{1}{\pi^m \det[C]} e^{-\vec{k}^\dagger [C]^{-1} \vec{k}}. \tag{1.37}$$

$[C] = E\{\vec{k}\vec{k}^\dagger\}$ étant la matrice de covariance (hermitienne semi-définie positive). Comme la moyenne de $\vec{k}$ est nulle, la caractérisation statistique des données doit s'effectuer à l'aide des moments d'ordre plus élevés, c'est à dire estimer $[C]$ (ou $[T]$). Si le processus $\vec{k}$ est stationnaire et ergodique, l'espérance mathématique dans l'équation 1.33 (ou l'équation 1.34) est remplacée par la moyenne spatiale appelée à tord "complexe multivues" car il ne s'agit pas de L vues différentes basse résolution, mais de L échantillons pleine résolution obtenus en utilisant toute l'antenne synthétique. Ainsi, l'observation empirique $[Z_L]$ de la matrice $[C]$ (ou $[T]$) est :

$$[Z_L] = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} k_i k_i^\dagger. \tag{1.38}$$

Les matrices de covariance et cohérence polarimétriques suivent une distribution de Wishart [Good-63], [Lee-94d] :

$$p_{[Z_L]}([Z_L]) = \frac{L^{mL} \det[Z_L]^{L-m}}{\det[C]^L \widetilde{\Gamma}_m(L)} etr(-L[C]^{-1}[Z_L]). \tag{1.39}$$

où $etr(...)$ est l'exponentielle de la trace d'une matrice et $\widetilde{\Gamma}_m(L) = \pi^{m(m-1)/2} \prod_{i=1}^{m} \Gamma(L-i+1)$ est la fonction gamma généralisée dans le cas multivarié. Cette formulation est valable seulement dans le cas où $L \geq m$.

Pour une gaussienne multivariée, le moment statistique centré d'ordre p est nul si p est impair ou, si p est pair, il peut être exprimé sous la forme d'un produit des covariances. En général, les moments statistiques d'ordre p de la matrice de covariance empirique $E[Z_L]^p$ s'expriment exclusivement en fonction de $[C]$ [Lope-07].

1.6 Théorèmes de décomposition polarimétrique incohérente

Les décompositions incohérentes expriment les matrices $[C]$ ou $[T]$ comme une combinaison de matrices élémentaires reliées à des mécanismes de rétrodiffusion plus facile à interpréter. On peut distinguer d'un coté les décompositions guidées par des modèles de cible (surfaces, dièdres, dipôles orientés aléatoirement) ou par les phénomènes qui conditionnent la signature polarimétrique (symétrie azimutale, orientation, torsion, hélicité) telles que celle de Freeman [Free-98], celle de Huynen [Huyn-65] ou celle de Touzi [Touz-07], et d'un autre coté les décompositions qui s'appuient sur les vecteurs et valeurs propres de la matrice de cohérence telles que celle de Cloude et Pottier [Clou-96], [Clou-97]. La décomposition de Touzi traite le cas de la décomposition incohérente en utilisant la diagonalisation de Cloude. Par rapport à celle de Cloude et Pottier, elle utilise la phase du signal rétrodiffusé et préserve l'indépendance des paramètres de la base de polarisation même pour une cible non-symétrique.

Le choix entre les différents types de décomposition dépend des applications traitées. On emploie des décompositions cohérentes principalement pour étudier la rétrodiffusion de cibles spécifiques (bâtiments, navires [Touz-04]), alors que les décompositions incohérentes sont employées de façon plus large pour caractériser et classifier des scènes comportant des cibles naturelles (forêts, champs, glace) ou des cibles cohérentes (zones urbaines, infrastructures), en supposant que le moyennage spatial nécessaire à l'estimation des statistiques du deuxième ordre préserve leur réponse au milieu du "clutter" (fouillis) des cibles non-cohérentes.

1.6.1 La décomposition polarimétrique $H/\alpha/A$

La décomposition de Cloude et Pottier [Clou-96], [Clou-97] consiste à déterminer les valeurs propres $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ et les vecteurs propres $[v]_i$ de la matrice de cohérence polarimétrique $[T]$ et associer chaque vecteur propre à un mécanisme de rétrodiffusion $[T^{(i)}]$:

$$[T] = \sum_{i=1}^{3} \lambda_i [v]_i [v]_i^{*T} = \sum_{i=1}^{3} \lambda_i [T^{(i)}]. \tag{1.40}$$

où $i \in \{1, 2, 3\}$. La somme des trois valeurs propres est égale à l'intensité rétrodiffusée totale ("span" dans l'équation 1.11) :

$$Span = \sum_{i=1}^{3} \lambda_i. \tag{1.41}$$

Les vecteurs propres peuvent être paramétrés sous la forme :

$$[v]_i = [\cos(\alpha_i) \quad \sin(\alpha_i)\cos(\beta_i)e^{j\delta_j} \quad \sin(\alpha_i)\sin(\beta_i)e^{j\gamma_j}]^T, \tag{1.42}$$

les valeurs propres λ_i et les angles α_i, β_i traduisant la force et les caractéristiques géométriques des mécanismes de rétrodiffusion associés aux vecteurs propres.

Plusieurs paramètres globaux calculée à partir des trois valeurs propres ont été proposés, telles que les pseudo-probabilités p_i :

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^{3} \lambda_j}, \quad H = \sum_{i=1}^{3} -p_i \log_3 p_i, \tag{1.43}$$

Le paramètre entropie H reflète le degré de pureté ou de mélange polarimétrique de la rétrodiffusion. H est proche de 0 quand un mécanisme est prédominant (l'intensité totale est concentrée sur λ_1). La rétrodiffusion correspond alors à un seul mécanisme et la matrice $[T]$ est de rang 1. A l'opposé, H tend vers 1 quand les trois mécanismes sont de niveau équivalent $\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx \lambda_3$ et correspondent à un mélange des trois mécanismes dans des proportions égales.

L'anisotropie A est un paramètre global qui traduit l'importance relative des valeurs propres secondaires :

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}. \tag{1.44}$$

Ce paramètre est complémentaire de l'entropie lorsque que la deuxième et la troisième valeur propre deviennent significatives. Pour les faibles valeurs de H, les valeurs propres λ_2 et λ_3 sont faibles et bruitées et A est trop bruité pour apporter une information discriminante.

L'interprétation du mécanisme global de rétrodiffusion se fait notamment à travers l'angle moyen α calculé comme la moyenne des angles α_i pondérés par la force des trois mécanismes :

$$\alpha = \sum_{i=1}^{3} p_i \alpha_i. \tag{1.45}$$

Lorsque α est proche de 0, la rétrodiffusion est de type simple rebond sur une surface rugueuse par rapport à la longueur d'onde. La rétrodiffusion est de type volumique quand α est proche de $\pi/4$ et de type double rebond pour α proche de $\pi/2$.

Évaluation statistique

Les études récentes menées par López-Martínez et al. [Lope-05] ont permis d'évaluer l'influence du bruit de speckle de la matrice $[T]$ (détaillé au Chap. 3) sur l'estimation des valeurs propres utilisées dans la décomposition $H/\alpha/A$.

En utilisant une méthode numérique de diagonalisation en valeurs propres des matrices hermitiennes, la matrice de cohérence s'écrit sous la forme :

$$[\Sigma] = \begin{bmatrix} l_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & l_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & l_m \end{bmatrix} = [Q]^{\dagger}[T][Q], \tag{1.46}$$

où $[Q]$ est une matrice unitaire (ses colonnes sont les vecteurs propres de $[T]$) et $\{l_1, l_2, ...l_m\}$ les valeurs propres théoriques. En pratique, la matrice de cohérence $[T]$, (sous l'hypothèse d'ergodicité et stationnarité) est estimée en utilisant le MLE (Maximum Likelihood Estimator) en moyennant spatialement L échantillons. La matrice $[T]$ est observée par sa valeur empirique $[T]_L$, avec la décomposition suivante :

$$[\Xi] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_m \end{bmatrix} = [Q]_L^{\dagger}[T]_L[Q]_L, \tag{1.47}$$

Ainsi, la ddp des valeurs propres empiriques $\{\lambda_1, \lambda_2, ...\lambda_m\}$ (variable aléatoire m-dimensionnelle) de la matrice de cohérence polarimétrique est obtenue :

$$p_s(\Xi) = \frac{\pi^{m(m-1)} L^{\frac{m}{2}(2L-m+1)}}{\widetilde{\Gamma}_m(m)\widetilde{\Gamma}_m(L)} \prod_{k=1}^{m-1} k^{m-k} \frac{\prod_{i=1}^{m} \lambda_i^{L-m} \prod_{i<j}^{m} (\lambda_i - \lambda_j)}{\prod_{i=1}^{m} l_i^L \prod_{i<j}^{m} (l_j^{-1} - l_i^{-1})} \left| e^{-L\frac{\lambda_j}{l_i}} \right|_{i,j=1}^{m} . \quad (1.48)$$

En observent l'équation 1.48, on constate que cette pdf s'exprime en fonction :
- de la dimension de la matrice $[T]$ correspondant au nombre d'acquisitions SAR,
- du nombre de vues L utilisées pour l'estimation de $[T]$,
- des valeurs propres théoriques rangées par ordre décroissante $\infty > l_1 \geq l_2 \geq ... \geq l_m \geq 0$.

Le comportement asymptotique des valeurs propres et leur influence sur les paramètres $H/\alpha/A$ ont été étudiés pour $L = 64$ et le cas POLSAR monostatique [Lope-05] :
- λ_1 - la première valeur propre est surestimée dans les cas où H a des valeurs fortes, le biais étant minimum avec $H = 0$;
- λ_2 - la deuxième valeur propre est sous-estimée pour les valeurs faibles d'entropie. Si les valeurs de H sont importantes, son comportement dépend de la valeur de l'anisotopie : surestimée si A est faible et sous-estimée si A est forte ;
- λ_3 - la troisième valeur propre est toujours sous-estimée. Son biais (en valeur absolu) est proportionnel avec H ;
- H - l'entropie est toujours sous-estimée. Le maximum du biais se trouve quand $\lambda_1 = \lambda_2$ et le minimum quand $H = 0$;
- A - l'anisotropie est toujours surestimée, sauf dans le cas $\lambda_1 = \lambda_2$ où elle devient sous-estimée.

Les hypothèses qui ont permis l'étude de López-Martínez et al. ne permettent pas l'étude du biais introduit par l'estimation MLE du paramètre α, car la complexité mathématique de calcul devient très élevée, nécessitant des développements futurs.

Une autre approche a été proposée par Lee et al. [Lee-06a], où l'étude de l'influence de l'estimation MLE sur les paramètres $H/\alpha/A$ a été réalisée avec la méthode de simulation Monte Carlo. Les résultats obtenus pour des milieux naturels (forêt, zones agricoles et urbaines) recommandent une estimation multivues complexe utilisant entre 50 et 80 échantillons nécessaires pour réduire le biais et la variance des paramètres $H/\alpha/A$. Dans le cas du paramètre α, il a été montré que le nombre d'échantillons utilisé pour $L > 3$, influence la précision de l'estimation MLE de seulement quelques degrés. De plus, la précision varie en fonction de la nature du milieu rétrodiffusant :
- α est proportionnel au nombre de vues L dans des milieux urbains ;
- α est proportionnel à l'inverse au nombre de vues L pour la rétrodiffusion volumique ou surfacique.

Les résultats présentés par Lee et al. [Lee-06a] sont confirmés par Ridha Touzi [Touz-07a]. Ainsi, dans le cas général, le nombre d'échantillons requis pour une décomposition non-biaisée est plus grand que 60.

1.7 Classification POLSAR

Le potentiel de classification des données POLSAR est très élevé car les différents canaux polarimétriques apportent de l'information sur un grand nombre des propriétés physiques de la zone cible.

La littérature du domaine décrit trois grands catégories parmi les approches utilisées :

1. *l'analyse des propriétés physique du processus de diffusion* : Ce type d'approche présente l'avantage d'avoir une information a priori décrivant les classes recherchées [Zyl-89], [Clou-97].
2. *la classification statistique* : Elle est basée sur des algorithmes statistiques de clustering non-supervisées ou supervisées [Dong-01], [Goud-01], [Chen-03], [Beau-04], [Gall-05], [Reig-07].
3. *la classification physique/statistique* : Tout d'abord une première analyse physique est appliquée sur les données, ensuite une classification statistique est initialisée avec ce premier résultat [Lee-99b], [Fami-01], [Lee-04], [Kers-05].

Dans la suite, le clustering statistique avec la distance de Wishart initialisé par une décomposition $H/\alpha/A$ ou Freeman [Lee-99b], [Fami-01], [Lee-04] a été choisi. Ce choix se base sur l'observation de Kersten et al. [Kers-05] : en général, la modélisation de la distribution des pixels est plus importante que le choix de l'algorithme de clustering statistique.

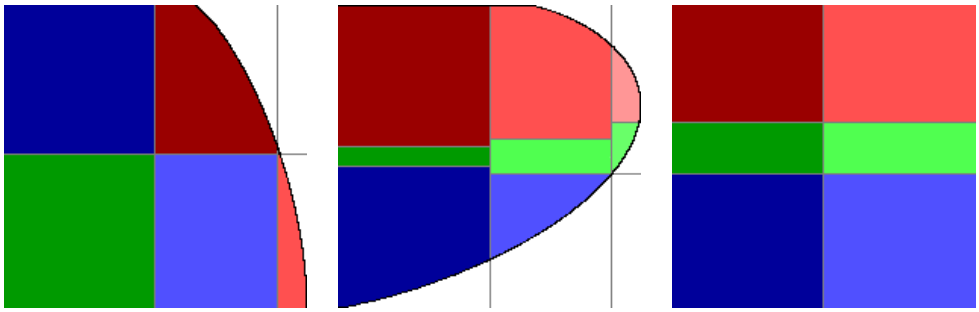
1.7.1 Partition nette de l'espace $H/\alpha/A$

L'analyse conjointe des paramètres polarimétriques H, α et A permet de caractériser certaines propriétés polarimétriques de la cellule de rétrodiffusion. Un découpage de l'espace des attributs $H - \alpha$ en 8 zones caractéristiques (cf. Fig. 1.10) de différents comportements a été proposé en [Clou-97]. La discrimination entre rétrodiffusion surfacique, volumique et double rebond est donnée par l'angle α alors que le degré de mélange de mécanismes de rétrodiffusion est donné par l'entropie H. Ensuite, la partition a été raffinée par l'utilisation du troisième paramètre A. Dans tous les cas, le choix des seuils pour le découpage net de l'espace 3D des attributs est fait par l'expert, tout en tenant compte de l'interprétation physique de ces attributs.

La partition de l'espace $H/\alpha/A$ fournit un premier résultat de classification directement interprétable. Un inconvénient majeur de cette méthode est que la classification proposée est purement thématique et indépendante des données (biais et variance). En pratique, pour pallier cet inconvénient le résultat de la classification $H/\alpha/A$ est utilisé pour initialiser un algorithme de classification non-supervisée de type C-moyennes basée sur la distance de Wishart.

1.7.2 Classification C-moyennes avec la distance de Wishart

Connaissant la ddp de la matrice de cohérence polarimétrique (cf. Eq. 1.39), on peut déterminer le logarithme du rapport de vraisemblance construit pour tester l'hypothèse d'égalité



(a) (b) (c)

FIG. 1.10 – Segmentation nette de l'espace $H/\alpha/A$ (R - double rebond, V - rétrodiffusion volumique, B - rétrodiffusion surfacique) : (a) plan $H-A$, (b) plan $H-\alpha$, (c) plan $A-\alpha$.

entre 2 matrices de cohérence empiriques $[T_L]$ et $[T'_L]$. Ceci conduit à une mesure de distance appelée *distance de Wishart* [Lee-99b] :

$$d_W([T_L],[T'_L]) = \log\frac{\det[T_L]}{\det[T'_L]} + tr\{[T_L]^{-1}[T'_L]\} - m, \tag{1.49}$$

où m est la dimension de vecteur cible. Cette distance est utilisée dans des méthodes de classification non-supervisée de type C-moyennes en prenant comme distance la distance de Wishart entre les matrices de cohérence des centres de classe et celle du pixel à classer.

Pour classifier des données POLSAR (Algo. 1), la méthode consiste à initialiser les classes à l'aide de la partition de l'espace des paramètres $H/\alpha/A$. L'algorithme alterne ensuite de façon itérative l'estimation des matrices de cohérences des classes et l'affectation des pixels à la classe la plus proche pour la distance de Wishart.

Algorithme 1 : C-moyennes avec la distance de Wishart

1. filtrage de speckle de la matrice $[T]$ *;*
2. décomposition $H/\alpha/A$ *de* $[T]$ *;*
3. segmentation supervisée de l'espace $H/\alpha/A$ *en* c *classes ;*
4. calcul du centre de classe initial $[V_i] = E\{[T]|[T] \in$ *classe* $\omega_i\}$, $i \in \{1,..,c\}$ *(itération* k*) ;*
5. calcul de la distance de Wishart $d^i_W([T]_N,[V_i])$, $n \in \{1,..,N\}$ *ou* N *est le nombre des pixels ;*
6. affectation du pixel n *à la classe* $W_{\min_i(d^i_W)}$ *;*
7. test du critère d'arrêt :

si "oui", STOP ;
si "non", $k = k+1$ *et retour à l'étape 4.*

Le critère d'arrêt : le nombre limite de pixels qui changent de classe, la distance minimale entre les centres de classes est atteinte ou un nombre limite d'itérations.

1.7.3 Segmentation par fusion interactive floue de l'espace $H/\alpha/A$

L'objectif d'un système de fusion floue interactif (FFI) est d'offrir à l'utilisateur une méthode capable d'agréger des attributs qualitatifs issus des données, dans le cas où le comportement des

ces attributs n'est pas totalement connu. Nous avons testé cette approche dans le contexte des données POLSAR, pour raffiner la partition nette de l'espace $H/\alpha/A$.

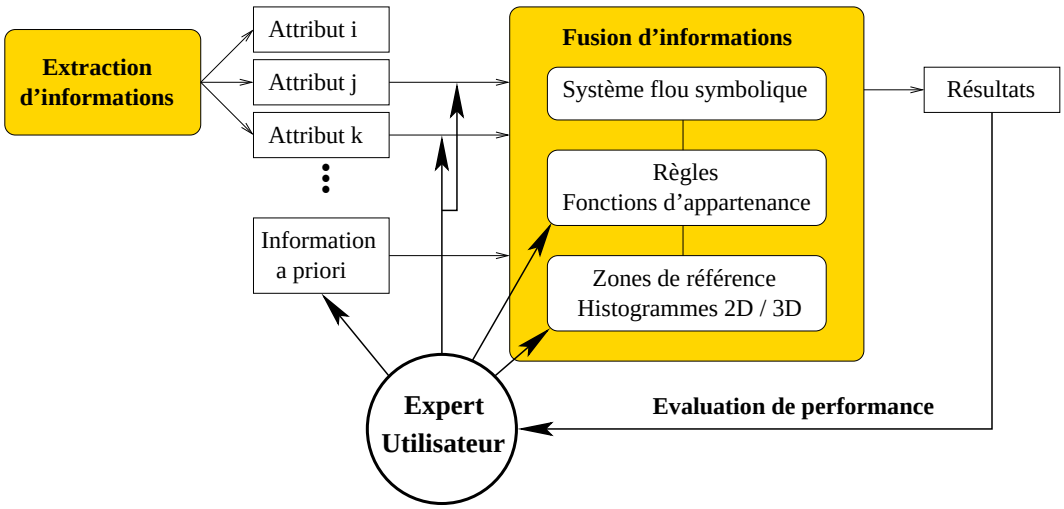


FIG. 1.11 – Fusion d'informations par un système flou symbolique interactif.

Le système construit, illustré dans la figure 1.11, a deux caractéristiques principales :

- il se place à un niveau sémantique en introduisant des symboles appartenant au langage des géophysiciens pour décrire les attributs et donner les règles qui relient cette description aux classes recherchées,
- il est conçu pour une utilisation interactive où l'expert/l'utilisateur sélectionne les attributs discriminants issus des données ou d'informations a priori, pilote le système flou au travers d'une interface graphique (sélection des règles et ajustement des fonctions d'appartenance) et évalue la sortie afin de raffiner le réglage dans la direction du résultat attendu.

Du point de vue du système flou, l'approche utilisée est relativement classique. L'enchaînement des trois principales étapes (fuzzification, inférence et décision) sont décrites en [Vale-03], [Bujo-04]. Notre apport se situe au niveau de la mise en œuvre du système de fusion sur les applications POLSAR [Vasi-07]. Le rôle confié à l'utilisateur lui permet d'interagir avec le système à trois niveaux :

- le premier est le choix des symboles d'entrée utilisés pour décrire les attributs, puis la sélection de règles de type implication logique pour relier les symboles d'entrée aux symboles de sortie (les classes recherchées). Cette étape est simplifiée par une représentation graphique 2D (ou 3D) de l'espace des attributs : pour chaque classe recherchée S_k, l'utilisateur active les règles ayant pour conclusion S_k et pour prémisse un couple (ou un triplet) de symboles en cliquant dans la zone correspondante.
- le second niveau est l'ajustement des fonctions d'appartenance des différents symboles sur les axes des attributs à partir de la connaissance de leur comportement. Cet ajustement peut également s'appuyer sur des zones de référence tracées par l'utilisateur dans une image où son expertise lui permet d'identifier les classes. Les nuages de points des différentes classes sont alors visualisés dans l'espace des attributs et facilitent ainsi le positionnement des symboles impliqués dans les règles qui définissent ces classes.
- le dernier niveau est l'évaluation de performance et le rebouclage éventuel pour améliorer les

résultats dans la direction souhaitée par l'utilisateur. Deux types de sorties sont proposés : une classification nette qui affecte à chaque pixel la classe qui a le plus fort degré d'appartenance, et une classification floue formée des images des différents degrés d'appartenance. L'évaluation du résultat peut être visuelle ou quantitative à l'aide de zones de référence.

Dans le cas des attributs $H/\alpha/A$, la procédure FFI est décrite par Algo. 2.

Algorithme 2 : FFI de l'espace $H/\alpha/A$

1. filtrage de speckle de la matrice $[T]$;
2. décomposition $H/\alpha/A$ de $[T]$;
3. calcul du span de $[T]$, utilisé comme image d'expertise associé aux attributs ;
4. sélection des régions représentatives sur l'image d'expertise ;
5. calcul des histogrammes 3D conditionnels et visualisation de l'espace des attributs ;
6. choix du nombre des mots décrivant les classes (ex. à 3 mots : $\{fort, moyen, faible\}$) ;
7. définition des règles et des fonctions d'appartenance aux classes (itération k) ;
8. lancement de la fusion floue des attributs ;
9. évaluation subjective/objective des resultats de classification :

si "oui", STOP ;
si "non", $k = k + 1$ et retour à l'étape 7.

1.8 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons présenté les éléments d'électromagnétisme de base nécessaires à la compréhension des mécanismes de propagation du signal radar ainsi que les traitements utilisés pour la synthèse des images SAR. On s'intéresse particulièrement à la représentation de l'information polarimétrique dans le contexte de l'imagerie SAR.

En effet, l'arrivée des satellites SAR mesurant le signal radar sur tous les canaux polarimétriques a finalement permis la représentation complète du champs électromagnétique rétrodiffusé. Les nombreuses expériences avec un système POLSAR aéroporté recommandent une chaîne de traitement POLSAR (cf. Fig. 1.12) pour extraire une caractérisation 2D du terrain par des méthodes non-supervisées. La chaîne POLSAR comprend toutes les étapes du traitement des images SAR mono-polarisation (cas particulier dégénéré). Nous avons ainsi utilisée le formalisme général vectoriel POLSAR pour décrire les principes de l'imagerie SAR (qui est à la base vectorielle). Le cas scalaire, rencontré jusqu'au présent dans la littérature du domaine, découle comme un cas particulier à dimension réduite.

Nous avons proposé également une nouvelle approche pour la fusion des attributs polarimétriques basée sur les systèmes de fusion floue interactifs développés par Lionel Valet (Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance, Université de Savoie).

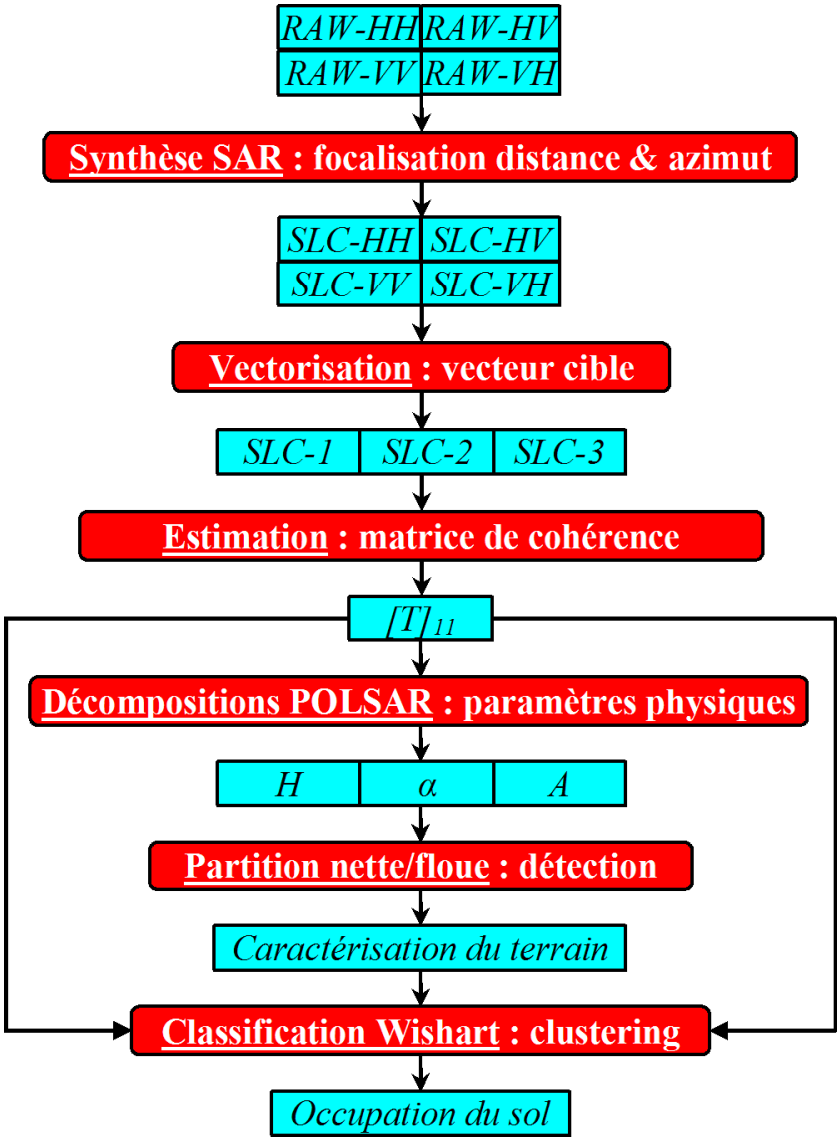


FIG. 1.12 – Diagramme illustrant les principales étapes dans le traitement des images SAR multivariées.

Chapitre 2

L'interférométrie Radar à Synthèse d'Ouverture

Sommaire

2.1 Introduction 34
2.2 Les principes de l'interférométrie SAR 34
2.3 Formation des interférogrammes scalaires mono-polarisation 35
2.3.1 Recalage interférométrique 36
2.3.2 Calcul des images issues d'un couple interférométrique 36
2.3.3 Modèle statistique des images InSAR mono-polarisation 36
2.3.4 Interférométrie différentielle 37
2.3.5 Développement de phase 38
2.4 Formation des interférogrammes vectoriels multi-polarisation 38
2.4.1 Estimation de la cohérence complexe 38
2.4.2 Changements de base en interférométrie polarimétrique 39
2.4.3 Optimisation de la cohérence 40
2.4.4 Classification 41
2.4.5 Perspectives : Équation de Sinclair et mesures différentielles SAR 41
2.5 Conclusions 43

2.1 Introduction

Le principe de l'interférométrie radar à synthèse d'ouverture (InSAR) est d'effectuer une mesure de la différence de phase entre deux images SAR d'une même scène, images obtenues depuis des orbites différentes et/ou à des dates différentes. Cette technique permet ainsi de détecter et de quantifier les variations de la distance cible/radar entre les deux prises de vue. Dans les années 1980, les premières mesures de topographie InSAR ont prouvé la faisabilité de l'interférométrie à partir de données satellitaires [Zebk-87], [Gabr-89].

Depuis, les acquisitions répétés effectuées par les instruments SAR des satellites ERS 1/2 ont donné la possibilité d'étudier des déplacements au sol entre deux (ou plusieurs) prises de vue radar. La technique, appelée interférométrie SAR différentielle (D-InSAR), consiste à composer, soit deux interférogrammes SAR classiques, ou un interférogramme SAR et une interférogramme simulé à partir d'un modèle numérique de terrain de la zone imagée. Cette technique a été utilisée pour la cartographie des courants océaniques [Gold-87], ainsi que pour la mesure des déplacements lents de surface comme les déplacements tectoniques [Mass-93a] ou les déplacements des glaciers [Rign-96].

2.2 Les principes de l'interférométrie SAR

L'interférométrie est une méthode de mesure qui exploite les interférences (interactions) intervenant entre plusieurs ondes cohérentes entre elles. Le terme interférométrie SAR, désigne la technique ou les méthodes utilisant au moins deux images complexes d'un radar à synthèse d'ouverture, afin d'obtenir des informations supplémentaires sur les objets présents dans la zone imagée, en exploitant l'information contenue dans la phase du signal SAR.

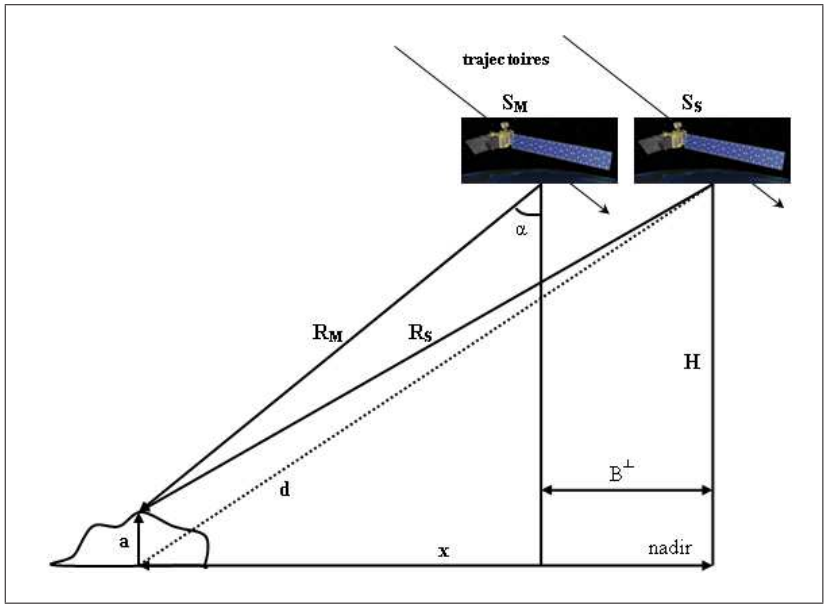


FIG. 2.1 – Géométrie d'acquisition InSAR.

Dans une configuration InSAR standard (cf. Fig. 2.1), une cible P située à une altitude A est

imagée depuis deux positions du radar S_M (maître) et S_S (esclave). La distance entre les deux acquisitions SAR représente la base interférométrique B.

Soient deux images SAR complexes $z_M(r,a)$ et $z_S(r,a)$:

$$z_i(r,a) = |z_i(r,a)|e^{j\phi_i(r,a)}, \tag{2.1}$$

où $i \in \{M,S\}$, a est la position en azimut et r la position en distance. La phase d'une image SAR est composée de deux termes :

$$\phi_i(r,a) = \phi_i^{prop}(r,a) + \frac{4\pi}{\lambda}R, \tag{2.2}$$

avec R la distance radar-cible et $\phi_i^{prop}(r,a)$ la phase propre liée au déphasage introduit par l'interaction onde-cible (comportement aléatoire - cf. Fig. 1.9-(f)). Cette phase propre correspond à chacune des 4 composantes de $[S]$ dans l'équation du processus de diffusion (cf. Eq. 1.8).

En s'appuyant sur le principe des mesures en mode différentiel et sur l'hypothèse d'égalité entre les phases propres des deux acquisitions SAR $\phi_M^{prop}(r,a) \approx \phi_S^{prop}(r,a)$, la phase interférométrique $\Delta\phi(r,a)$ est directement proportionnelle à la différence du chemin $\Delta R = R_M - R_S$:

$$\Delta\phi(r,a) = \phi_M(r,a) - \phi_S(r,a) = \frac{4\pi}{\lambda}(R_M - R_S). \tag{2.3}$$

Ainsi, la mesure de ΔR à travers $\Delta\phi(r,a)$ est très précise (une fraction de la longueur d'onde), mais elle est repliée *modulo* 2π. En supposant qu'il n'y a pas de déformation de la zone cible entre les deux acquisitions, ΔR s'exprime sous la forme :

$$\Delta\phi(r,a) \approx \frac{4\pi}{\lambda}B_\perp\left(\sqrt{1-\frac{z^2}{R^2}}\cos\alpha - \frac{z}{R}\sin\alpha\right), \tag{2.4}$$

z étant la hauteur du satellite par rapport à la surface de la Terre et $B_\perp$ la composante de la base perpendiculaire à la ligne de visée [Rodr-92]. z dépend de l'éloignement en distance et de la courbure de la Terre (franges orbitales) ainsi que de la topographie locale (franges topographiques). Si la hauteur de référence est choisie sur un ellipsoïde qui modélise la surface de la Terre (ex. WGS94) on peut retirer la composante orbitale de la phase [Ghig-98], le résultat dépend alors seulement de la topographie.

En général, la phase topographique et la phase orbitale sont deux composantes déterministes que l'on retrouve dans chaque interférogramme multi ou mono polarisation.

2.3 Formation des interférogrammes scalaires mono-polarisation

Dans cette section, la mesure du champ électromagnétique est effectué à travers un champ scalaire décrit par une seule configuration émission-réception.

2.3.1 Recalage interférométrique

La première étape dans la formation des interférogrammes SAR est le recalage interférométrique. L'objectif est de rendre les deux images dans une géométrie superposable. Dans le cas idéal, tous les réflecteurs élémentaires qui ont contribué à la phase propre lors de la formation de l'image maître se retrouvent exactement dans le même pixel de l'image esclave. Les techniques utilisées (ex. corrélation, maximisation de cohérence) pour cette étape doivent assurer une précision entre un dixième et un centième de pixel, ce qui nécessite de sur-échantillonner l'image SAR maître [Mait-01]. Une analyse détaillée sur les techniques de sur-échantillonnage des images SAR est présente dans [Hans-99].

2.3.2 Calcul des images issues d'un couple interférométrique

En modélisant les deux images SAR par des signaux aléatoires z_M et z_S complexes centrés et conjointement stationnaires au sens large (lois indépendantes de la position dans l'image), la différence de phase ϕ et la cohérence ρ sont définies à partir de la corrélation normalisée C par :

$$C = \rho e^{j\phi} = \frac{E\{z_M z_S^*\}}{\sqrt{E\{|z_M|^2\}E\{|z_S|^2\}}}. \tag{2.5}$$

Sous l'hypothèse supplémentaire d'ergodicité en moyenne (moyennes spatiales indépendantes des réalisations), l'espérance mathématique peut être remplacée par une moyenne de L échantillons pris dans un voisinage spatial. On calcule ainsi la cohérence γ et la différence de phase φ empiriques par :

$$\gamma = \frac{\left|\sum_{i=1}^{L} z_M z_S^*\right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^{L}|z_M|^2 \sum_{i=1}^{L}|z_S|^2}}, \quad \varphi = \arg\left\{\sum_{i=1}^{L} z_M z_S^*\right\}. \tag{2.6}$$

Ces images de phase et de cohérence ainsi que les images d'amplitude associées aux images SAR maître et esclave, sont calculées pour des pixels qui correspondent à des blocs de L pixels dans les images SLC. Le moyennage complexe décrit dans l'équation 2.6 est souvent appelé complex multi-looking par analogie avec le moyennage L-vues destiné à réduire le speckle des données d'intensité, appellation abusive car les échantillons ne proviennent pas de vues différentes issues de sous-ouvertures mais de pixels voisins issus d'une synthèse à pleine ouverture [Trou-06a]. Cette première estimation de la phase et de la cohérence est souvent faite avec un moyennage relativement faible afin de limiter la perte d'information spatiale.

2.3.3 Modèle statistique des images InSAR mono-polarisation

Les estimateurs de la phase et de la cohérence données par les équations 2.6 correspondent aux estimateurs au sens du maximum de vraisemblance [Touz-99]. Sous l'hypothèse que z_M et z_S sont des processus gaussiens complexes conjoints, Touzi et al. ont déterminé la ddp de la cohérence empirique γ en fonction du nombre de vues L et de la valeur de la cohérence théorique :

$$p(\gamma|\rho) = 2(L-1)(1-\rho^2)^L \gamma (1-\gamma^2)^{(L-2)} F(L, L; 1; \gamma^2\rho^2), \tag{2.7}$$

avec F une fonction mathématique particulière appelée fonction hypergéométrique [Touz-99]. Dans le même contexte, la ddp de la phase est donnée par :

$$p(\varphi|\phi,\rho) = \frac{\Gamma\left(L+\frac{1}{2}\right)(1-\rho^2)^L\beta}{2\sqrt{\pi}\Gamma(L)(1-\beta^2)^{L+\frac{1}{2}}} + \frac{(1-\rho^2)^L}{2\pi}F\left(L,1;\frac{1}{2};\beta^2\right), \tag{2.8}$$

où $|\varphi| \leq \pi$ et $\beta = \rho\cos(\varphi-\phi)$. Si $L \leq 4$, la fonction hypergéométrique F peut être remplacée par des fonctions trigonométriques [Lee-94d].

En général, la phase et la cohérence empiriques sont d'autant plus bruitées que la cohérence théorique est faible. La phase empirique est non-biaisée et une borne inférieure de sa variance est donnée par la borne de Cramer-Rao [Seym-94] :

$$E\{(\varphi-\phi)^2\} > \frac{1-\rho^2}{2L\rho^2}. \tag{2.9}$$

En revanche, la cohérence empirique est fortement biaisée pour les faibles valeurs de cohérence. De même que pour la phase, la variance décroît avec l'augmentation du nombre d'échantillons moyennés. Dans le cas d'un estimateur non-biaisé, la limite inférieure de la variance est donnée par la borne de Cramer-Rao [Touz-99] :

$$E\{(\gamma-\rho)^2\} > \frac{1-\rho^2}{2L}. \tag{2.10}$$

L'estimation de la cohérence avec un nombre insuffisant d'échantillons conduit donc, dans les zones de faible cohérence, à une surestimation de sa valeur assortie d'une forte variance [Mait-01].

2.3.4 Interférométrie différentielle

Dans le cas d'acquisitions SAR non-simultanées, si une partie de la zone imagée par le SAR s'est déplacée entre les deux acquisitions, la distance au radar s'est modifiée et la différence de phase est affectée de façon proportionnelle au déplacement d_{LOS} vers le radar (LOS - Line of Sight) [Mait-01] :

$$\delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}d_{LOS}. \tag{2.11}$$

En pratique, après la génération de l'interférogramme, les deux composantes déterministes peuvent être compensées : les franges orbitales par la connaissance exacte des orbites du satellite et les franges topographiques à l'aide d'un Modèle Numérique de Terrain. Si la décorrélation induite par les interactions ondes-cible et les effets atmosphériques est négligée, la phase résultante appelée phase différentielle (ou de déplacement) contient seulement l'information sur le déplacement en LOS de la cible. Ce déplacement est relatif, donc perceptible uniquement s'il affecte diversement les points de l'image (une translation globale du champ serait imperceptible).

La technique DInSAR (interférométrie SAR différentielle) est utilisée par de nombreux laboratoires pour des applications telles que l'étude des volcans [Mass-93a], des tremblements de Terre [Gabr-89], des glaciers [Rign-96], des plaques tectoniques [Amel-00] ...

2.3.5 Développement de phase

L'étape du développement de phase 2D est nécessaire pour transformer l'image de phase repliée (*modulo* 2π) en un champ de déplacement (phase différentielle) ou un MNT (phase topographique). Les obstacles communs aux différentes applications InSAR sont d'une part le bruit de la phase lié au niveau de cohérence et d'autre part la disparition du signal de phase due au relief (Sect. 1.3.1), à l'aliasing (échantillonnage insuffisant) ou à la perte de cohérence.

Les deux principales approches du développement de phase bidimensionnel sont [Trou-96a] :

1. le développement par propagation le long de chemins les plus surs avec placement de coupures [Gold-88] pour interdire le passage par des zones sources d'erreur. Cette approche s'appuie sur les différences de phase corrigées de manière à être dans l'intervalle $[-\pi, \pi]$. Elle a l'avantage d'être exacte tant qu'aucune "marche" n'est omise. En revanche, en cas de passage par une différence erronée (en l'absence de coupure), les erreurs se propagent et aboutissent à des zones entières affectées d'une erreur d'un multiple de 2π. Ces erreurs créent des marches au niveau des raccordements entre différents chemins, mais ni leur source, ni leur étendue, ne sont perceptibles en comparant la phase initiale et le résultat *modulo* 2π.
2. l'approche globale par moindres carrés qui minimise l'écart entre le gradient de la phase repliée et le gradient de la phase développée [Ghig-94]. Cette approche conduit à un résultat global dans lequel les sources d'erreur (les gradients de phase mal corrigés ou mal estimés) ont un impact local avec une décroissance en $1/R^2$ où R est la distance à la source d'erreur. L'introduction de pondérations ou de formulations différentes s'appuyant sur l'identité de Green [Lyub-99] permettent de réduire la sous-estimation du résultat due à ces erreurs.

Dans la littérature du domaine, on trouve également des algorithmes de développement de phase 2D basés sur : des algorithmes génétiques [Coll-97] ou des modèles statistiques avec des fonctions de coût pour l'optimisation nonlinéaire [Chen-01].

2.4 Formation des interférogrammes vectoriels multi-polarisation

Cette section présente le formalisme de l'interférométrie polarimétrique SAR. La mesure du champ électromagnétique est effectuée à travers un champ vectoriel décrit par plusieurs configurations de polarisation émission-réception.

2.4.1 Estimation de la cohérence complexe

Soit $\vec{k}_M$ et $\vec{k}_S$ les deux vecteurs cibles maître et esclave. La mise en forme des données la plus couramment utilisée [Clou-98] consiste à construire une matrice de cohérence polarimétrique

interférométrique (6×6, hermitienne, semi définie positive) :

$$[T]_6 = E\left\{ \begin{bmatrix} \vec{k}_M \\ \vec{k}_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{k}_M^{\dagger} & \vec{k}_S^{\dagger} \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} [T]_M & [\Omega]_{MS} \\ [\Omega]_{MS}^{\dagger} & [T]_S \end{bmatrix}, \tag{2.12}$$

où $[T]_i$ sont les matrices de cohérence polarimétriques ($i \in \{M, S\}$) et $[\Omega]_{MS}$ est la matrice de cohérence interférométrique :

$$[T]_i = E\{\vec{k}_i \vec{k}_i^{\dagger}\} \quad \text{et} \quad [\Omega]_{SM} = E\{\vec{k}_M \vec{k}_S^{\dagger}\}. \tag{2.13}$$

Dans le cas gaussien, la matrice de cohérence polarimétrique interférométrique empirique suit une loi du Wishart (cf. Eq. 1.39 avec $m = 6$) [Lee-99b].

Dans l'équation 2.12, les matrices de cohérence polarimétriques $[T]_M$ et $[T]_S$ décrivent exclusivement les propriétés liées aux interactions onde-cible (Sect. 2.4.5). En revanche, $[\Omega]_{SM}$ est une matrice qui contient simultanément des informations sur les interactions onde-cible (POLSAR) et le trajet aller-retour de l'onde rétrodiffusée (InSAR) [Clou-98]. Ainsi, la séparabilité des deux phénomènes d'interaction, proposée par le modèle de Sinclair (cf. Eq. 1.8) est perdue. En terme de fusion/classification, la représentation des données POL-InSAR par la matrice $[T_6]$ n'effectue pas une séparation optimale entre les caractéristiques InSAR et POLSAR, l'information polarimétrique étant fortement privilégiée.

Par rapport au cas scalaire, les données POL-InSAR monostatiques permettent d'obtenir trois phases interférométriques ϕ_i et trois cohérences ρ_i provenant des trois composantes polarimétriques. Dans la base de Pauli, le calcul s'effectue en normalisant les termes complexes de la diagonale de $[\Omega]_{SM}$ par la racine du produit des intensités correspondantes situées sur les diagonales des matrices $[T]_M$ et $[T]_S$:

$$C_i = \rho_i e^{j\phi_i} = \frac{[\Omega]_{SM_{ii}}}{\sqrt{[T]_{M_{ii}}[T]_{S_{ii}}}}, \tag{2.14}$$

avec $i \in \{1, 2, 3\}$. Ces trois phases et cohérences dépendent des bases de polarisation (émission-réception) utilisées pour l'une et l'autre des images.

2.4.2 Changements de base en interférométrie polarimétrique

Une nouvelle procédure de calcul d'une cohérence vectorielle a été proposée par Cloude et al. [Clou-98]. L'idée centrale est de générer des projections des différentes composantes des vecteurs cible $\vec{k}_M$ et $\vec{k}_S$ sur deux vecteurs normalisés $\vec{w}^M$ et $\vec{w}^S$ prédéfinis par l'expert. Ainsi, les deux canaux SLC maître et esclave généralisés s^M et s^S s'écrivent comme :

$$s^M = w_1^M \frac{S_{HH}^M + S_{VV}^M}{\sqrt{2}} + w_2^M \frac{S_{HH}^M - S_{VV}^M}{\sqrt{2}} + w_3^M \sqrt{2} S_{XX}^M, \tag{2.15}$$

$$s^S = w_1^S \frac{S_{HH}^S + S_{VV}^S}{\sqrt{2}} + w_2^S \frac{S_{HH}^S - S_{VV}^S}{\sqrt{2}} + w_3^S \sqrt{2} S_{XX}^S, \tag{2.16}$$

où les vecteurs $\vec{w}$ peuvent être interprétés comme des mécanismes de diffusion généralisés (cf. Tab. 2.1) et sont paramètrés suivant la forme suivante [Clou-98] :

$$\vec{w} = [w_1 \ w_2 \ w_3]^T = [\cos\alpha \ \ \sin\alpha\cos\beta e^{j\epsilon} \ \ \sin\alpha\sin\beta e^{j\mu}]^T, \tag{2.17}$$

avec $\alpha, \beta, \epsilon, \mu$ étant les quatre angles décrivant les quatre degrés de libertés d'un mécanisme de rétrodiffusion dans le cas monostatique [Clou-96].

TAB. 2.1 – Exemples des mécanismes de diffusion utilisées en POL-InSAR.

Mode polar.	α	β	ϵ	μ	w_1	w_2	w_3
HH	45^0	0^0	0^0	0^0	0.707	0.707	0
HV	90^0	90^0	0^0	0^0	0	0	1
VV	45^0	180^0	0^0	0^0	0.707	-0.707	0
HH+VV	0^0	0^0	0^0	0^0	1	0	0
HH-VV	90^0	0^0	0^0	0^0	0	1	0
LL	90^0	45^0	0^0	90^0	0	0.707	0.707j
LR	0^0	0^0	0^0	0^0	1	0	0
RR	90^0	45^0	0^0	-90^0	0	0.707	-0.707j

Finalement, il est possible de définir une cohérence complexe POL-InSAR sous la forme :

$$\Upsilon = \gamma e^{j\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^{L} s^M s^{S^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{L} s^M s^{M^*} \sum_{i=1}^{L} s^S s^{S^*}}}, \tag{2.18}$$

2.4.3 Optimisation de la cohérence

Une procédure d'optimisation de la cohérence a été proposée par Cloude et Papathanassiou [Clou-98] pour rechercher les vecteurs $\vec{w}^M$ et $\vec{w}^S$ qui pondèrent les composantes polarimétriques des vecteurs de rétrodiffusion $\vec{k}_M$ et $\vec{k}_S$ pour former des composantes $\vec{w}^{M\dagger}\vec{k}_M$ et $\vec{w}^{S\dagger}\vec{k}_S$ dont la cohérence donnée par l'équation 2.18 soit maximale. La solution du problème (basée sur les multiplicateurs du Lagrange) conduit à une décomposition en vecteurs propres qui fournit trois valeurs propres réelles positives $\nu_1 \geq \nu_2 \geq \nu_3 \geq 0$ associées à des couples de vecteurs $\vec{w}_i^M$ et $\vec{w}_i^S$, $i \in \{1, 2, 3\}$. La cohérence maximum est donnée par la racine carrée de la plus grande valeur propre : $\rho_1^{opt} = \sqrt{\nu_1}$. Le mécanisme de rétrodiffusion optimal est calculé par la projection de deux vecteurs cibles maître et esclave sur le vecteur propre correspondant à ν_1. De même, on peut ainsi calculer trois cohérences complexes optimisées correspondant aux trois valeurs propres ν_i :

$$\rho_i^{opt} e^{j\phi_i^{opt}} = \frac{\vec{w}_{opt_i}^{M\dagger}[\Omega]_{MS}\vec{w}_{opt_i}^{S}}{\sqrt{\vec{w}_{opt_i}^{M\dagger}[T]_M\vec{w}_{opt_i}^{M}.\vec{w}_{opt_i}^{S\dagger}[T]_S\vec{w}_{opt_i}^{S}}}. \tag{2.19}$$

Cette procédure nécessite l'utilisation de voisinages relativement importants pour obtenir des paramètres exploitables.

Du point de vue physique, en restant dans la base de Pauli, les trois cohérences et phases données par l'équation (2.19) correspondent à la même décomposition pour les deux acquisitions, donc aux mêmes mécanismes de rétrodiffusion. Ceci permet d'attribuer les trois centres de phase aux trois types de structures séparées dans les composantes de Pauli. Cependant, la séparation n'est pas forcément optimale vis-à-vis de la cohérence interférométrique des cibles

en présence et d'une possible évolution temporelle entre les acquisitions. Les trois cohérences obtenues sont alors plus faibles et le bruit des interférogrammes plus important. En aboutissant à deux décompositions polarimétriques qui peuvent être différentes et maximisent la cohérence interférométrique, la technique d'optimisation permet de rattraper une partie de la décorrélation entre les acquisitions [Trou-06a]. A condition d'être suffisamment stable numériquement, elle doit fournir des hauteurs de centre de phases plus précises et des niveaux de cohérence plus directement liés aux structures correspondantes.

2.4.4 Classification

En terme de fusion/classification, les données POL-InSAR permettent de s'appuyer à la fois sur des paramètres polarimétriques et interférométriques. Les trois cohérences peuvent être utilisées directement ou combinées après optimisation pour former des paramètres tels que l'écart relatif entre la cohérence maximale et les deux autres cohérences :

$$A_1 = \frac{|\rho_1^{opt}| - |\rho_2^{opt}|}{|\rho_1^{opt}|}, \qquad A_2 = \frac{|\rho_1^{opt}| - |\rho_3^{opt}|}{|\rho_1^{opt}|}. \tag{2.20}$$

Ces paramètres A_1 et A_2 sont jugés plus discriminants notamment pour la classification des forêts à partir de données POL-InSAR [Lee-05]. L'interprétation des valeurs de A_2 renseigne par exemple sur le type de forêt avec des règles empiriques telles que "une faible valeur de A_2 (< 0.2) représente une faible densité de végétation, une valeur intermédiaire ($0.2 < A_2 < 0.5$) des hauteurs moyennes et une forêt dense et des valeurs > 0.5 des forêts hautes et denses". Une partition de l'espace 2D des paramètres A_1 et A_2 [Fami-05] peut fournir, de la même manière que la partition de l'espace H/α en polarimétrie, une initialisation des classes en vue d'une classification non-supervisée s'appuyant sur la distance de Wishart calculée avec les matrices de cohérence $[T]_6$.

2.4.5 Perspectives : Équation de Sinclair et mesures différentielles SAR

Une analyse plus profonde de l'équation de Sinclair (cf. Eq. 1.8) par rapport aux deux techniques InSAR et POLSAR (techniques de mesure différentielles) révèle que :

- La relation entre les ondes émises et reçues s'écrit comme une transformation linéaire à deux composantes :
  1. la première composante est la matrice $[S]$ représentée dans la base de polarisation (H, V), qui caractérise seulement les interactions cible-onde (la phase propre dans l'équation 2.2) ;
  2. la deuxième composante est e^{jk_0r}/r donnant le décalage induit par les effets de propagation de l'onde électromagnétique.
- La technique InSAR utilise les principes des mesures différentielles dans le but d'isoler la composante e^{jk_0r}/r qui donne une information sur le trajet aller-retour de l'onde rétrodiffusée (cf. Eq. 2.3). Cette technique est mise en pratique par l'estimation du coefficient complexe de corrélation croisée normalisée (cf. Eq. 2.5). Dans le cas où le coefficient

C est normalisé, son module caractérise également les différences de trajet de l'onde, au niveau des interactions onde-cible.

– La technique POLSAR utilise les mêmes principes différentiels dans le but d'isoler la composante $[S]$ caractérisant les interactions cible-onde. Cette fois, l'estimation du coefficient complexe de corrélation croisée non-normalisée (cf. Eq. 1.34) suffit, car le trajet aller-retour de l'onde rétrodiffusée se traduit seulement par un déphasage. Ce déphasage est annulé directement (sans normalisation) par le produit hermitien entre deux images qui ont subit les mêmes perturbations du trajet (deux canaux de polarisation différentes) ; la constante $1/r$ introduit seulement l'atténuation de l'onde électromagnétique le long de son trajet.

Afin de renforcer l'exploitation de l'information interférométrique et de préserver la séparabilité des deux phénomènes d'interaction décrits par l'équation de Sinclair, une nouvelle représentation des données POL-InSAR peut être étudiée. Dans cette représentation, l'espace $< [J] >$ de dimension $3 \times 3 \times 3$ est donné par la réunion des trois sous-espaces de dimension 3×3 (cas monostatique) :

$$< [J_{3\times3\times3}] >=< [T_{3\times3}]_M > \oplus < [T_{3\times3}]_S > \oplus < [\Phi_{3\times3}]_{MS} >, \tag{2.21}$$

où $< [T]_M >$ est l'espace défini par les matrices de cohérence polarimétriques maître, $< [T]_M >$ est le sous-espace défini par les matrices de cohérence polarimétriques esclave et $< [\Phi]_{MS} >$ est le sous-espace défini par la matrice de cohérence interférométrique normalisée :

$$[\Phi_{SM}]_{i,j} = \frac{E\{k_{M_i} k_{S_j}^{\dagger}\}}{\sqrt{E\{|k_{M_i}|^2\} E\{|k_{S_j}|^2\}}}. \tag{2.22}$$

pour $i, j \in \{1, 2, 3\}$. L'espace $< [J] >$ ainsi construit contient la même information que l'espace $[T]_6$ définit dans l'équation 2.12 tout en gardant la séparabilité entre la description POLSAR et InSAR.

Comme les acquisitions maître et esclave ont déjà été mises dans la même géométrie grâce au recalage interférométrique, les deux sous-espaces $< [T]_M >$ et $< [T]_S >$ contiennent quasiment la même information polarimétrique (à un déphasage près induit par la base interférométrique). Il est alors possible de réduire la dimension de l'espace $< [J] >$ en utilisant un seul sous-espace POLSAR défini par la moyenne des deux matrices de cohérence polarimétriques $< [T]_{MS} >=< \{([T]_M + [T]_S)/2\} >$:

$$< [J_{3\times3\times2}] >=< [T_{3\times3}]_{MS} > \oplus < [\Phi_{3\times3}]_{MS} > . \tag{2.23}$$

Cette formulation respecte l'indépendance des deux phénomènes InSAR et POLSAR. L'avantage de la représentation proposée dans l'équation 2.23 est essentiel pour les techniques de clustering statistique. La procédure à suivre est :

1. Classification non-supervisée s'appuyant sur la distance de Wishart calculée avec les matrices de cohérences polarimetriques (sous-espace $< [T_{3\times3}]_{MS} >$) : $Class_{POLSAR}$;
2. Classification non-supervisée sur les matrices de cohérence interférométriques normalisées (sous-espace $< [\Phi_{3\times3}]_{MS} >$) : $Class_{InSAR}$;
3. Fusion des deux classification : $Class_{final} = Class_{POLSAR} \cup Class_{InSAR}$.

L'inconvénient de cette approche est la perte de la description statistique unifiée des matrices de cohérence par la loi de Wishart.

2.5 Conclusions

Ce chapitre présente les principes du base de l'interférométrie SAR en deux sections distinctes : l'interférométrie scalaire (InSAR) et l'interférométrie vectorielle (POL-InSAR). Un effort d'unification des deux cas est représenté dans la figure 2.2, mais ceci est encore en cours d'étude par la communauté scientifique. Du fait que la chaîne de traitement POL-InSAR est encore nouvelle (début dans les années 1998), les différentes étapes présentées dans la figure 2.2 ne sont pas généralement acceptées comme une approche globale valable pour toutes les applications géophysiques.

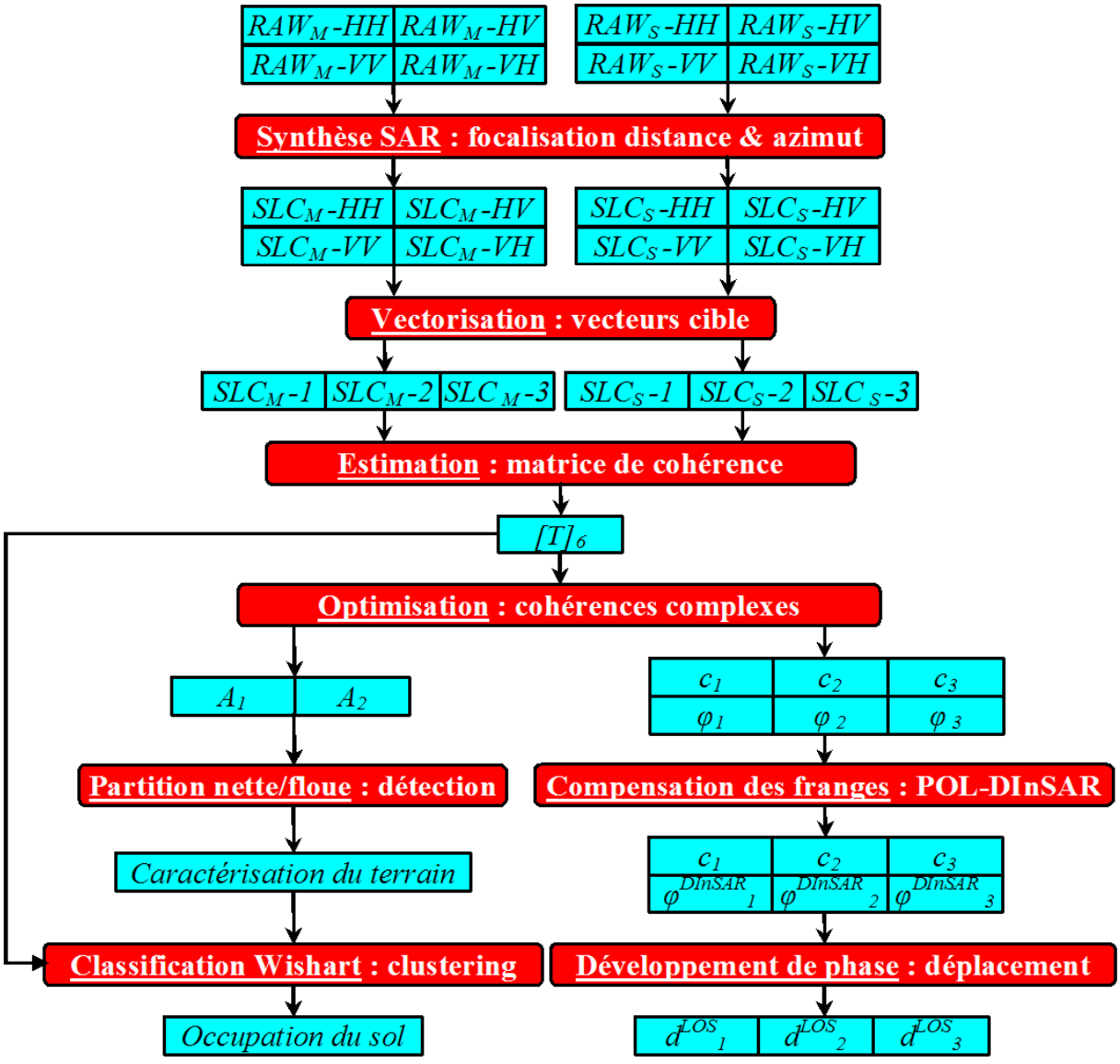


FIG. 2.2 – Diagramme illustrant les principales étapes dans le traitement interférométrique des images SAR multivariées.

Chapitre 3

Méthodes multicomposantes de filtrage de speckle

Sommaire

3.1 Introduction 46
3.1.1 Modélisation statistique du bruit de speckle 46
3.1.2 Filtres SAR multicomposantes 49
3.2 Support spatial 51
3.2.1 Opérateur local à voisinages fixes - BN 52
3.2.2 Opérateur local à voisinages directionnels - DN 52
3.2.3 Opérateurs locaux à voisinages adaptatifs - IDAN 54
3.3 Méthode d'estimation 57
3.3.1 Estimateur multi-vues complexe - ML 58
3.3.2 Estimateur LLMMSE 58
3.3.3 Synthèse voisinage/estimateur 60
3.3.4 Filtrage des données SAR à dimension réduite 61
3.4 Compensation des composantes déterministes du signal InSAR . . 61
3.4.1 Franges interférométriques : Modèle sinusoïdal 2D multi-résolution . . . 62
3.4.2 Estimation Haute Résolution - Fonction d'auto-corrélation 63
3.4.3 Application aux interférogrammes SAR 64
3.5 Résultats et évaluation des performances 66
3.5.1 SAR polarimétrique 66
3.5.2 Estimation des fréquences locales 67
3.5.3 Interférométrie SAR 73
3.5.4 Interférométrie SAR polarimétrique 75
3.6 Conclusions 87

3.1 Introduction

Les acquisitions SAR interférométriques ou polarimétriques, au niveau SLC, peuvent être représentées sous la forme d'une image multivariée à composantes homogènes généralement définie sous la forme :

$$f_{SLC} : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{C}^{m \cdot n}, \tag{3.1}$$

où le domaine résulte de l'échantillonnage en distance/azimut et le codomaine de la dimension du vecteur cible dans le cas POLSAR et du nombre d'acquisitions interférométriques dans le cas InSAR. Dans le cas POL–InSAR monostatique $m = 3$ et $n = 2$.

En utilisant la représentation des données sous la forme de matrices de cohérence polarimétriques interférométriques, l'image multivariée à composantes homogènes devient :

$$f_T^{POL-InSAR} : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{H}(m \cdot n, \mathbb{C}), \quad \mathbb{H}(m \cdot n, \mathbb{C}) \subset M_{m \cdot n}(\mathbb{C}); \tag{3.2}$$

où $\mathbb{H}(m \cdot n, \mathbb{C})$ est l'espace des matrices hermitiennes semi définies positive $(m \cdot n \times m \cdot n)$ et $M_{m \cdot n}(\mathbb{C})$ l'anneau des matrices complexes carrées. Dans cette thèse, nous allons traiter le cas des données multivariées à composantes homogènes dans le contexte de la télédétection SAR.

Un inconvénient des images SAR, par rapport aux images optiques, est qu'elles sont affectées par un phénomène de chatoiement (speckle) qui rend difficile l'utilisation et l'interprétation des images. En général, le speckle est considéré comme un bruit, même si sa nature est déterministe et donc reproductible, celle-ci étant due à la cohérence du signal SAR.

Ce chapitre traite le problème de réduction de speckle dans les images SAR multicomposantes.

3.1.1 Modélisation statistique du bruit de speckle

La présence du speckle dans les images SAR peut être expliquée de la manière suivante. Le signal diffusé par une cellule de résolution représente une intégration des ondes réfléchies par l'ensemble des réflecteurs élémentaires contenus dans cette cellule, comme présenté dans la figure 3.1. Les deux cas limites sont :

- Les réponses des réflecteurs élémentaires sont en phase, ce qui induit une résultante globale très importante et donc une intensité de diffusion très grande.
- Les phases des réflecteurs élémentaires peuvent être en opposition, ce qui implique une intensité SAR très faible.

En pratique la réalité physique est une combinaison de ces deux cas limites, ce qui conduit à des fortes variations d'intensité SAR à l'intérieur des zones homogènes du point de vue géophysique.

Modèle scalaire du bruit multiplicatif de speckle dans les images SAR mono-polarisation

Le bruit du speckle dans les images SAR mono-polarisation a fait l'objet de nombreuses études [Good-63], [Good-76], [Tur-82], [Ulab-90]. Le modèle le plus souvent utilisé [Touz-02] est celui

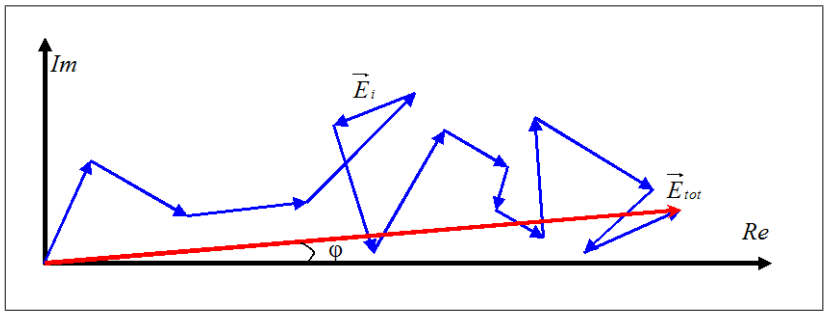


FIG. 3.1 – Formation de speckle : intégration cohérente des réponses des réflecteurs élémentaires.

du speckle "totalement développé" de Goodman [Good-76], où la réponse globale de la cellule de résolution Z est donnée par la somme des réponses des diffuseurs élémentaires. Ainsi, la distribution conjointe des composantes en phase Z_p et en quadrature Z_q de la réponse globale est donnée par :

$$w_{Z_pZ_q}(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}. \tag{3.3}$$

avec Z_p et Z_q deux variables aléatoires centrées, de variance égale $E\{Z_p\} = E\{Z_q\} = \sigma^2$ et décorrélées.

L'image d'intensité fournie par le capteur SAR est obtenue en prenant l'intensité du signal diffusé par la cible $I = Z_p^2 + Z_q^2$. En utilisant l'équation 3.3, l'intensité SAR est caractérisée par une loi de probabilité exponentielle :

$$w_I(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma^2} e^{-\frac{x}{\sigma^2}} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}. \tag{3.4}$$

avec la réflectivité radar idéale $R = 1/\sigma^2$ comme paramètre d'échelle.

Considérons le modèle de dégradation des images affectées par du bruit multiplicatif [Lee-81], [Lee-86], [Lee-94a], [Das-97], [Rang-98] :

$$g(k,l) = f(k,l) \cdot u(k,l), \tag{3.5}$$

u étant un signal aléatoire blanc, indépendant du signal utile f pour le pixel (k,l). En identifiant g à l'intensité I et f à la réflectivité R, on obtient la même distribution de l'image bruitée que celle donnée par l'équation 3.4 avec :

$$w_u(x) = \begin{cases} e^{-x} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}. \tag{3.6}$$

Sous l'hypothèse d'indépendance entre les différentes vues et en utilisant le fait que la distribution de la somme des variable aléatoires indépendantes est donnée par la convolution de leurs lois de probabilité, la distribution de la variable u pour les images d'intensité L-vues suit une loi gamma :

$$w_u(x) = \begin{cases} \frac{L^L x^{L-1}}{\Gamma(L)} e^{-Lx} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}, \tag{3.7}$$

où les moments de premier ordre μ_u et deuxième ordre σ_u sont donnés par :

$$\mu_u = 1 \quad \text{et} \quad \sigma_u = \frac{1}{\sqrt{L}}. \tag{3.8}$$

Dans le cas du bruit de speckle, l'écart type des valeurs des pixels à l'intérieur d'une zone homogène est proportionnel à la valeur de la moyenne [Lee-81]. Ceci implique que le rapport de l'écart type à la moyenne, appelé coefficient de variation C_V, est constant dans les régions homogènes et ne dépend que du nombre de vues :

$$C_V = \frac{\sigma_u}{\mu_u} = \frac{1}{\sqrt{L}}. \tag{3.9}$$

Par la suite, on utilise le coefficient de variation comme une mesure de l'importance du speckle [Touz-02].

Modèle vectoriel du bruit de speckle dans les images SAR multi-polarisation

D'une manière générale, les données SAR multi-polarisation sont décrites par la matrice de cohérence polarimétrique (interférométrique). Celle-ci est construite en calculant l'espérance mathématique du produit hermitien d'un couple d'images SAR (cf. Eqs. 1.34 et 2.12). En pratique, cette matrice $[T]$ est estimée en utilisant un nombre fini d'échantillons L et donc le processus d'estimation présente une erreur due à la présence du speckle. Dans [Lope-03], López-Martínez et Fàbregas ont proposé un modèle du produit hermitien 1-vue des deux images SLC (S_i, S_j) décrit par :

$$S_i S_j^* = \psi|\rho|e^{j\phi_x} + \psi N_c \overline{z}_n (n_m - 1)e^{j\phi_x} + \psi(n_{ar} + jn_{ai}), \tag{3.10}$$

où $i, j \in \{1, 2, ..., m\}$, m est la taille de vecteur cible $\vec{k}$, n_m la composante homogène réelle du bruit multiplicatif, $(n_{ar} + jn_{ai})$ la composante non-homogène complexe du bruit additif et les paramètres ψ, $\overline{z}_n$, N_c et ϕ_x dépendent des valeurs de i et j [Lope-03].

Dans l'équation 3.10, le terme $\psi|\rho|e^{j\phi_x}$ représente le signal utile non affecté par le speckle. Ainsi, le bruit de speckle présente deux composantes :

– n_m la composante homogène réelle du bruit multiplicatif, caractérisée statistiquement par :

$$\mu_{n_m} = 1 \quad \text{et} \quad \sigma^2_{n_m} = 1;$$

– $(n_{ar} + jn_{ai})$ la composante non-homogène complexe du bruit additif avec :

$$\mu_{n_{ar}} = \mu_{n_{ai}} = 1 \quad \text{et} \quad \sigma^2_{n_{ar}} = \sigma^2_{n_{ai}} = \frac{1}{2}(1 - |\rho|^2)^{1,32}.$$

Dans le cas particulier $i = j$ et $\rho = 1e^{j0}$, le modèle décrit par l'équation 3.10 est équivalent au modèle classique du bruit de speckle multiplicatif mono-polarisation donné par l'équation 3.4. Autrement dit, les composantes diagonales de la matrice de cohérence polarimétrique (interférométrique) respectent le modèle du bruit multiplicatif de speckle décrit au paragraphe 3.1.1. Les études récentes de López-Martínez et Pottier [Lope-07] généralisent ce résultat, en montrant que les composantes diagonales de la matrice $[T]$ empirique, estimée par moyennage complexe multivues, correspondent au modèle statistique du bruit de speckle multiplicatif donné par l'équation 3.7 dans le cas des intensités SAR mono-polarisation.

3.1.2 Filtres SAR multicomposantes

Historiquement, le filtrage de speckle dans les images SAR a été traité dans le cadre du filtrage scalaire, chaque image étant traitée indépendamment. Parmi les classes de filtres SAR scalaires, la plus grande est la classe des filtres statistiques. La plupart utilisent comme voisinage une fenêtre rectangulaire dite "boxcar" qui a comme principal défaut de ne pas être adaptative. Pour prendre en compte la non-stationnarité de la scène, les filtres statistiques utilisent deux approches différentes [Touz-02] :

1. La première stratégie est basée sur l'hypothèse de speckle stationnaire. La procédure utilisée consiste à combiner la recherche des voisinages respectant cette hypothèse de stationnarité avec des estimateurs adaptatifs de type LLMMSE (Local Linear Minimum Mean Square Error) [Lee-81], [Fros-82], [Kuan-85].
2. L'autre approche se base sur le modèle non-stationnaire du speckle [Touz-02] et utilise des informations a priori comme la distribution de la moyenne d'intensité pour le filtre Gamma [Lope-93] ou des ddp multi-échelles dans les modèles stochastiques multiplicatifs [Datc-98], [Schr-98].

Plusieurs articles proposent un état de l'art complet sur le filtrage de speckle mono-polarisation [Lope-90], [Lee-94a], [Touz-02].

Les études et les résultats expérimentaux présentés dans [Touz-02] encouragent l'utilisation de la première approche en combinaison avec des techniques multi-résolution pour l'estimation optimale des paramètres. En général, la majorité des techniques développées sont basées sur les tests d'hypothèses et le seuillage pour sélectionner la population statistique la plus homogène possible. Par exemple, l'approche proposée par Wu et Maître sélectionne la région homogène maximale à l'aide d'un test sur l'évolution de l'écart type en fonction de l'augmentation du voisinage d'estimation [Wu-92]. Trois seuils empiriquement choisis sont utilisés pour tester trois classes : cible ponctuelle, contour et région homogène. Cette approche a été améliorée [Nico-01] avec deux modifications : l'écart type a été remplacé par le nombre équivalent des vues L_{eq} (relié au coefficient de variation) et l'estimation de L_{eq} est faite à partir des cumulants de deuxième espèce [Nico-02] pour réduire la variance de l'estimée.

Une autre approche pour tester la stationnarité locale dans des voisinages directionnels de taille décroissante a été proposée par Hagg et Sties [Hagg-94]. En commençant par un grand voisinage (ex. 11×11), 8 sous-voisinages directionnels sont testés suivant le coefficient de variation. Si la valeur du C_V estimée localement est supérieure à la valeur estimée globalement sur toute l'image, la taille du voisinage est divisée par 2. L'estimée globale du coefficient de variation est obtenue en utilisant des voisinages variables pour calculer les histogrammes du coefficient de variation sur toute l'image. Ensuite, le début de l'histogramme (valeurs radiométriques faibles) est ajusté par une distribution χ^2 pour en déduire la valeur de C_V en fonction du nombre de points utilisés pour l'estimer.

Ces deux stratégies de Hagg et al. et Wu et al. ont été combinées dans [Touz-02] où des détecteurs de structures (cibles ponctuelles, contours et régions homogènes) sont appliqués successivement pour tester les non-stationnarités locales dans l'image SAR. La caractéristique com-

mune de toutes ces approches est l'utilisation d'un test d'homogénéité pour la sélection des (sous)voisinages de taille croissante ou décroissante (les pixels ne sont pas testés et agrégés individuellement). Ces tests sont basés sur l'étude du coefficient de variation empirique estimé localement, qui est plus faible que la valeur théorique de C_V.

Les composantes diagonales de la matrice de cohérence $[T]$ suivent les mêmes statistiques que les images SAR d'intensité mono-polarisation. On retrouve dans la littérature du domaine des filtres statistiques SAR multicomposantes les deux grandes classes qui ont été identifiées par Lopes et Touzi dans le cas scalaire :

1. **Modèle stationnaire du speckle**. Cette approche est détaillée dans la suite de ce chapitre.
2. **Modèle non-stationnaire du speckle**. Dans cette catégorie, on peut citer le filtre polarimétrique blanchisseur multi-vues [Lope-97], les approches basées sur des ondelettes discrètes [Lope-05a] ou des chaînes de Markov [Scho-01].

Le même contexte couvre aussi les applications multi-temporelles multi-amplitudes SAR [Brun-97], [Queg-01], [Ciuc-01]. Une évaluation de performance des différents filtres est présentée dans [Trou-03]. Ces approches ont été développées dans le cas où les données SAR à filtrer sont les images d'amplitude.

Dans le cadre général des filtres statistiques SAR multicomposantes basés sur le modèle multiplicatif de speckle, Lee et al. ont introduit les filtres à opérateurs du voisinage pour les applications InSAR [Lee-98], POLSAR [Lee-91], [Lee-04a] et POL-InSAR [Lee-03].

La suite de ce chapitre est dédiée aux opérateurs à voisinage pour le filtrage cohérent du speckle dans les images complexes SAR multi-variées à haute résolution spatiale (HR) et les implications sur l'estimation des différents paramètres InSAR, POLSAR ou POL-InSAR [Vasi-06]. Une nouvelle méthode basée sur des voisinages adaptatifs est proposée pour améliorer la préservation de la stationnarité locale et obtenir un nombre d'échantillons suffisant pour une estimation fiable et non-biaisée des paramètres [Vasi-04], [Vasi-06].

Dans le domaine du filtrage de données InSAR, l'hypothèse de stationnarité locale est souvent violée dans le cas où la phase interférométrique varie dans le voisinage d'estimation. Ces variations locales déterministes correspondent aux trajectoires du porteur (franges orbitales), à l'élévation des cibles (franges topographiques) ou au déplacement des cibles (franges de déplacement). La compensation de la composante déterministe de la phase est en effet une contrainte importante pour pouvoir estimer la cohérence sur des voisinages étendus. Si l'information disponible ne permet pas de "mettre à plat" les motifs de frange, les cohérences empiriques sont biaisées par la non-stationnarité de la phase [Trou-98]. Afin d'être en mesure de compenser ces franges déterministes, nous avons développé un nouvel algorithme d'estimation des fréquences locales [Vasi-06a] pour les interférogrammes haute résolution. L'approche proposée repose sur trois principes : analyse multi-échelle [Davi-99], voisinages adaptatifs multicomposantes [Vasi-06] et estimation robuste non-adaptative basse résolution (boxcar) [Trou-96].

Ainsi, parmi les méthodes de filtrage de speckle évoquées, nous avons travaillé dans trois directions qui permettent de gagner en adaptativité face à la présence de non-stationnarités :

i. la recherche de voisinages homogènes sur lesquels faire porter le filtrage (cf. Sect. 3.2),

ii. l'introduction d'estimateur réalisant une moyenne pondérée entre la valeur du pixel courant et la moyenne de son voisinage en fonction de l'homogénéité de ce dernier (cf. Sect. 3.3),

iii. la compensation des composantes déterministes du signal de phase qui peuvent violer l'hypothèse de stationnarité locale (cf. Sect. 3.4).

Les trois directions ne sont pas exclusives, un estimateur tel que le LLMMSE pouvant être calculé sur un voisinage adaptatif après avoir compensé les variations déterministes locales du signal. La complémentarité entre les choix du voisinage, de l'estimateur utilisé (ML ou LLMMSE) et de la méthode de compensation déterministe est étudiée et illustrée sur des données POLSAR [Vasi-05], InSAR [Vasi-04], [Bous-04], [Trou-05] et POL-InSAR [Vasi-04a], [Vasi-05a].

3.2 Support spatial

Une partie importante des méthodes de filtrage des données SAR multivariées utilise comme support spatial le voisinage non-adaptatif boxcar. Une direction qui prend en compte la stationnarité du signal consiste à rechercher des voisinages adaptés au signal. La recherche de voisinages homogènes pose le problème du choix de l'information utilisée pour la construction du voisinage. L'idéal serait de guider la construction par l'information recherchée (cohérence, phase, paramètres polarimétriques/interférométriques), mais on se heurte à un cercle vicieux car cette information ne peut être extraite de façon fiable qu'après le processus d'estimation. Les images multi-composantes offrent la possibilité d'utiliser une partie de l'information, les composantes les moins bruitées ou les moins biaisées pour déterminer les paramètres les plus difficiles à estimer.

Dans le cas des images interférométriques polarimétriques, le moyennage multi-vues réalisé pour la mise en forme des données a déjà permis de réduire le niveau de speckle des composantes d'intensité (variance réduite d'un facteur proportionnel au nombre d'échantillons indépendants). De plus, dans les zones homogènes, l'intensité est distribuée selon une loi Gamma, relativement simple à manipuler par rapport aux distributions de Wishart complexes suivies par les matrices de cohérence. A défaut de fournir une segmentation équivalente à celle de l'information recherchée, les images d'intensité disponibles sont dans la plupart des cas très liées à cette information :

- ✓ la sensibilité au relief exploitée en radarclinométrie [Paqu-98] crée un lien entre les motifs de franges topographiques et les variations d'intensités. Ce lien est exploité par exemple pour détecter les zones de discontinuité de la phase dues à la topographie [Tupi-96].
- ✓ la cohérence ρ est liée à la corrélation normalisée des intensités γ_I par l'équation :

$$\rho = \begin{cases} \sqrt{2\gamma_I - 1} & \gamma_I \geq 1/2 \\ 0 & \gamma_I < 1/2 \end{cases} \quad \text{avec} \quad \gamma_I = \frac{\sum_{i=1}^{L} |u_1(i)|^2 |u_2(i)|^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^{L} |u_1(i)|^4 \sum_{i=1}^{L} |u_2(i)|^4}} \tag{3.11}$$

  Ce lien est parfois utilisé pour estimer la cohérence interférométrique à partir des données d'amplitude $|u_1|$ $|u_2|$ bien que les moments d'ordre 4 rendent cet estimateur statistiquement peu fiable [Guar-97]. Il est important à souligner que l'équation 3.11 est valable que pour

les processus aléatoires définis par des gaussiennes circulaires complexes.

✓ les trois intensités polarimétriques exprimées dans la base de Pauli permettent pour les cibles non-cohérentes de discriminer différents types d'occupation des sols [Kara-04],

✓ la présence de cible cohérente entraîne une intensité totale fortement supérieure à celle des cibles étendues, un rapport signal sur clutter supérieur à 15dB constituant par exemple un premier test pour rechercher les cibles cohérentes [Touz-02a].

3.2.1 Opérateur local à voisinages fixes - BN

Le voisinage boxcar (BN) est une application directe de la moyenne glissante non-cohérente utilisée pour les images d'amplitude scalaires. BN est un support spatial non-adaptatif où la taille et la forme du voisinage est constante sur toute l'image. Les éléments de la matrice de cohérence $[T]^{BN}$ sont calculés à l'aide de l'estimateur $\beth[...]$ sur une fenêtre glissante rectangulaire de taille $M \times N$:

$$[T]_{k,l}^{BN}(i,j) = \beth\left[\left\{[T]_{k,l}(i+o, j+p) \mid o,p \in \mathbb{Z} \;\&\; \left(|o| < \frac{M}{2}\right) \;\&\; \left(|p| < \frac{N}{2}\right)\right\}\right], \tag{3.12}$$

où $(i,j) \in \mathbb{N}^2$, $k,l \in \mathbb{N}$ avec $k,l \leq n$ cf. Eq. 3.2.

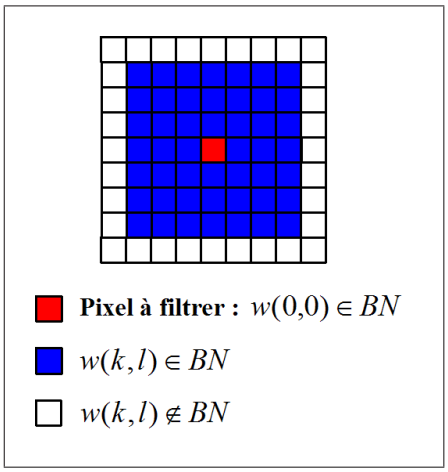


FIG. 3.2 – Le voisinage boxcar 7×7 : BN_7.

Grâce à sa simplicité d'implantation et à sa rapidité, le boxcar est actuellement le voisinage le plus souvent utilisé pour estimer les matrices de cohérence polarimétriques et/ou interférométriques. Par contre, il présente un inconvénient majeur : la stationnarité du signal n'est pas respectée et les structures haute résolution (contours, textures fines et cibles ponctuelles) sont perdues. Ainsi, le boxcar entraîne une perte de résolution qui augmente avec sa taille et donc ses performances en réduction du biais et de la variance de l'estimé sont affectées par la perte de résolution spatiale.

3.2.2 Opérateur local à voisinages directionnels - DN

L'exemple classique de voisinage adaptatif est l'opérateur à voisinages directionnels (DN). Le principe du DN est de diviser le voisinage BN (cf. Fig. 3.2) en sous-ensembles de pixels

heuristiquement définis suivant les directions correspondant aux points cardinaux [Naga-79].

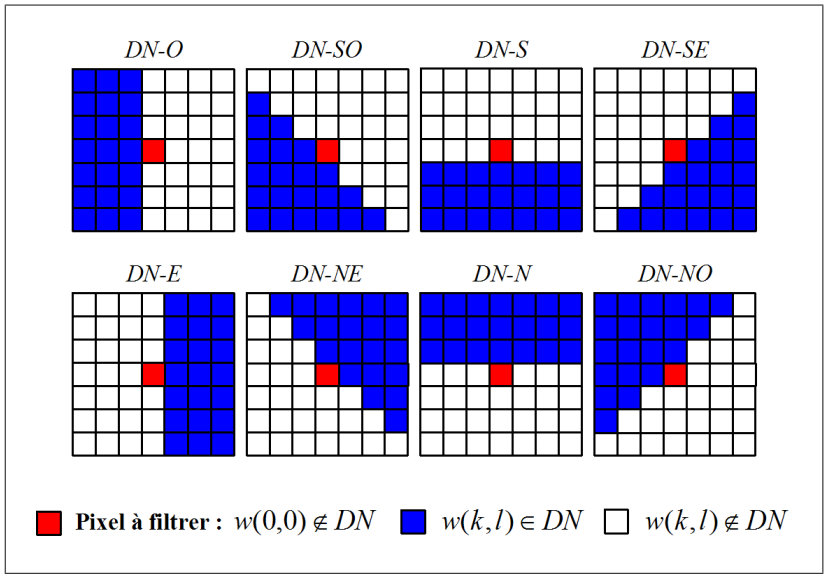


FIG. 3.3 – Les huit sous-voisinages directionnels du boxcar 7×7 : DN_7.

La figure 3.3 présente les huit sous-voisinages du boxcar 7×7 proposés par Lee et al. [Lee-03] pour le filtrage des données SAR polarimétriques interférométriques :

$$DN_7 = \{DN_7^N, DN_7^{NO}, DN_7^{NE}, DN_7^S, DN_7^{SO}, DN_7^{SE}, DN_7^O, DN_7^E\}, \tag{3.13}$$

où $DN_7^d \subset BN_7, \ \forall \ d \in \{N, NO, NE, S, SO, SE, O, E\}$. Parmi l'ensemble DN_7, on choisit le sous-voisinage qui est le plus homogène et seuls les pixels appartenant à ce voisinage contribuent au processus d'estimation.

Le critère proposé dans [Lee-03] pour sélectionner le sous-voisinage le plus homogène s'appuie sur l'image de span (moyenne des intensités des différentes composantes cf. Eq. 1.11) et l'algorithme de détection est décomposé en deux étapes :

1. **Orientation optimale**. Les voisinages directionnels DN_7^d et la valeur du pixel central sont associés à des moyennes locales 3×3 dans le voisinage BN_7 cf. Fig. 3.4 :

$$M_3 = \{m_N, m_{NO}, m_{NE}, m_S, m_{SO}, m_{SE}, m_O, m_E, m_C\}. \tag{3.14}$$

La détection de l'orientation optimale est faite à l'aide des quatre détecteurs calculés avec

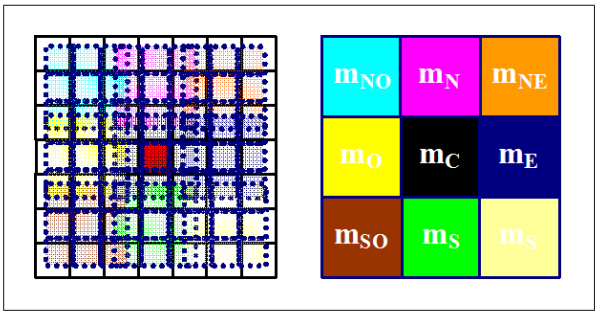


FIG. 3.4 – Les moyennes locales 3×3 calculées sur BN_7.

les éléments de l'imagette M_3 :

$$D_{E,O} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_{N,S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix},$$

$$D_{NE,SO} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{NO,SE} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}. \tag{3.15}$$

Avec une fusion de type maximum, l'orientation finale est donnée en chaque pixel par :

$$ori(i,j) = \max_t \left\{ \sum_{r=1}^{3} \sum_{s=1}^{3} D_t(r,s) Span[i-(r-2), j-(s-2)] \right\}, \tag{3.16}$$

avec $(i,j) \in \mathbb{N}^2$ cf. Eq. 3.2 et $t \in \{(E,O),(N,S),(NE,SO),(NO,SE)\}$.

2. **Voisinage optimal**. Soit

$$ori(i,j) = (ori_1, ori_2) \in \{(E,O),(N,S),(NE,SO),(NO,SE)\}$$

une orientation détectée donnée par l'équation 3.16. Le voisinage homogène optimal est déterminé par :

$$DN_7^d(i,j), \text{ avec } d(i,j) = \{ori_h, \in h = \overline{1,2} \mid \ |m_h - m_C| < |m_{\overline{1,2}-h} - m_C|\}. \tag{3.17}$$

Après avoir déterminé le voisinage directionnel optimal DN_7^d parmi les huit possibles, les éléments de la matrice de cohérence $[T]^{DN}$ sont calculés à l'aide de l'estimateur $\beth[...]$:

$$[T]_{k,l}^{DN}(i,j) = \beth\left[\left\{ [T]_{k,l}(i+o, j+p) \mid o,p \in DN_7^d(i,j) \right\} \right], \tag{3.18}$$

où $(i,j) \in \mathbb{N}^2$, $k,l \in \mathbb{N}$ et $k,l \leq n$ cf. Eq. 3.2.

L'amélioration proposée par les voisinages adaptatifs directionnels est évidente : en détectant la population le plus homogène, l'hypothèse de stationnarité nécessaire dans le processus d'estimation est assurée sur la plupart des cibles étendues. En ce qui concerne les structures haute résolution ponctuelles (ou avec une taille inférieure au voisinage), la stationnarité locale est perdue car la taille des voisinages directionnels est définie sur toute l'image et donc non-adaptative.

3.2.3 Opérateurs locaux à voisinages adaptatifs - IDAN

Le concept du voisinage adaptatif basé sur la croissance de région a été introduit par Gordon et Rangayyan [Gord-84] dans le contexte de l'imagerie médicale :
*En chaque pixel de l'image (**germe**), un voisinage adaptatif (**AN**) de forme et taille variables est déterminé, la seule contrainte imposée étant celle de la connexité. Ce voisinage regroupe les pixels appartenant à la même population statistique que le germe. Ainsi, l'estimé du germe est obtenue en utilisant seulement les pixels appartenant au voisinage AN.*

Dans la littérature du domaine, des filtres à voisinages adaptatifs ont été développées pour les images à niveau de gris [Para-94], [Rang-98], les images couleurs [Ciuc-98], [Ciuc-00] ou les images multi-temporelles multi-amplitudes SAR [Ciuc-01].

Afin de préserver le mieux possible la résolution spatiale tout en gardant la stationnarité locale, nous avons développé un nouvel algorithme qui s'appuie sur l'information d'intensité pour construire les voisinages étendus nécessaires à l'estimation des paramètres In/POL/POL-InSAR [Vasi-04], [Vasi-06]. Le principe de cette approche nommée IDAN (*Intensity Driven Adaptive Neighborhood*) est d'effectue en chaque pixel une croissance de région avec un test d'agrégation qui combine les informations des composantes d'intensité disponibles.

Le moyennage multi-vues complexe réalisé lors de la formation des images multi-composantes SAR permet de disposer en chaque pixel (i,j) de deux (InSAR), trois (POLSAR monostatique) ou six (POL-InSAR) valeurs d'intensités selon les données SAR traitées. Ces intensités SAR correspondent aux éléments diagonaux de la matrice de cohérence polarimétrique interférométrique $[T]_6$. On peut adopter une notation unifiée en écrivant les intensités sous la forme d'une matrice 3×2 dont les lignes correspondent aux composantes polarimétriques et les colonnes aux acquisitions interférométriques :

$$[p](i,j) = \begin{bmatrix} [p]_1(i,j) \\ [p]_2(i,j) \\ [p]_3(i,j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T_M]_{11}(i,j) & [T_S]_{11}(i,j) \\ [T_M]_{22}(i,j) & [T_S]_{22}(i,j) \\ [T_M]_{33}(i,j) & [T_S]_{33}(i,j) \end{bmatrix}. \tag{3.19}$$

Dans le cas de données POL-InSAR, la matrice réelle $[p]$ regroupe les six éléments diagonaux de la matrice de cohérence $[T]_6$ (cf. Eq. 2.12), l'utilisation de la base de Pauli étant préférable car les intensités y sont plus discriminantes vis-à-vis des mécanismes de rétrodiffusion (cf. Tab. 1.1).

La plupart des voisinages adaptatifs utilisés en filtrage de données SAR sont obtenus en testant successivement l'homogénéité de sous-fenêtres ou en détectant la présence de structures sources d'hétérogénéités [Touz-02]. L'originalité de la méthode proposée est d'effectuer une véritable croissance de région par agrégation successive de pixels à l'aide d'un test d'appartenance à la population du pixel traité appelé germe. Le test s'inspire du "filtre σ" de Lee qui a pour principe de ne garder dans la fenêtre de filtrage que les pixels dont la valeur est suffisamment proche de celle du germe en tenant compte des statistiques du bruit [Lee-83]. Les données d'intensité multi-vues étant distribuées dans les zones homogènes selon une loi Gamma qui ne dépend que de la moyenne locale et du nombre de vues équivalent L_{eq}, des seuils d'agrégation ($IDAN_{50}$ et $IDAN_{95}$, correspondant respectivement à 50% et 95% de la population) peuvent être déterminés à partir du coefficient de variation du speckle $\sigma_n/\mu_n = 1/\sqrt{L_{eq}}$. Avec une distribution Gamma, on obtient $IDAN_{50} = \frac{2}{3}\frac{\sigma_n}{\mu_n}$ et $IDAN_{95} = 2\frac{\sigma_n}{\mu_n}$ (cf. Fig. 1.1).

En notant $[p]_k(i,j)$ le vecteur d'intensité de la composante $k = \{1,..m\}$ du germe situé au pixel (i,j) et $[p]_k(o,p)$ celle d'un pixel (o,p), les tests permettant de retenir approximativement 50% et 95% de la population statistique s'écrivent respectivement :

$$\frac{\|[p]_k(o,p) - [p]_k(i,j)\|}{\|[p]_k(i,j)\|} \leq IDAN_{50} \quad \text{et} \quad \frac{\|[p]_k(o,p) - [p]_k(i,j)\|}{\|[p]_k(i,j)\|} \leq IDAN_{95}, \tag{3.20}$$

avec $\|...\|$ la norme euclidienne. La construction des voisinages IDAN s'effectue en deux étapes :

✓ Étape I :

1. estimation de la valeur du germe $\widehat{[p]}(i,j)$ par un filtre médian marginal 3×3. Par rapport

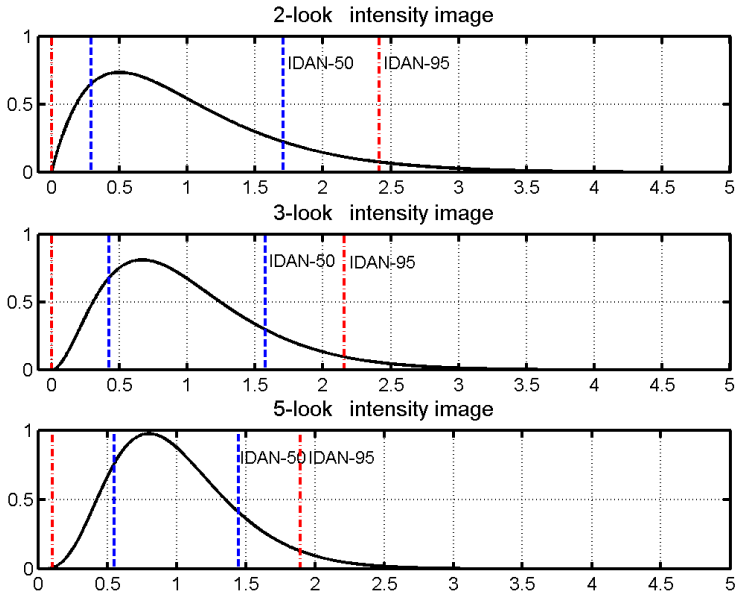


FIG. 3.5 – Distributions Gamma dans des images SAR d'intensité pour $\mu = 1$ et $L = 2, 3, 5$. Les seuils d'agrégation $IDAN_{50}$ et $IDAN_{95}$ correspondent respectivement à 50% et 95% de la population statistique.

à la moyenne arithmétique, le médian présente l'intérêt d'avoir une réponse impulsionnelle nulle et de préserver les contours [Asto-90].

2. agrégation progressive de pixels connexes (o, p) satisfaisant le critère strict (distance inférieure au seuil correspondant à 50%) :

$$\sum_{k=1}^{3} \frac{\|[p]_k(o,p) - \widehat{[p]_k}(i,j)\|}{\|\widehat{[p]_k}(i,j)\|} \leq 2\frac{\sigma_n}{\mu_n}. \tag{3.21}$$

La croissance s'arrête lorsque plus aucun pixel connexe ne satisfait le test d'agrégation ou lorsqu'un nombre N_{max} de pixels est atteint. Les pixels testés et non-retenus sont stockés dans une liste $\mathcal{L}(i, j)$ (pixels-fond).

✓ Étape II :

1. estimation ML de la valeur du germe $\overline{[p]}(i, j)$ à partir du voisinage issu de la première étape,

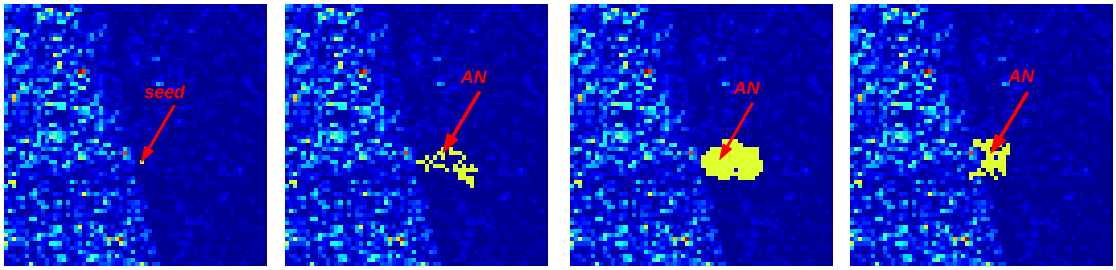
2. agrégation des pixels (o, p) appartenant à la liste $\mathcal{L}(i, j)$ qui satisfont le critère élargi (distance inférieure au seuil correspondant à 95%) :

$$\sum_{k=1}^{3} \frac{\|[p]_k(o,p) - \overline{[p]_k}(i,j)\|}{\|\overline{[p]_k}(i,j)\|} \leq 6\frac{\sigma_n}{\mu_n}. \tag{3.22}$$

L'avantage d'une croissance de région en deux étapes est illustré dans la figure 3.6. Le seuil restrictif de la première étape est nécessaire car, au démarrage, on ne dispose que d'une estimation approximative de la valeur du germe obtenue sur une fenêtre élémentaire 3×3 par le filtre

médian marginal. Le choix du seuil $IDAN_{50}$ est justifié d'une part par le fait qu'il est assez faible pour réduire fortement la probabilité que le voisinage AN déborde sur d'autres zones, et d'autre part qu'il est assez important pour permettre au voisinage AN de s'étendre. Ainsi, le risque que le processus prenne fin avant d'agréger un nombre de pixels significatif pour la population est fiable. Évidement, un nombre important de pixels appartenant à la même population statistique que le germe ne sont pas agrégés. Ceci reste acceptable, car les objectifs de cette étape sont :

- élargir la fenêtre d'estimation du germe tout en préservant la stationnarité locale,
- déterminer l'enveloppe convexe du voisinage AN par la liste de pixels-fond.



(a) germe (b) étape 1, seuil 50% (c) étape 2, seuil 95% (d) étape 1, seuil 95%

FIG. 3.6 – Croissance de région (zoom 64×64 pixels) : (a) intensité initiale 2–vues ;
(b)-(c) : résultat de l'algorithme IDAN en 2 étapes ;
(d) : résultat que l'on obtiendrait en une seule étape avec un seuil d'agrégation à 95%.

La seconde étape permet d'obtenir des voisinages adaptatifs compacts et connexes. Grâce à une estimation plus précise de la valeur du germe et au fait qu'on inspecte seulement des pixels appartenant à l'enveloppe convexe du voisinage, nous pouvons utiliser un critère d'uniformité moins restrictif, le risque de franchissement de contour étant a priori écarté.

Le voisinage adaptatif IDAN peut alors être utilisé pour estimer la corrélation complexe. La matrice de cohérence $[T]^{IDAN}$ est calculée à l'aide de l'estimateur $\beth[...]$:

$$[T]^{IDAN}_{k,l}(i,j) = \beth\left[\{[T]_{k,l}(i+o, j+p) \mid o,p \in IDAN(i,j)\}\right], \tag{3.23}$$

avec $(i,j) \in \mathbb{N}^2$, $k,l \in \mathbb{N}$ et $k,l \leq n$ cf. Eq. 3.2.

En conclusion, l'algorithme IDAN fusionne les principes de traitement des images vectorielles avec le modèle du bruit multiplicatif pour déterminer un voisinage adaptatif en utilisant l'information d'intensité SAR. Les voisinages adaptatifs ainsi obtenus fournissent une alternative fiable aux voisinages directionnels, avec de meilleures performances en termes de nombre d'échantillons (taille variable) et de préservation de la stationnarité locale (forme souple adaptée au signal).

3.3 Méthode d'estimation

Le filtrage du speckle rentre dans le contexte de la théorie de l'estimation [Touz-02]. L'objectif est d'estimer la valeur de la matrice de cohérence à partir des observations SAR affectées par le bruit de speckle. La matrice de cohérence $[T]^{\mathcal{W}}$ est calculée à l'aide de l'estimateur $\beth[...]$:

$$[T]^{\mathcal{W}}_{k,l}(i,j) = \beth\left[A^{\mathcal{W}}_{[T]_{k,l}(i,j)}\right] \quad \text{avec} \quad A^{\mathcal{W}}_{[T]_{k,l}(i,j)} = \{[T]_{k,l}(i+o, j+p) \mid o,p \in \mathcal{W}(i,j)\}, \tag{3.24}$$

où $(i,j) \in \mathbb{N}^2$, $k,l \in \mathbb{N}$, $k,l \leq n$ cf. Eq. 3.2 et $\mathcal{W} \in \{BN, DN, IDAN\}$. Cette section présente les deux estimateurs les plus couramment utilisés dans le processus d'estimation des matrices de cohérence : la moyenne multi-vues complexe (ML) et l'estimateur local linéaire à erreur quadratique moyenne minimale (LLMMSE).

3.3.1 Estimateur multi-vues complexe - ML

En chaque pixel, la valeur d'un élément diagonal de la matrice de cohérence affectée par le bruit de speckle est décrit par une variable aléatoire avec (cf. Sect. 3.1.1) :

– une moyenne théorique correspondant à sa valeur en l'absence du bruit,

– une variance importante proportionnelle à la moyenne, induite par le bruit de speckle.

L'objectif du filtrage est de réduire cette variance dans le but d'améliorer l'estimation de la valeur moyenne.

Il est alors possible d'introduire la moyenne empirique multi-vues complexe qui est l'estimateur optimal au sens du maximum de vraisemblance $\beth_{ML}$ pour les éléments diagonaux de la matrice de cohérence :

$$\widehat{[T]}_{k,l}^{\mathcal{W}}(i,j) = \beth_{ML}\left[A_{[T]_{k,l}(i,j)}^{\mathcal{W}}\right] = \frac{1}{card\left(A_{[T]_{k,l}(i,j)}^{\mathcal{W}}\right)} \sum_{T_u \in A_{[T]_{k,l}(i,j)}} T_u, \tag{3.25}$$

L'estimateur $\beth_{ML}$, n'étant pas un estimateur adaptatif, il se base sur les hypothèses de stationnarité et d'ergodicité locales.

Dans [Lee-99], Jong-Sen Lee a énoncé les principes de base pour le filtrage du speckle des matrices de cohérence :

1. Le filtrage statistique doit être effectué indépendamment pour chaque élément de la matrice de cohérence. Les algorithmes de filtrage qui exploitent le degré d'indépendance statistique entre les différents éléments de la matrice de cohérence sont susceptibles d'introduire des interférences.
2. Pour préserver les propriétés polarimétriques il est nécessaire d'utiliser des estimateurs basés sur le principe du multi-vues complexe. De plus, le filtrage doit être effectué avec le même estimateur pour assurer une réduction homogène du speckle.
3. Les échantillons utilisés dans le processus d'estimation doivent appartenir à la même population statistique. Ceci est nécessaire pour assurer les hypothèses de stationnarité et d'ergodicité locales et donc la préservation de la résolution spatiale.

Suivant ces principes, l'estimateur ML, optimal au sens de la vraisemblance pour les éléments diagonaux, est généralisé sur tous les éléments de la matrice de cohérence (cf. Eq. 3.25).

3.3.2 Estimateur LLMMSE

Auteur de plusieurs filtres très connus dédiés au filtrage de speckle pour différents types de données SAR [Lee-81], [Lee-83], [Lee-86], Jong-Sen Lee a étendu le principe de l'estimation

LLMMSE aux matrices de cohérence [Lee-03]. La matrice de cohérence filtrée $\widetilde{[T]}^{\mathcal{W}}$ est alors donnée par une combinaison linéaire entre la valeur initiale au pixel traité $[T]$ et la moyenne multi-vues complexe sur un voisinage $\mathcal{W}$:

$$\widetilde{[T]}^{\mathcal{W}}_{k,l}(i,j) = \beth_{LLMMSE}\left[A^{\mathcal{W}}_{[T]_{k,l}(i,j)}\right] = a(i,j)\cdot\widehat{[T]}^{\mathcal{W}}_{k,l}(i,j) + b(i,j)\cdot[T]_{k,l}(i,j), \tag{3.26}$$

avec a et b deux coefficients adaptatifs qui sont calculés pour chaque pixel de l'image (i,j).

Pour les mêmes raisons que celles énoncées au paragraphe 3.2, les valeurs des paramètres a et b sont déterminées sur l'image de span S (cf. Eq. 1.11), en utilisant le modèle multiplicatif du speckle :

$$S_o = S_t \cdot n, \tag{3.27}$$

où S_o est la valeur observée dans l'image de span à filtrer, S_t la valeur idéale non-bruitée et n le bruit du speckle de moyenne $\overline{n} = 1$ et variance σ_n^2. L'estimateur LLMMSE appliqué à l'image du span s'écrit sous la forme :

$$\widetilde{S} = a\overline{S_t} + bS_o, \tag{3.28}$$

la moyenne a priori étant remplacée, en pratique, par la moyenne locale $\overline{S_o} = E\{S_o\} = \overline{S_t}$.

Le critère utilisé dans la méthode d'optimisation est la minimisation de l'erreur quadratique moyenne (MSE) :

$$J = E\{(\widetilde{S} - S_t)^2\}. \tag{3.29}$$

En combinant les équations 3.26 et 3.29, les valeurs optimales des paramètres a et b doivent satisfaire :

$$\frac{\partial J}{\partial a} = E\{\overline{S_t}(a\cdot\overline{S_t} + b\cdot S_o - S_t)\} = 0, \tag{3.30}$$

$$\frac{\partial J}{\partial b} = E\{S_o(a\cdot\overline{S_t} + b\cdot S_o - S_t)\} = 0. \tag{3.31}$$

La conséquence directe de l'équation 3.30 est :

$$a = 1 - b. \tag{3.32}$$

En remplaçant la valeur du coefficient a dans l'équation 3.31 on obtient :

$$E\{S_o(S_t - \overline{S_t}) + b(\overline{S_t} - S_o)S_o\} = 0. \tag{3.33}$$

Sous l'hypothèse d'indépendance statistique entre les variables aléatoires S_t et n et en utilisant la relation $E\{\overline{S_t}(S_t - \overline{S_t})\} = \overline{S_t}E\{(S_t - \overline{S_t})\} = 0$, il en résulte :

$$\begin{aligned} E\{S_o(S_t - \overline{S_t})\} &= E\{S_t n(S_t - \overline{S_t})\} = E\{S_t(S_t - \overline{S_t})\} \\ &= E\{S_t(S_t - \overline{S_t}) - \overline{S_t}(S_t - \overline{S_t})\} = E\{(S_t - \overline{S_t})^2\}. \end{aligned} \tag{3.34}$$

Avec $\overline{S_o} = E\{S_o\} = \overline{S_t}$, le deuxième terme dans l'équation 3.33 devient :

$$\begin{aligned} E\{b(\overline{S_t} - S_o)S_o\} = b\cdot E\{(\overline{S_o} - S_o)S_o\} &= b\cdot E\{S_o(\overline{S_o} - S_o) - \overline{S_o}(\overline{S_o} - S_o)\} \\ &= -b\cdot E\{(S_o - \overline{S_t})^2\}. \end{aligned} \tag{3.35}$$

La valeur du coefficient b est obtenue en remplaçant les équations 3.34 et 3.35 dans l'équation 3.33 :

$$b = \frac{E\{(S_t - \overline{S_t})^2\}}{E\{(S_o - \overline{S_t})^2\}} = \frac{\sigma^2_{S_t}}{\sigma^2_{S_o}}. \tag{3.36}$$

En utilisant l'approximation linéaire autour de $\overline{S_t}$ il en résulte [Lee-80] :

$$S_o \approx \overline{n} S_t + \overline{S_t}(n - \overline{n}), \tag{3.37}$$

et donc

$$\sigma^2_{S_o} \approx \overline{n}^2 \sigma^2_{S_t} + \overline{S_t}^2 \sigma^2_n. \tag{3.38}$$

Dans le cas multiplicatif (cf. Eq. 3.27) on obtient :

$$\sigma^2_{S_t} = \overline{S_t^2} - \overline{S_t}^2 = \frac{\overline{S_o^2}}{\overline{n^2}} - \overline{S_t}^2 = \frac{\sigma^2_{S_o} + \overline{S_o}^2}{\sigma^2_n + \overline{n}^2} - \overline{S_t}^2 = \frac{\sigma^2_{S_o} - \overline{S_o}^2 \sigma^2_n}{1 + \sigma^2_n}. \tag{3.39}$$

En pratique, dans le cas où la valeur estimée localement σ_{S_t} est négative (nombre insuffisant d'échantillons) elle doit être mise à zéro. Il est alors possible d'estimer en chaque pixel de l'image la valeur du paramètre b :

$$b = \frac{\sigma^2_{S_o} - \overline{S_o}^2 \sigma^2_n}{\sigma^2_{S_o}(1 + \sigma^2_n)}, \tag{3.40}$$

la valeur de σ^2_n étant a priori connue (cf. Eq. 3.8).

En conclusion, l'équation d'estimation de la matrice de cohérence filtrée (cf. Eq. 3.26) devient :

$$\widetilde{[T]}^{\mathcal{W}}_{k,l}(i,j) = \beth_{LLMMSE}\left[A^{\mathcal{W}}_{[T]_{k,l}(i,j)}\right] = \widehat{[T]}^{\mathcal{W}}_{k,l}(i,j) + b(i,j) \cdot ([T]_{k,l}(i,j) - \widehat{[T]}^{\mathcal{W}}_{k,l}(i,j)). \tag{3.41}$$

Le coefficient adaptatif b joue le rôle de pondération entre la moyenne multi-vues complexe estimée localement et la valeur originale du pixel :

– Régions homogènes : $\sigma^2_{S_t} \approx 0 \Longrightarrow b(i,j) \approx 0$ et le moyennage multi-vues complexe domine

$$\widetilde{[T]}^{\mathcal{W}}_{k,l}(i,j) = \widehat{[T]}^{\mathcal{W}}_{k,l}(i,j).$$

– Régions hétérogènes : $\sigma^2_{S_t} > 0 \Longrightarrow b(i,j) \approx 1$ et la valeur du pixel n'est pas filtrée

$$\widetilde{[T]}^{\mathcal{W}}_{k,l}(i,j) = [T]_{k,l}(i,j).$$

3.3.3 Synthèse voisinage/estimateur

En combinant les trois types de voisinage, BN, DN et IDAN, et les deux estimateurs, ML et LLMMSE, on peut former six filtres SAR multicomposantes dont les principales caractéristiques sont regroupées dans le tableau 3.1.

TAB. 3.1 – Caractéristiques des filtres résultant du couplage Voisinage / Estimateur.

Estimateur / Voisinage	**BN**	**DN**	**IDAN**
ML	- taille fixe - forme fixe - L connu	- taille fixe - forme adaptée - L connu	- taille variable - forme adaptée - L connu
LLMMSE	- taille fixe - forme fixe - L inconnu	- taille fixe - forme adaptée - L inconnu	- taille variable - forme adaptée - L inconnu

3.3.4 Filtrage des données SAR à dimension réduite

Le formalisme utilisé dans ce chapitre est celui des matrices de cohérence polarimétriques interférométriques $[T]_6$ définies dans les équations 3.26 et 3.2. Les cas à dimensions réduites POLSAR et InSAR sont traités de la même manière en utilisent la matrice de cohérence polarimétrique $[T_3]$ (cf. Eq. 1.34) et la matrice de cohérence interférométrique $[T_2]$ définie par :

$$[T_2] = E\left\{ \begin{bmatrix} Z_M \\ Z_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_M^\dagger & Z_S^\dagger \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} I_M & \Omega_{MS} \\ \Omega_{MS}^\dagger & I_S \end{bmatrix}, \tag{3.42}$$

avec Z_M et Z_S les images SLC maître et esclave, I_M et I_S les intensités SAR maître et esclave et Ω_{MS} la corrélation complexe non-normalisée. Ainsi les images multivariées à composantes homogènes correspondantes s'écrivent :

$$f_T^{POLSAR} : \mathbb{N}^2 \to \mathbb{H}(m,\mathbb{C}), \quad \mathbb{H}(m,\mathbb{C}) \subset M_m(\mathbb{C}); \tag{3.43}$$

$$f_T^{InSAR} : \mathbb{N}^2 \to \mathbb{H}(n,\mathbb{C}), \quad \mathbb{H}(n,\mathbb{C}) \subset M_n(\mathbb{C}). \tag{3.44}$$

Par exemple, les matrices utilisées pour guider la croissance de région (cf. Eq. 3.19) dans les cas à dimensions réduites POLSAR monostatique et InSAR devient :

$$[p]^{POLSAR}(i,j) = \begin{bmatrix} [p]^{POLSAR}{}_1(i,j) \\ [p]^{POLSAR}{}_2(i,j) \\ [p]^{POLSAR}{}_3(i,j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T_3]_{11}(i,j) \\ [T_3]_{22}(i,j) \\ [T_3]_{33}(i,j) \end{bmatrix}, \tag{3.45}$$

$$\text{et} \quad [p]^{InSAR}(i,j) = \begin{bmatrix} I_M(i,j) & I_S(i,j) \end{bmatrix}. \tag{3.46}$$

3.4 Compensation des composantes déterministes du signal InSAR

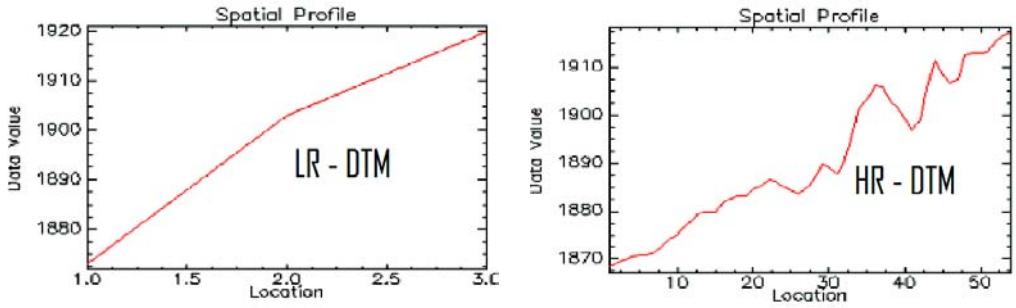
La compensation des composantes déterministes de la phase interférométrique est en effet une contrainte importante pour pouvoir estimer la cohérence InSAR sur des voisinages étendus. Si l'information disponible ne permet pas de "mettre à plat" les motifs de frange, les cohérences empiriques sont biaisées par la non-stationnarité de la phase.

Dans le contexte général InSAR, l'estimation robuste du gradient de la phase interférométrique devient nécessaire notamment avec l'amélioration de la résolution spatiale des systèmes SAR : des cellules de résolution au sol de plus en plus réduites rendent accessibles les variations locales du relief (micro-relief) et des bases perpendiculaires InSAR importantes (altitude d'ambiguïté réduite) transforment ces variations en motifs de franges d'interférence très serrés. Ces franges sont difficilement détectables avec des méthodes non-adaptatives. Les approches existantes dans la littérature du domaine fournissent des résultats fiables avec les données SAR avec une résolution décamètrique [Trou-96], [Davi-99]. Si elles sont estimées correctement, les fréquences locales peuvent être utilisées à différents niveaux dans le traitement InSAR : filtrage de phase interférométrique [Lee-98], développement de phase [Ghig-94], [Spag-95], [Trou-98] et compensation des composantes déterministes dans l'estimation de la corrélation complexe InSAR [Zebk-05].

Afin d'être en mesure de compenser ces franges déterministes, nous avons développé un nouvel algorithme d'estimation des fréquences locales [Vasi-06a] pour les interférogrammes haute résolution. L'approche proposée est basée sur la combinaison des trois principes : analyse multi-échelle [Davi-99], voisinages adaptatifs multicomposantes [Vasi-06] et estimation robuste non-adaptative basse résolution (boxcar) [Trou-96]. Cette méthode est issue du besoin d'estimer proprement la cohérence et la phase InSAR dans le milieu glacier alpin avec des données SAR haute résolution.

3.4.1 Franges interférométriques : Modèle sinusoïdal 2D multi-résolution

Les données basse résolution actuellement disponibles permettaient jusqu'ici de considérer le relief local comme une surface localement plane. Avec des cellules de résolution de l'ordre de quelques mètres carrés, la résolution aéroportée ou la haute résolution satellitaire vont être confrontées à la présence de micro-relief qui peut modifier les pentes et les orientations à des échelles comprises typiquement entre 10 et 100 mètres (cf. Fig. 3.7).



(a) (b)

FIG. 3.7 – Profile en long du glacier Mer-de-glace : (a) DTED-1 MNT basse résolution ($Res = 80m$), (b) MNT haute résolution ($Res = 2m$).

Dans le modèle proposé [Vasi-06a], pour chaque pixel de l'interférogramme, le signal 2D de phase ϕ présente deux composantes déterministes :

– la phase basse résolution ϕ_{LR} : cette composante correspond au motif de franges moyen.

– la phase haute résolution ϕ_{HR} : la différence calculée localement entre le signal de phase observé et la phase basse résolution. D'une manière générale, l'apparition de ϕ_{HR} est fortement liée aux structures haute résolution.

En additionnant ces deux composantes déterministes et le bruit de phase ϕ_n, le modèle proposé peut être écrit sous une forme analytique :

$$e^{j\phi} = e^{j\phi^{LR}} e^{j\phi^{HR}} e^{j\phi_n}. \tag{3.47}$$

En général, les deux composantes LR et HR de la phase ne correspondent pas à une partition du domaine spectral en hautes et basses fréquences. Par exemple, dans le cas particulier des franges topographiques sur un glacier alpin, la phase LR est induite par la pente moyenne (cf. Fig. 3.7-(a)). En revanche, la phase HR correspond aux variations locales autour de cette pente moyenne générées par le micro-relief glaciaire (cf. Fig. 3.7-(b)).

La première étape de l'algorithme est l'estimation et la compensation de la phase LR. La méthode utilisée pour estimer les fréquences locales LR (VCM - Vector Covariance Matrix) repose sur la structure bloc de la matrice de covariance d'un vecteur formé en concaténant les lignes d'une fenêtre signal [Trou-96]. Les résultats obtenus permettent une estimation robuste de la phase LR avec une utilisation directe pour le développement de phase [Trou-98]. En revanche, l'algorithme VCM nécessite des fenêtres pleines (carrées ou rectangulaires), de taille importante (typiquement 9×9) et ne peut pas faire porter l'estimation fréquentielle uniquement sur des pixels appartenant à un voisinage adaptatif de forme quelconque.

3.4.2 Estimation Haute Résolution - Fonction d'auto-corrélation

Par la suite, nous avons cherché à rendre l'estimation fréquentielle adaptative, notamment en vue du filtrage d'interférogrammes topographiques des futures données haute résolution. La radiométrie étant fortement conditionnée par les orientations, l'approche IDAN décrite au paragraphe 3.2.3 devrait permettre de sélectionner des voisinages appartenant aux mêmes types de rétrodiffusion et d'orientation.

Afin d'être en mesure de compenser les franges sur des voisinages adaptatifs, nous avons développé un nouvel algorithme d'estimation des fréquences locales [Vasi-06a]. L'idée principale est d'estimer la fonction d'auto-corrélation 2D du signal complexe à partir des paires de pixels disponibles dans un voisinage quelconque et de déduire de sa phase les fréquences recherchées. En utilisant une notation 2D, le signal de phase interférométrique est modélisé, dans une approximation au premier ordre, sous la forme d'une sinusoïde 2D complexe avec les fréquences (f_x, f_y) :

$$s(o,p) = e^{\jmath\phi(o,p)} = e^{\jmath[2\pi(of_x+pf_y)+\phi_n]}, \tag{3.48}$$

où ϕ_n est le bruit de phase.

En supposant le signal s stationnaire et la phase ϕ affectée par un bruit blanc, additif, indépendant et identiquement distribué, on montre que la fonction d'auto-corrélation $\gamma_s(r,a)$ vérifie :

$$\gamma_s(r,a) = E\{s(o,p)\cdot s(o-r,p-a)^*\} = K\, e^{j\,2\pi\,(rf_x+af_y)} \tag{3.49}$$

où $K = \left|E\{e^{j\,\phi_n(0)}\}\right|^2$ est un coefficient réel qui dépend de la distribution du bruit mais n'affecte pas la phase de l'auto-corrélation.

Sous l'hypothèse d'ergodicité, $\gamma_s(r,a)$ est estimé pour tous les décalages (r,a) présents au sein du voisinage. La fiabilité de $\gamma_s(r,a)$ augmente avec le nombre $N_{r,a}$ de paires de pixels décalés de (r,a) dont on dispose dans le voisinage. Les fréquences locales peuvent alors être estimées à partir de valeurs consécutives en ligne ou en colonne de la fonction d'auto-corrélation. En pondérant les estimés de l'auto-corrélation par $N_{r,a}$ de manière à donner plus de poids aux valeurs les plus fiables, on obtient :

$$\widehat{f_x} = \frac{1}{2\pi}\arg\left(\sum_{(r,a)} N_{r,a}N_{r+1,a}\gamma_s(r+1,a)\gamma_s(r,a)^*\right), \tag{3.50}$$

$$\widehat{f_y} = \frac{1}{2\pi}\arg\left(\sum_{(r,a)} N_{r,a}N_{r,a+1}\gamma_s(r,a+1)\gamma_s(r,a)^*\right) \tag{3.51}$$

De plus, pour chaque composante des fréquences locales estimées $\widehat{f_x}$ et $\widehat{f_y}$ il est possible de construire une mesure de confiance $\mathcal{C}_{f_x}$ (resp. $\mathcal{C}_{f_y}$) donnée par le rapport entre le module de la somme complexe et la somme des modules :

$$\mathcal{C}_{f_x} = \frac{\left|\sum_{(r,a)} N_{r,a}N_{r+1,a}\cdot\gamma_s(r+1,a)\gamma_s(r,a)^*\right|}{\sum_{(r,a)} N_{r,a}N_{r+1,a}\cdot\left|\gamma_s(r+1,a)\gamma_s(r,a)^*\right|} \tag{3.52}$$

Dans l'équation 3.52, quand les différents produits $\gamma_s(r+1,a)\gamma_s(r,a)^*$ ont le même argument, la confiance est égale à 1 et le motif local de franges correspond au modèle d'une sinusoïde 2D complexe. En revanche, la confiance devient faible quand les produits $\gamma_s(r+1,a)\gamma_s(r,a)^*$ ont des arguments différents et donc le motif local de franges ne correspond plus au modèle. Les deux confiances ainsi obtenues sont agrégées par l'opérateur minimum pour dériver une mesure de confiance globale $\mathcal{C}_f$:

$$\mathcal{C}_f = \min(\mathcal{C}_{f_x}, \mathcal{C}_{f_y}). \tag{3.53}$$

3.4.3 Application aux interférogrammes SAR

Le diagramme de l'approche proposée pour estimer les fréquences locales est illustré dans la figure 3.8 :

1. Les fréquences locales basse résolution (f_x^{LR}, f_y^{LR}) sont estimées en utilisant l'algorithme VCM sur des voisinages de grande taille, typiquement 11×11. Ensuite, en chaque pixel (i,j) de l'interférogramme SAR, le motif de franges moyen est compensé pour les pixels voisins (o,p) en calculant la composante haute résolution de la phase ϕ_{HR} :

$$\phi_{HR}(o,p) = \phi(o,p) - 2\pi[(o-i)f_x^{LR} + (p-j)f_y^{LR}]. \tag{3.54}$$

   L'image de phase ainsi obtenue révèle la différence entre le modèle de la sinusoïde 2D complexe LR et le motif de franges réel observé.

2. Les fréquences locales haute résolution (f_x^{HR}, f_y^{HR}) de la phase HR sont estimées à partir de la fonction d'auto-corrélation 2D (Eqs. 3.50 et 3.51) sur un voisinage IDAN.

3. Les fréquences locales totales sont données par la somme des deux composantes LR et HR $(f_x, f_y) = (f_x^{LR} + f_x^{HR}, f_y^{LR} + f_y^{HR})$.

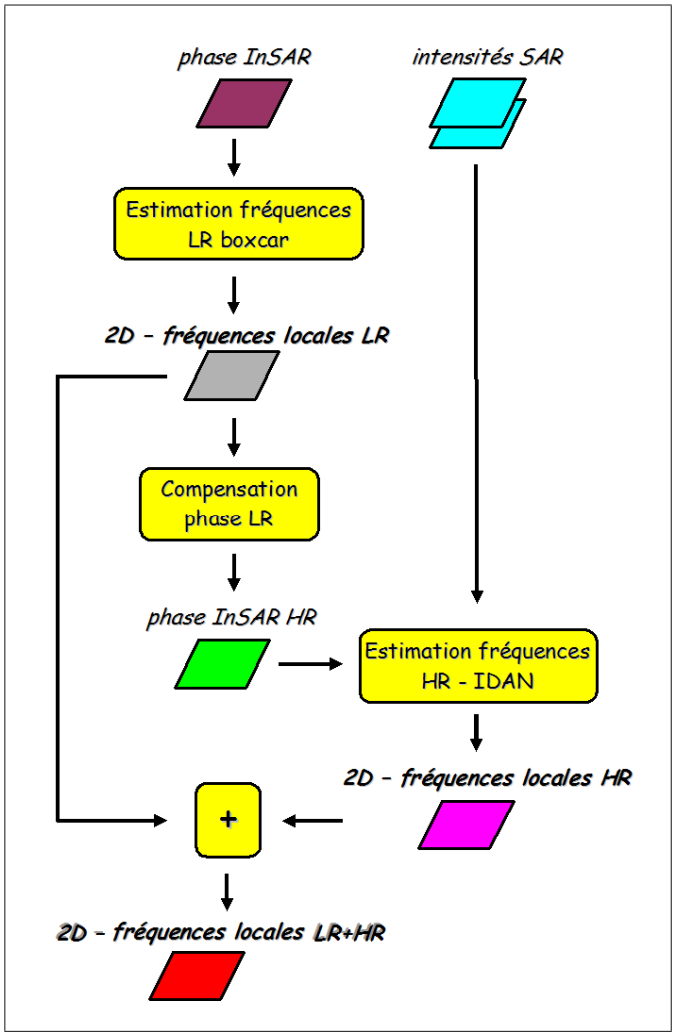


FIG. 3.8 – Diagramme illustrant les principales étapes dans le processus d'estimation des fréquences locales.

Suivant le critère de Nyquist-Shannon, une variation locale du signal de phase est bornée par $\Delta\phi \in [-\pi, \pi]$, ce qui donne une fréquence locale f appartenant à l'intervalle $[-0.5, 0.5]$. La méthode à deux échelles LR+HR estime premièrement une fréquence 2D (f_x^{LR}, f_y^{LR}) dans l'intervalle $[-0.5, 0.5] \times [-0.5, 0.5]$, et, après mise à plat (démodulation par cette première fréquence 2D), la fréquence $(f_x^{HR}, f_y^{HR}) \in [-0.5, 0.5] \times [-0.5, 0.5]$. En conséquence, dans le cas où l'aliasing est très localisé et correspond à des fréquences comprises en valeur absolue entre 0.5 et 1, le modèle HR+LR proposé est susceptible de les estimer correctement. Ainsi, le domaine des fréquences LR+HR exploré est $[-1, 1] \times [-1, 1]$. En terme de phase, il est alors possible de retrouver le gradient de la phase dans des régions en aliasing bornées par $\Delta\phi \in [-2\pi, 2\pi]$.

3.5 Résultats et évaluation des performances

Les résultats illustrés par la suite ont été obtenus sur trois jeux de données : POLSAR Convair–580 fournies par le CSA (Agence Spatiale Canadienne), InSAR RAMSES fournies par l'ONERA (Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales) et POL-InSAR E-SAR fournies par le DLR (Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt).

3.5.1 SAR polarimétrique

Les performances des différents types de voisinage en combinaison avec les deux estimateurs ML et LLMMSE ont été testées sur différents types de données. La première application proposée se situe dans le contexte POLSAR dans le milieu urbain (Ville-de-Québec, Canada) en bande C, avec une résolution spatiale $Res = 5,14 \times 4,73$ m. Ce jeu de données, initialement acquis par un avion Convair–580, le 02/07/1999, a subi un traitement de dégradation au CSA pour simuler les conditions d'acquisition du futur satellite RADARSAT–2.

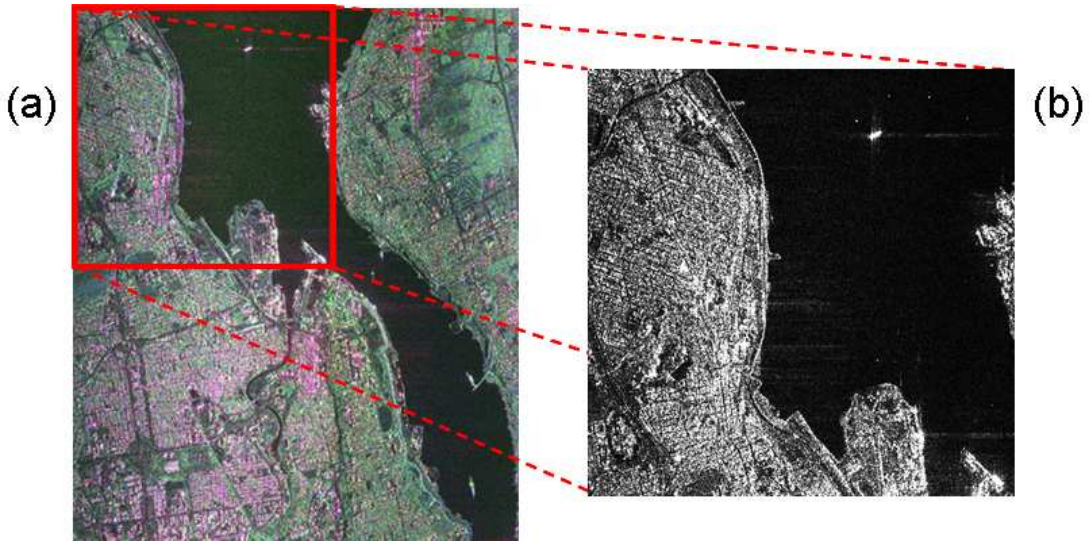


FIG. 3.9 – Données simulées RADARSAT–2, bande C, Québec : (a) composition colorée [860 × 1027 pixels] dans la base de Pauli (HH-VV, 2HV, HH+VV), (b) extrait 488 × 482 de l'image de span.

La figure 3.9 présente les données POLSAR initiales, après un traitement 4-vues. La figure 3.11 illustre les résultats du filtrage d'une portion de 346 × 223 pixels extraite de la première composante diagonale de la matrice de cohérence polarimétrique $[T]_{11}$ (version originale dans la figure 3.10). D'une manière générale, les trois filtres BN-ML, DN-ML et IDAN-ML aboutissent à une réduction plus importante du speckle que BN-LLMMSE, DN-LLMMSE et IDAN-LLMMSE. Ceci est lié au fait que l'estimateur adaptatif LLMMSE est toujours inférieur en terme de réduction de bruit face à l'estimateur non-adaptatif ML. Par contre la résolution spatiale est nettement améliorée par l'utilisation de l'estimateur LLMMSE. Si on compare l'effet du choix du voisinage dans le milieu urbain, l'interprétation visuelle indique que le voisinage IDAN fournit les meilleures performances : la stationnarité locale est assurée, tout en allant chercher des

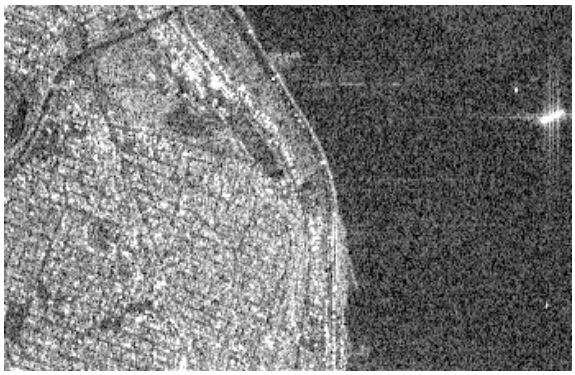


FIG. 3.10 – Données RADARSAT–2 simulées à partir d'images aéroportées, bande C, Québec, extrait 346×223 : $[T]_{11}$ initial 4-vues.

échantillons nécessaires au processus d'estimation dans des voisinages fortement contraints par la texture des zones urbaines.

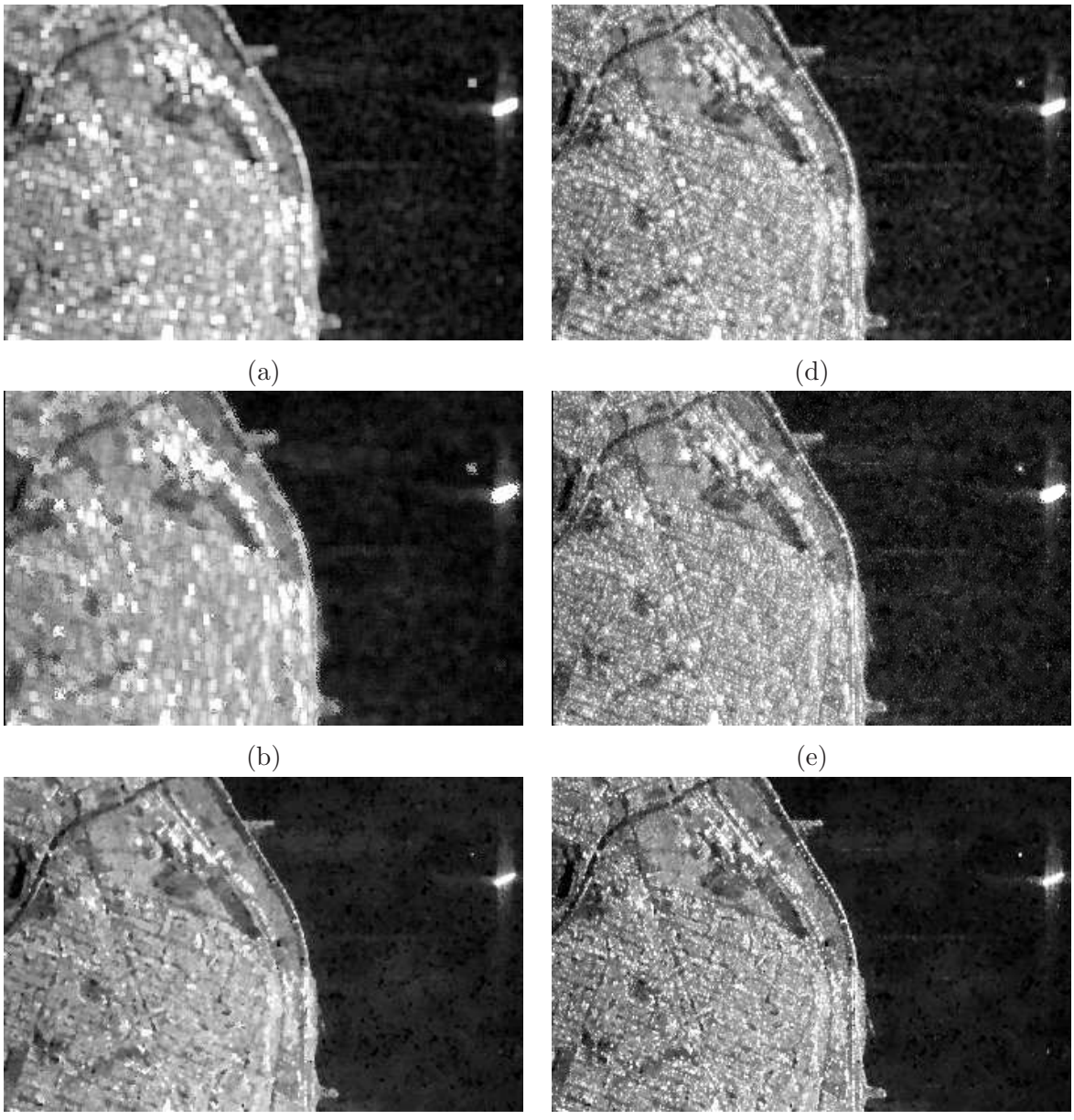
Un des paramètres à choisir dans l'algorithme IDAN est le coefficient de variation du bruit C_v. Une analyse du choix de ce paramètre est illustrée dans la figure 3.12. Ainsi l'algorithme IDAN est appliqué avec trois valeurs du coefficient de variation : $0,6$; $0,9$ et $1,8$ ($N_{max} = 50$ dans tous les cas). La valeur du nombre équivalent de vues $[T]_{11}$ est $L_{eq} \approx 1.2$, ce qui donne un coefficient $C_v^{eq} \approx 0,9$. Une analyse visuelle recommande l'utilisation de C_v^{eq} dans le filtrage IDAN des données POLSAR pour le milieu urbain. Finalement, le détecteur de contours proposé par Touzi et al. en [Touz-88] a été appliqué à l'image $[T]_{11}$ filtrée par IDAN-ML avec différentes valeurs du C_v (cf. Fig. 3.12). $C_v = C_v^{eq} = 0,9$ donne les meilleures performances détection/fausse-alarme.

L'étape suivante dans la chaîne de traitement consiste à calculer les paramètres $H - \alpha - A$. La figure 3.13 présente les résultats de la décomposition de Cloude et Pottier de la matrice de cohérence polarimétrique filtrée. Ces paramètres sont sensibles au nombre de vues L utilisées pour l'estimation de la matrice $[T]$ (cf. Sect. 1.6.1). L'interprétation physique des paramètres $H - \alpha - A$ doit prendre en compte cette information : avec l'estimateur ML L est connu en chaque pixel alors qu'avec le LLMMSE on ne dispose plus de cette information. Sur la figure 3.13 on remarque également que l'estimation de type LLMMSE donne de bons résultats en termes de préservation de la résolution spatiale mais, dans le même temps, elle introduit du biais et de la variance dans les paramètres POLSAR estimés. Ceci est ensuite confirmé par les résultats de classification POLSAR avec la distance de Wishart (cf. Fig. 3.14).

En conclusion, le meilleur compromis entre la réduction de speckle et la préservation de la résolution spatiale pour les applications POLSAR d'extraction/classification/fusion est l'approche basée sur le voisinage IDAN combinée avec une estimation multi-vues complexe.

3.5.2 Estimation des fréquences locales

L'estimation LR+HR des fréquences locales a été testée tout d'abord sur des données réelles basse résolution ERS TANDEM (cf. Tab. 3.2) qui ont permis de vérifier la plus grande adaptativité des estimateurs de fréquence dans les zones où les motifs de franges sont non-stationnaires.

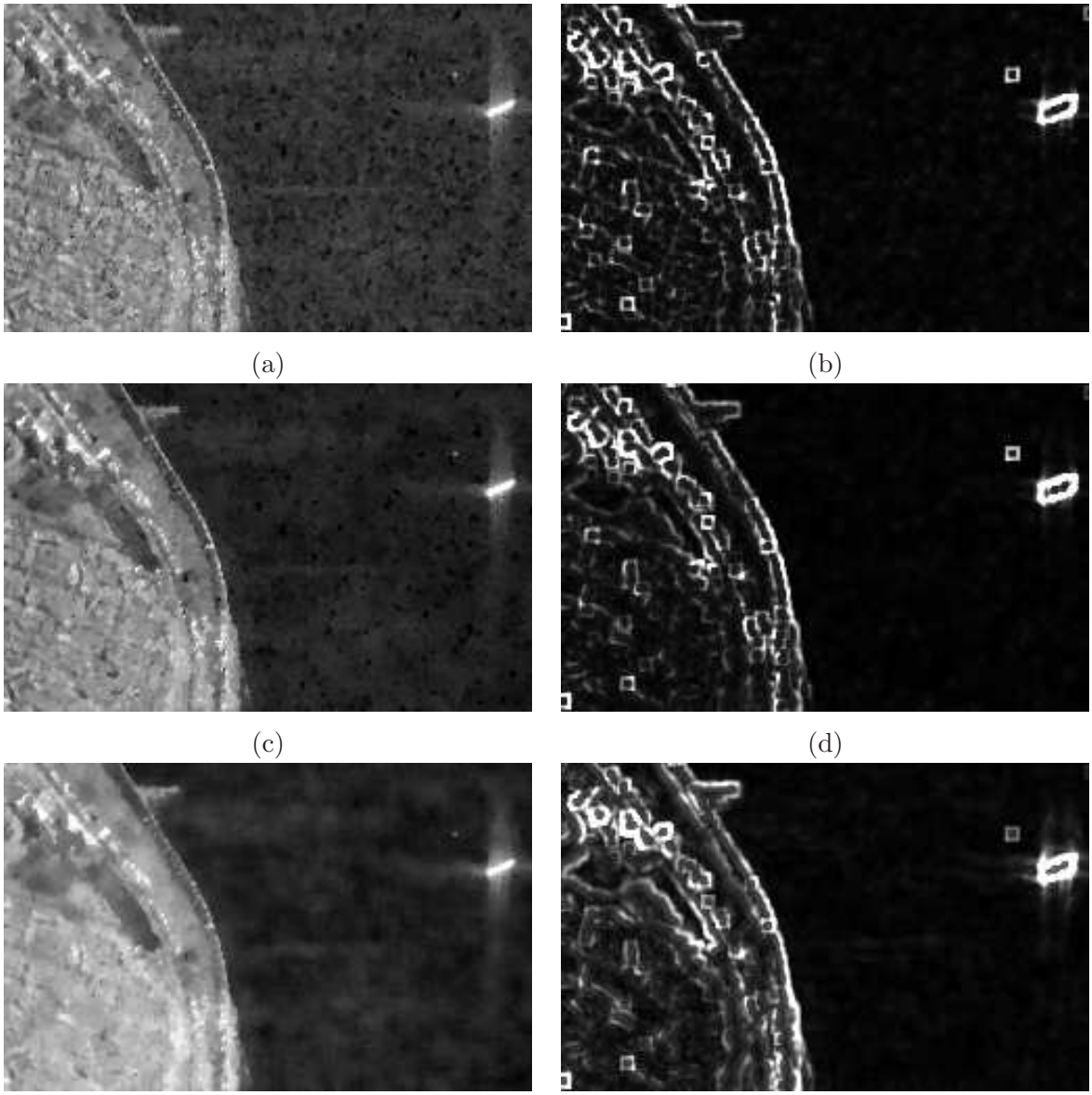


(a) (d)

(b) (e)

(c) (f)

FIG. 3.11 – Filtrage de la matrice de cohérence polarimétrique, données simulées RADARSAT–2, bande C, Québec, extrait 346×223, $[T]_{11}$: (a) BN-ML (7×7 boxcar), (b) DN-ML, (c) IDAN-ML ($N_{max} = 50$ dans l'AN), (d) BN-LLMMSE, (e) DN-LLMMSE et (f) IDAN-LLMMSE.



(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

FIG. 3.12 – Filtrage IDAN-ML de la matrice de cohérence polarimétrique, données simulées RADARSAT–2, bande C, Québec, extrait 346×223, $[T]_{11}$.
IDAN $N_{max} = 50$ et (a) $C_v = 0,6$, (c) $C_v = 0,9$, (e) $C_v = 1,8$.
Détection de contours $[T]_{11}$: (b) IDAN $C_v = 0,6$, (d) IDAN $C_v = 0,9$ et (f) IDAN $C_v = 1,8$.

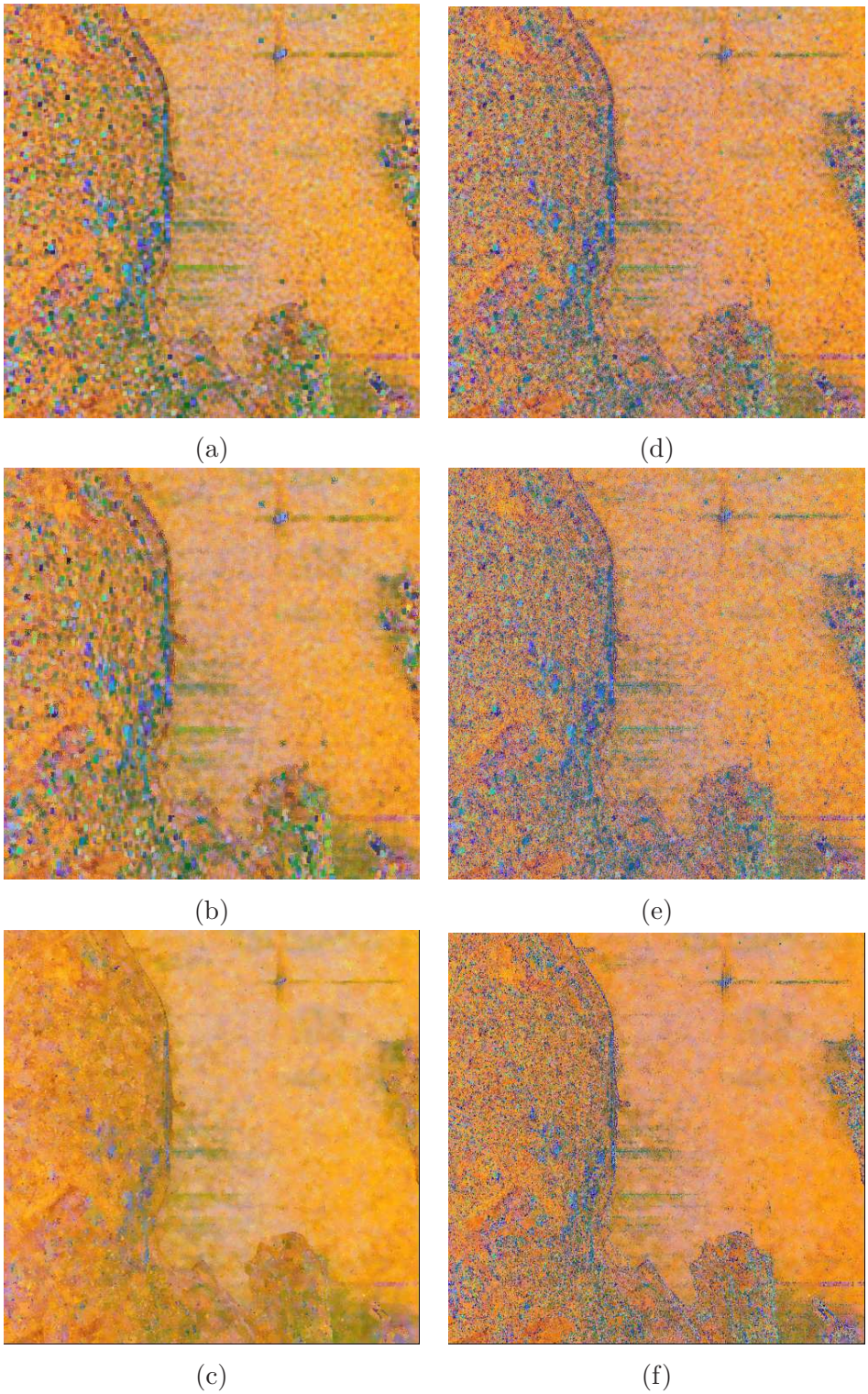


FIG. 3.13 – Décomposition (H-α-A), données simulées RADARSAT–2, bande C, Québec, extrait 488×482 : (a) BN-ML, (b) DN-ML, (c) IDAN-ML, (d) BN-LLMMSE, (e) DN-LLMMSE et (f) IDAN-LLMMSE.

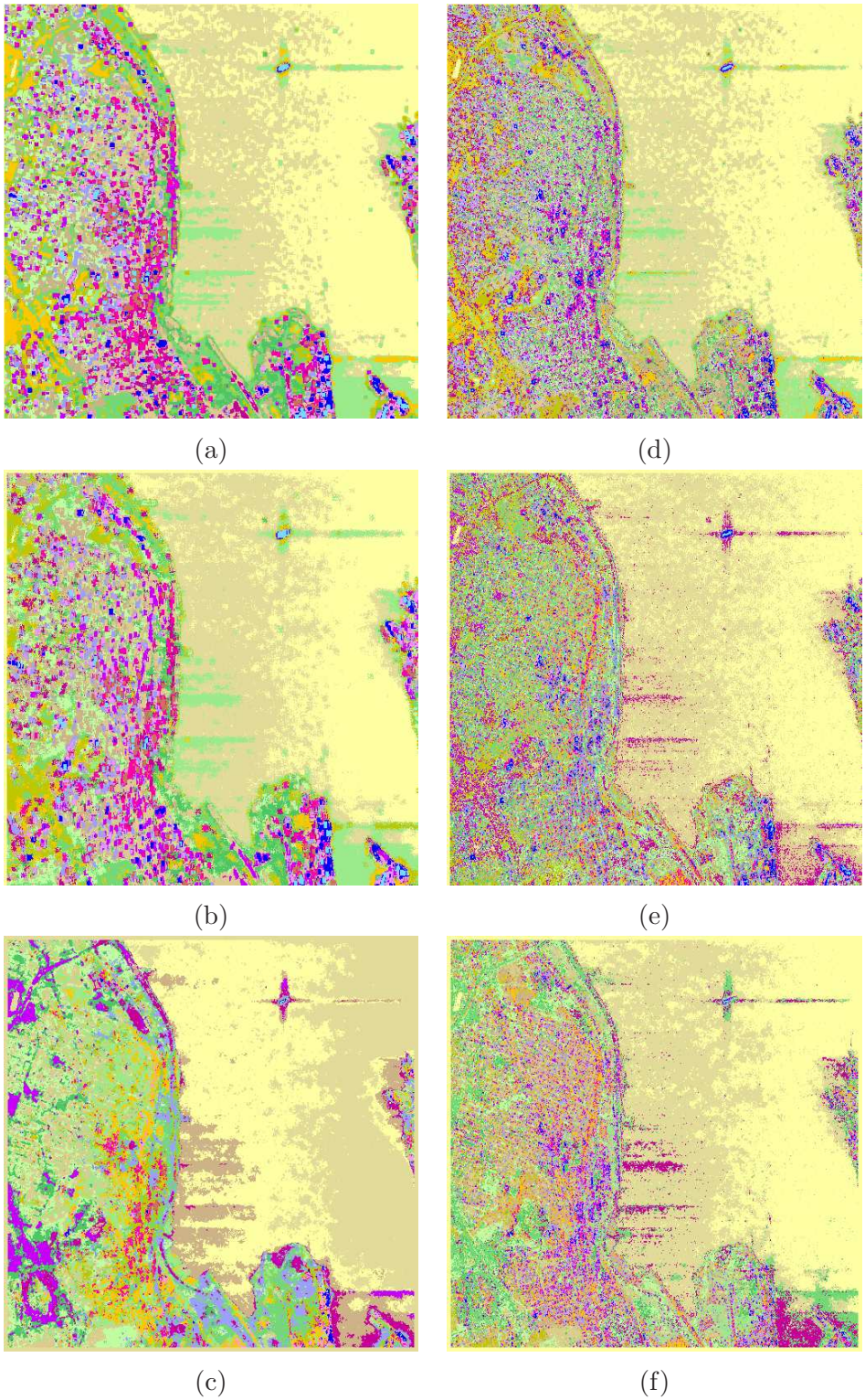


FIG. 3.14 – Classification POLSAR Wishart, données simulées RADARSAT–2, bande C, Québec, extrait 488×482 : (a) BN-ML, (b) DN-ML, (c) IDAN-ML, (d) BN-LLMMSE, (e) DN-LLMMSE et (f) IDAN-LLMMSE.

En l'absence de données satellites SAR HR en mode InSAR, l'interférogramme ERS a été choisi

TAB. 3.2 – Images RAW ERS TANDEM acquises sur Mont-Blanc.

Date	**Satel.**	**Orbite**	**Frame**	**Passe**	$B_\perp$	e_a
95.12.31	ERS-1	23328	2673	Des.	208 m	45 m
96.01.01	ERS-2	03655				

pour illustrer la méthode LR+HR car elle révèle des franges topographiques très serrées : une altitude d'ambiguïté de 45m et une différence d'élévation jusqu'à 4000m dans la scène.

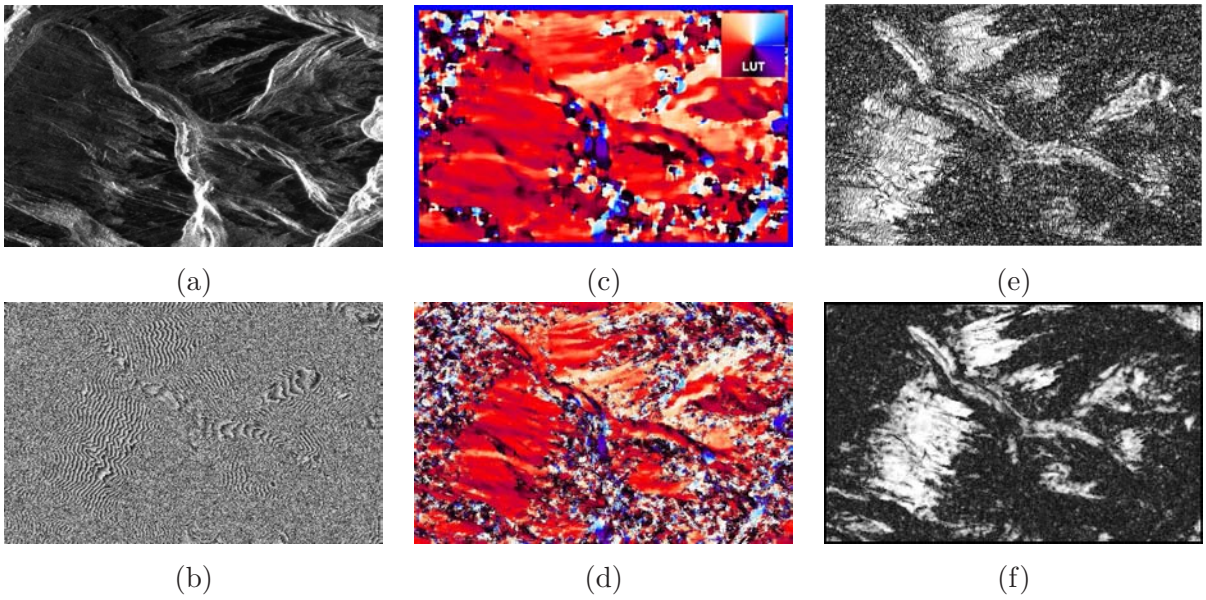


FIG. 3.15 – Interférogramme TANDEM ERS 1/2 [768 × 489 pixels]. Données originales 5-vues : (a) amplitude maître, (b) phase. Fréquences locales 2D illustrées par l'orientation des franges : (c) fréquences locales LR (table de couleur des orientations en haut à droite), (d) fréquences locales LR+HR. Coherences filtrées : (e) filtrage boxcar sans compensation (issues de ROI-PAC), (f) filtrage par voisinage adaptatif (IDAN-ML) avec compensation des franges à l'aide des fréquences locales LR+HR.

Après avoir synthétisé et recalé les deux images SLC, l'interférogramme original (1×5 multi-vues complexe) est illustré dans la figure 3.15-(a),(b). La résolution spatiale des images est approximativement de 20m au sol. Ensuite, l'algorithme d'estimation des fréquences locales LR et HR est appliqué sur l'image de phase 5-vue et les résultats obtenus sont évalués en visualisant la direction du motif de franges donnée par le gradient de phase (cf. Fig. 3.15-(c),(d)). Le résultat obtenu par l'estimation LR révèle une bonne estimation de la pente moyenne de la vallée. La composante HR additionne à cette information les motifs manquants correspondant aux variations locales du relief : micro-vallées (cf. Les-Drus) et glaciers de petite taille (cf. Nantillons et Blaitière).

L'intérêt d'une bonne estimation des fréquences locales est illustré par le filtrage de cohérence interférométrique. La figure 3.15-(e) présente la cohérence filtrée par BN-LM (boxcar et moyennage multi-vues complexe) : les non-stationnarités dans le signal de phase ont pollués le proces-

sus d'estimation. La compensation des franges (grâce aux fréquences locales LR+HR dans un modèle sinusoïdal) assure l'hypothèse de stationnarité locale (cf. Fig. 3.15-(f)) et donc le résultat du filtrage est correct.

TAB. 3.3 – Paramètres utilisés dans la simulation TerraSAR-X.

Paramètre	**Valeur**
altitude satellite (km)	514
échantillonnage au sol (m)	2
échantillonnage en azimut (m)	2
échantillonnage en distance (m)	1,2
angle d'incidence close range (degrés)	30
altitude d'ambiguïté (m)	10
coefficient de variation	0,52
distribution uniforme du bruit de phase	$\pm\pi/4$

Nous avons également utilisé une simulation de données interférométriques TerraSAR-X sur la Mer-de-Glace (cf. Tab. 3.3), réalisée par la méthode présentée en [Jule-06] à partir d'un MNT haute résolution (cf. Fig. 3.16). L'estimation en deux temps à l'aide de la méthode non-adaptative VCM pour les fréquences LR et de l'approche IDAN pour les fréquences HR permet un meilleur suivi des variations locales des franges. Cette amélioration peut être évaluée visuellement en comparant les résultats des développements de phase par moindres carrés réalisés à partir des fréquences locales LR (l'estimation non-adaptative) et à partir des fréquences LR+HR estimées par la méthode proposée (cf. Fig. 3.17).

Une comparaison objective est possible dans le cas de l'interférogramme simulé : l'algorithme adaptatif multi-résolution LR+HR vs. le boxcar VCM. L'erreur RMSE est calculée dans les deux cas en utilisant comme vérité terrain les gradients de phase estimés par les noyaux Prewitt appliqués sur l'image d'élévation codée en géométrie TerraSAR-X. Le tableau 3.4 présente la comparaison entre :

- l'approche mono-résolution VCM avec boxcar 7×7 (bon compromis entre robustesse de l'estimation et perte de résolution spatiale),
- l'algorithme LR+HR : LR par VCM 11×11 suivi de l'estimation HR par IDAN avec une taille maximale de 50 échantillons.

L'erreur RMS dans le cas LR+HR est diminuée de manière significative par rapport au voisinage boxcar (pratiquement divisée par 2). L'apport du modèle LR+HR et la robustesse des résultats devront être confirmés sur des données HR réelles.

3.5.3 Interférométrie SAR

L'étude de l'impact du choix voisinage-estimateur pour les applications en interférométrie SAR haute résolution est illustré avec les données acquises le 07/02/2003, sur le site des Baux-de-Provence, France, par le système SAR aéroporté ONERA-RAMSES (Radar Aéroporté Multi-Spectral d'Étude des Signatures) : bande X et $Res = 0,32 \times 0,56$ m.

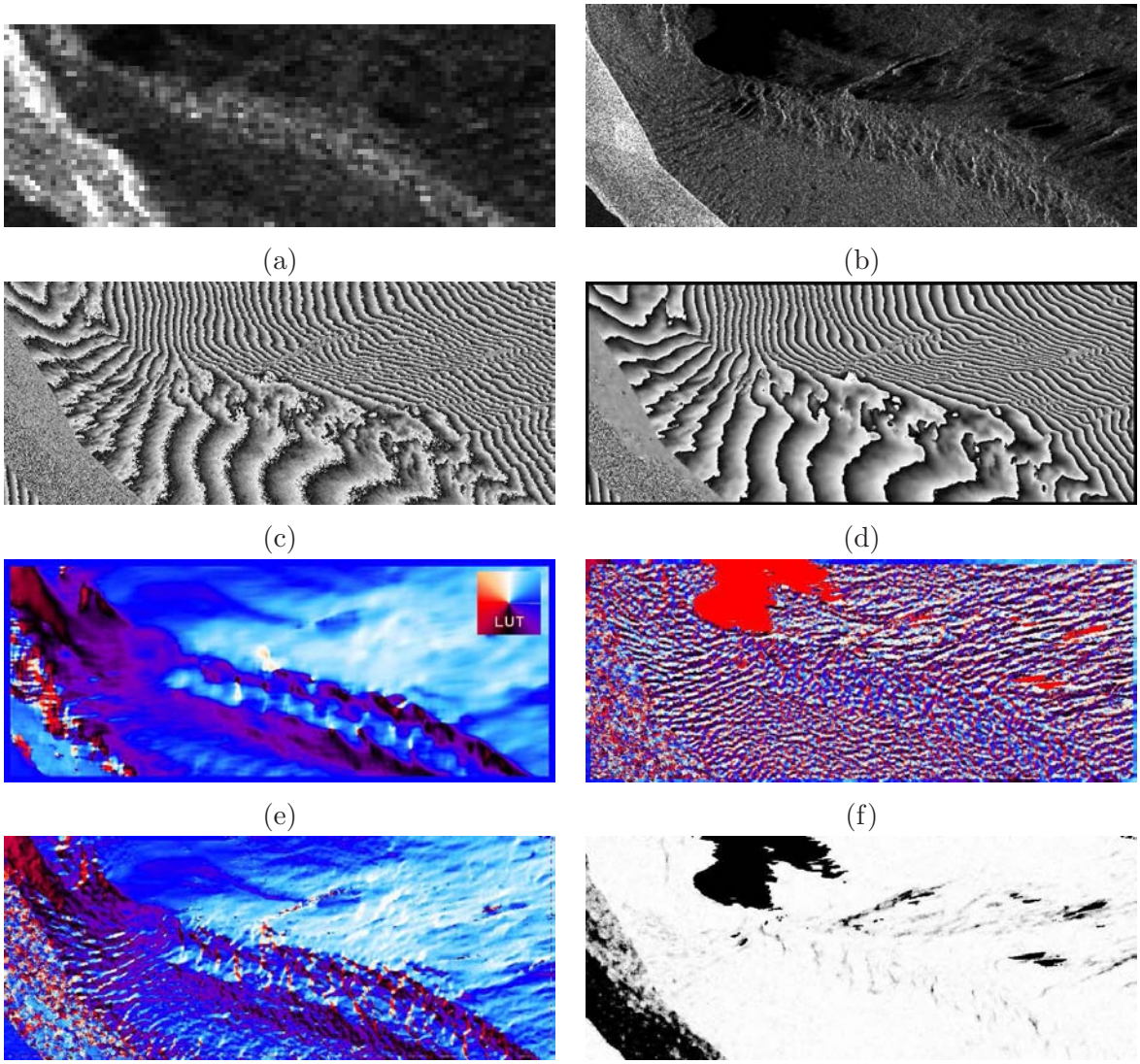


FIG. 3.16 – (a) : Simulation TerraSAR-X [840 × 340 pixels] d'une partie de la Mer-de-Glace ; (b) même partie vue par ERS ; (c) simulation des franges topographiques pour une altitude d'ambiguïté de 10 m ; (d) phase filtrée par voisinage adaptatif (IDAN-ML) avec compensation des franges à l'aide des fréquences locales LR+HR ; (e)-(f) Orientation des franges données par les fréquences locales basse résolution LR (table de couleur des orientations en haut à droite) et haute résolution HR ; (g)-(h) Orientation des franges données par les fréquences locales basse+haute résolution LR+HR et image de confiance globale de l'estimation.

TAB. 3.4 – RMSE des fréquences locales (f_x, f_y) : Prewitt sur l'image d'élévation en géométrie TerraSAR-X (référence) ; estimation LR-VCM sur un voisinage boxcar 7 × 7 et estimation LR+HR sur l'interférogramme simulé.

	RMSE f_x	RMSE f_y
VCM 7x7	3.61e-004	3.59e-004
LR+HR	**1.88e-004**	**1.99e-004**

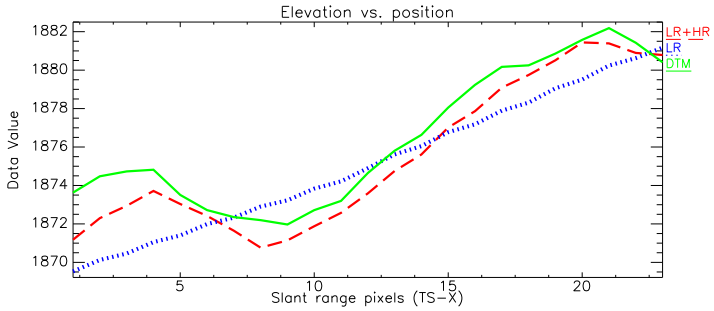


FIG. 3.17 – Profil d'altitude extrait de la Mer-de-Glace en géométrie simulée TerraSAR-X. Résultats de reconstruction par développement de phase à partir des fréquences locales, estimées par la méthode basse résolution LR et complétées par l'estimation haute résolution HR.

La figure 3.18 présente les données originales obtenues par multi-vues complexe. La fauchée d'analyse est une région agricole avec des champs et des plantations d'oliviers. La haute résolution du système RAMSES permet l'identification de la signature InSAR de chaque arbre.

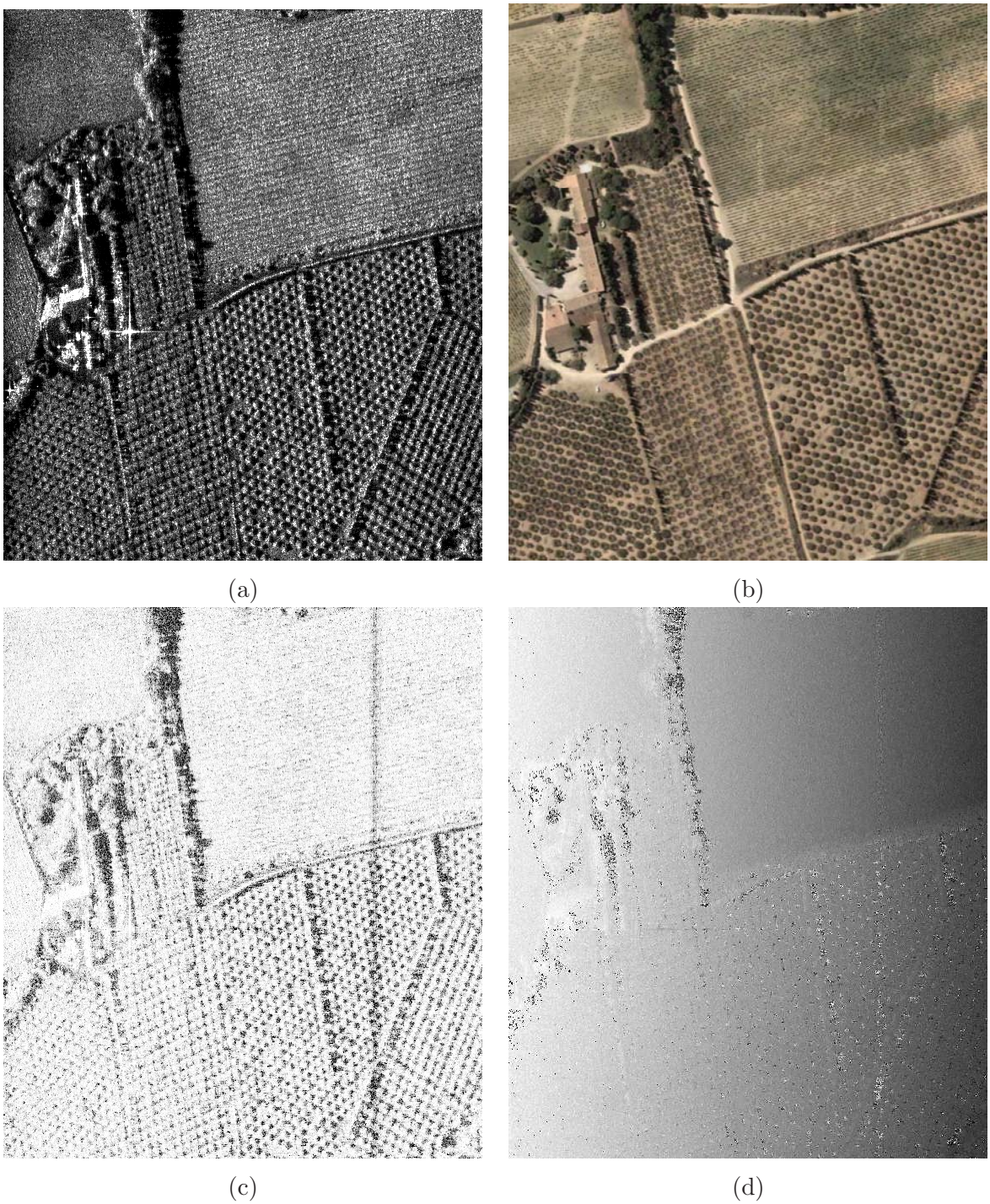
Les résultats de filtrage de la cohérence interférométrique sont illustrés dans la figure 3.20 sur un extrait de 297×175 pixels (cf. Fig. 3.19). Dans le cas des structures fines HR, les voisinages BN et DN ne fournissent pas des résultats optimaux car leur taille n'est pas adaptée au signal. L'estimation adaptative LLMMSE permet de compenser cet inconvénient, le prix à payer étant une diminution de performances en réduction de variance et biais de l'estimateur. La souplesse dans la taille et la forme des voisinages IDAN nous permet de bénéficier d'un nombre important d'échantillons dans le processus d'estimation, tout en préservant l'hypothèse de stationnarité locale du signal. Le filtre IDAN-LLMMSE se comporte le mieux parmi les six combinaisons voisinage/estimateur possible.

Une évaluation des performances plus précise sur le filtrage de la cohérence InSAR est proposée dans la figure 3.21. Un profil spatial a été sélectionné manuellement sur l'image de cohérence initiale (cf. Fig. 3.19-(b)). Ensuite, le même profil est tracé pour les six cohérences filtrées. Les filtres BN-ML et DN-ML ne sont pas suffisamment adaptatifs pour assurer la stationnarité locale, et donc la signature InSAR de chaque arbre est dégradée. À l'opposé, les filtres BN-LLMMSE et DN-LLMMSE arrivent à préserver la stationnarité, mais la réduction de biais et variance est faible et le niveau de cohérence reste donc élevé. Les filtres IDAN-ML et IDAN-LLMMSE donne les meilleures performances en effectuant une bonne réduction de variance/biais au même titre que la préservation de la haute résolution spatiale.

3.5.4 Interférométrie SAR polarimétrique

Dans le contexte POL-InSAR, les performances de filtres BN-ML, DN-ML, IDAN-ML, BN-LLMMSE, DN-LLMMSE et IDAN-LLMMSE ont été étudiées à trois niveaux :

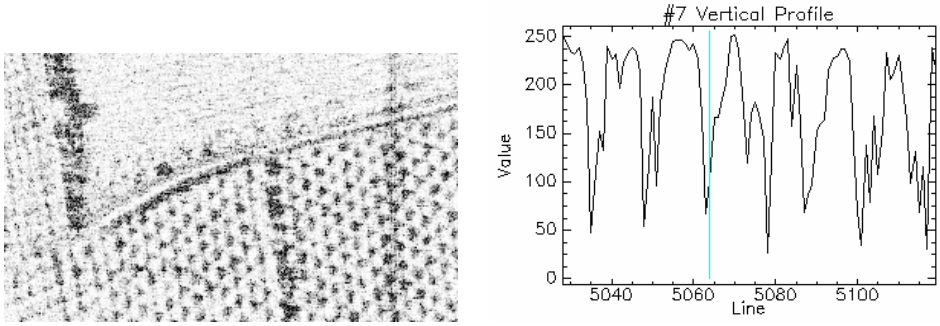
- éléments de la matrice de cohérence POL-InSAR,
- paramètres POL-InSAR extraits des matrices de cohérence,
- classification POLSAR réalisée à partir de ces paramètres et des matrices de cohérence



(a) (b)

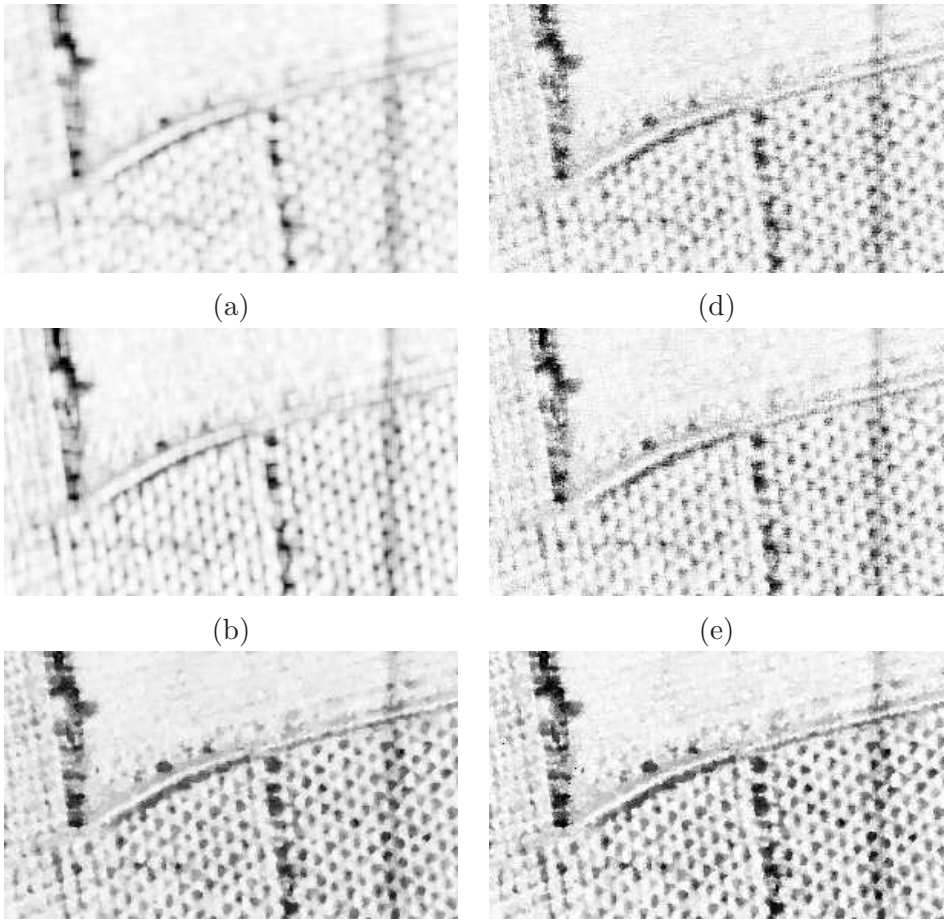
(c) (d)

FIG. 3.18 – Données RAMSES ©ONERA, bande X, Baux-de-Provence, extrait 568 × 654, 6-vues : (a) amplitude SAR maître, (b) image optique ©Google-Maps-France, (c) cohérence InSAR et (d) phase interférométrique.



(a) (b)

FIG. 3.19 – Données RAMSES, bande X, Baux-de-Provence, extrait 297×175 : (a) cohérence initiale, (b) profil horizontal sur l'image de cohérence initiale.



(a) (d)

(b) (e)

(c) (f)

FIG. 3.20 – Filtrage de cohérence, données RAMSES, bande X, Baux-de-Provence, extrait 297×175 : (a) BN-ML (7×7 boxcar), (b) DN-ML, (c) IDAN-ML ($N_{max} = 50$ dans l'AN), (d) BN-LLMMSE, (e) DN-LLMMSE et (f) IDAN-LLMMSE.

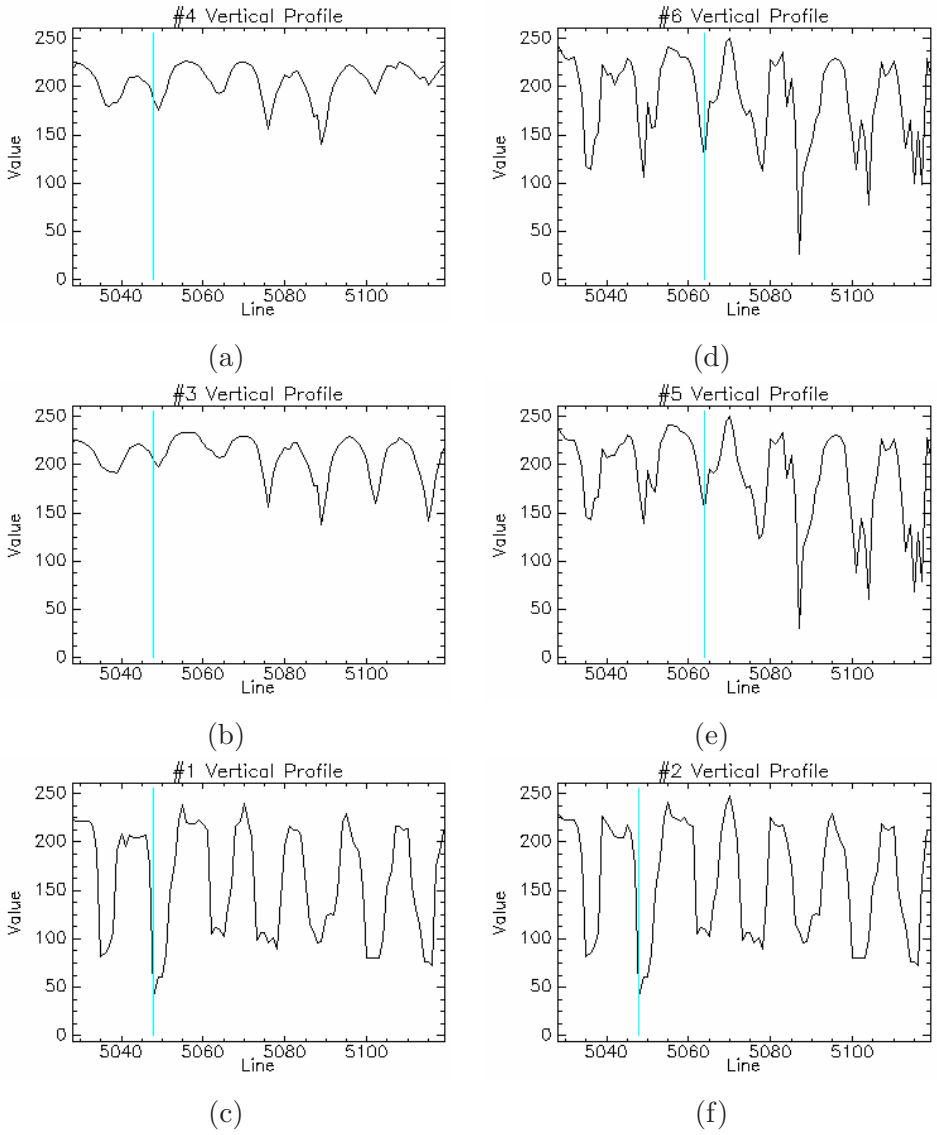


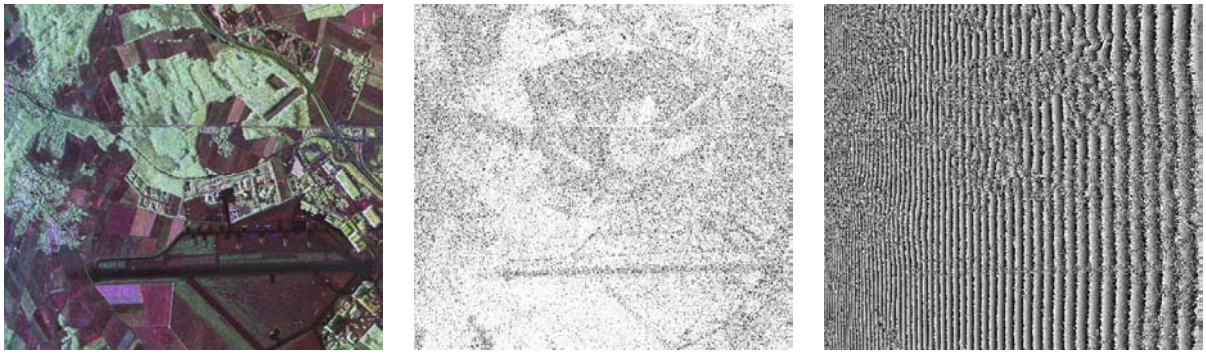
FIG. 3.21 – Profils spatiaux de l'image de cohérence filtrée, données RAMSES, bande X, Baux-de-Provence, extrait 297×175 : (a) BN-ML, (b) DN-ML, (c) IDAN-ML, (d) BN-LLMMSE, (e) DN-LLMMSE et (f) IDAN-LLMMSE.

filtrées.

Les résultats illustrés par la suite ont été obtenus sur les données aéroportées E-SAR (Experimental SAR) acquises sur le site Oberpfaffenhofen, Allemagne : bande L, résolution spatiale $Res = 1,5 \times 1,5$ m, date d'acquisition 22/07/1999.

La première étape est le traitement multi-vues complexe qui fournit des pixels carrés. La figure 3.22 présente ces données POL-InSAR initiales 2–vues. La fauché radar couvre différents milieux (bâtiments, champs, forêts, autoroute...), la caractéristique commune étant l'altitude quasi-constante dans la scène.

Les effets du filtrage sont perceptibles directement au niveau des éléments de la matrice de cohérence POL-InSAR, en particulier les intensités et les cohérences interférométriques. Les images d'intensité obtenues par les six filtres du tableau 3.1 sont illustrées dans la figure 3.24



(a) (b) (c)

FIG. 3.22 – Données E-SAR, bande L, Oberpfaffenhofen, 1540 × 1407 pixels, base de Pauli, 2–vues : (a) composition colorée $[T_3]_M$ (HH-VV, 2HV, HH+VV), (b) cohérence HH+VV, (c) phase HH+VV.

(a) (b)

FIG. 3.23 – Données initiales E-SAR, bande L, Oberpfaffenhofen, base de Pauli, 2–vues : (a) intensité SAR $[T]_{11}$ en Db [563 × 325 pixels], (b) cohérence HH+VV [563 × 325 pixels].

sur un extrait de 563×325 pixels (cf. Fig. 3.23-(a)). Visuellement, on perçoit l'effet des fenêtres directionnelles par rapport aux fenêtres carrées et l'apport pour ces deux voisinages d'un estimateur LLMMSE. Le LLMMSE compense partiellement le manque de stationnarité des fenêtres fixes ou directionnelles, ces dernières ne parvenant pas toujours à respecter les structures fines. En revanche, le voisinage IDAN semble fournir un voisinage suffisamment homogène pour utiliser simplement l'estimateur ML et éviter de réintroduire, via le LLMMSE, la mesure initiale bruitée du pixel courant.

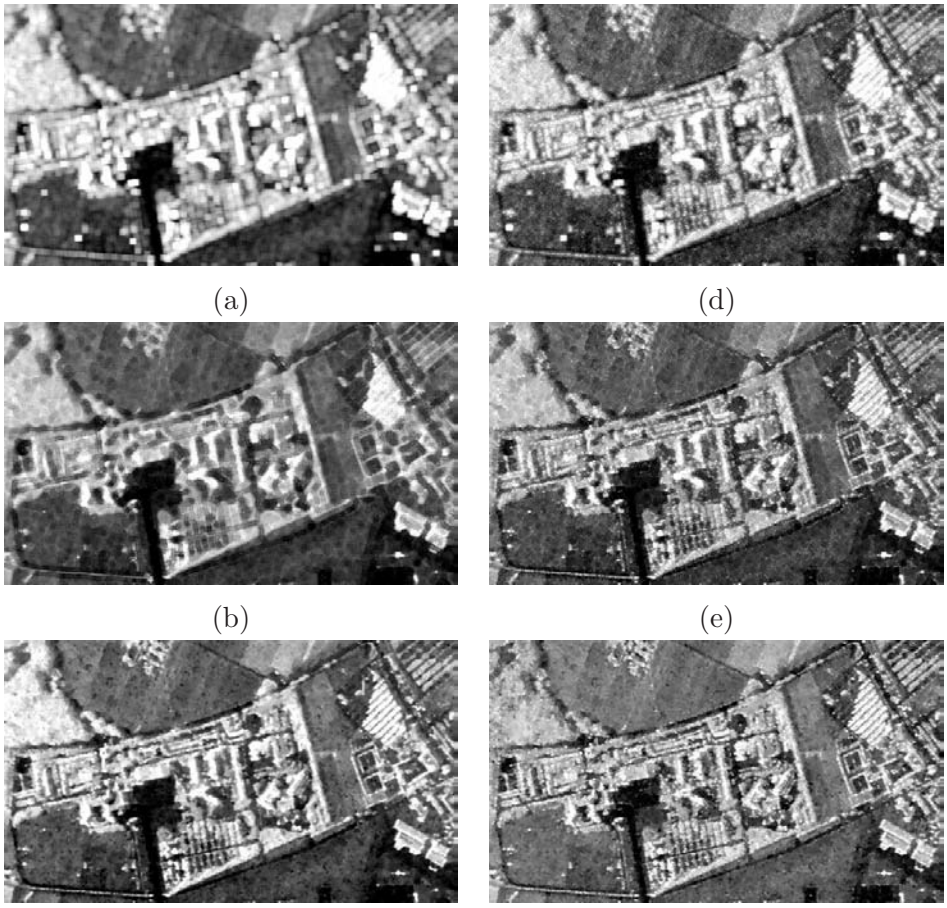
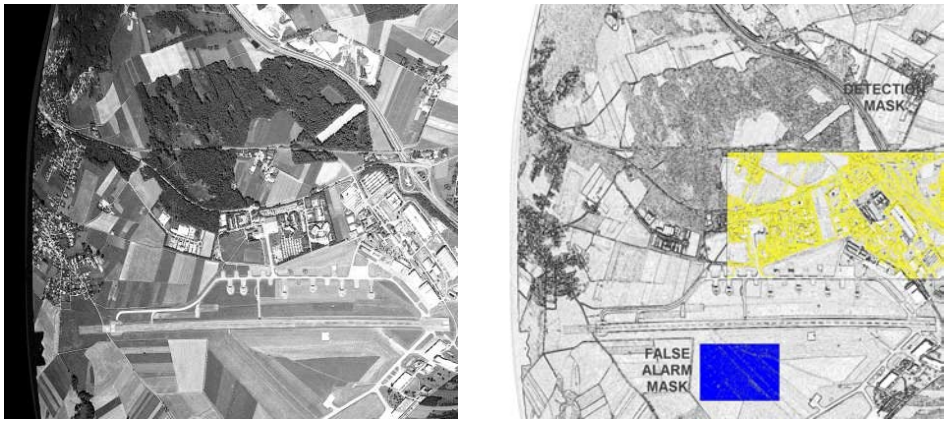


FIG. 3.24 – Filtrage de la matrice de cohérence polarimétrique, données E–SAR, bande L, Oberpfaffenhofen, extrait 563×325, $[T]_{11}$: (a) BN-ML (7×7 boxcar), (b) DN-ML, (c) IDAN-ML ($N_{max} = 50$), (d) BN-LLMMSE, (e) DN-LLMMSE et (f) IDAN-LLMMSE.

Cette impression visuelle est confirmée par l'évaluation objective des performances de détecteurs de contours via les courbes COR (Caractéristiques Opérationnelles de Récepteur). Ces courbes ont été tracées pour mesurer l'influence du choix voisinage/estimateur sur la détection des contours. En s'appuyant sur des régions de référence, les histogrammes conditionnels de la sortie du détecteur [Touz-88] (appliqué sur l'image $[T]_{11}$) sont calculés avec deux masques :

- les régions de référence contenant des structures spatiales fournissent un masque utilisé pour l'estimation de la densité de probabilité conditionnelle pour la détection $f_d(x)$,
- les régions de référence homogènes fournissent un masque pour l'estimation de la densité de probabilité pour la fausse-alarme $f_f(x)$.

Pour rendre le choix des masques le plus objectif possible, les deux régions d'intérêt sont obtenues par le seuillage de l'image contour illustrée dans la figure 3.25-(b). Cette image est obtenue en appliquant un simple détecteur de contours de type Sobel sur une image optique recalée sur les données POL-InSAR (cf. Fig. 3.25-(a)).



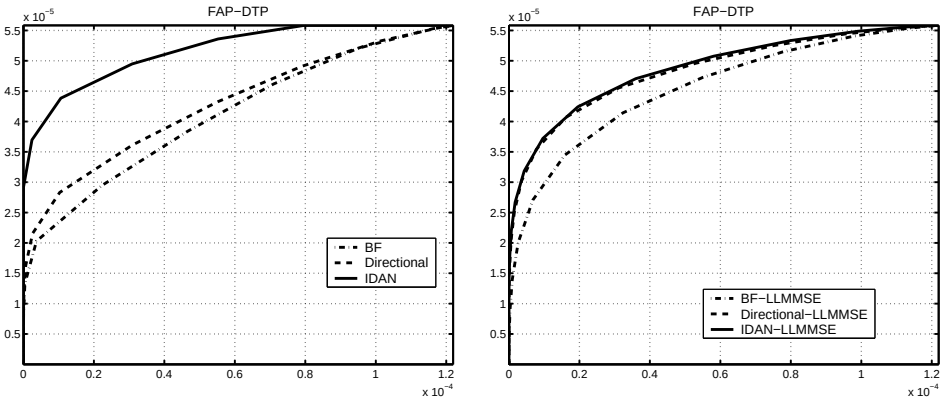
(a) (b)

FIG. 3.25 – Image optique recalée sur les données E-SAR, Oberpfaffenhofen, 1540×1407 pixels : (a) image optique en niveaux de gris, (b) image des contours (masque de détection, masque de fausse-alarme).

Pour un seuil de détection t, la probabilité de détection $P_d(t)$ et la probabilité de fausse-alarme $P_f(t)$ sont :

$$P_d(t) = \int_t^1 f_d(x)dx \quad \text{et} \quad P_f(t) = \int_t^1 f_f(x)dx. \tag{3.55}$$

La figure 3.26 présente les deux courbes COR correspondant aux deux estimateurs ML et LLMMSE calculés avec les trois types de voisinage. L'évaluation visuelle directe des images présentées dans la figure 3.24 est confirmée par les performances en détection de contours mesurées sur des courbes COR : IDAN-ML réalise sur les intensités un meilleur compromis détection fausse alarme qu'IDAN-LLMMSE.



(a) (b)

FIG. 3.26 – Courbes COR pour différents types de voisinage (BF-boxcar, directionnels et IDAN), données E-SAR, Oberpfaffenhofen, $[T]_{11}$: (a) estimateur ML, (b) estimateur LLMMSE

TAB. 3.5 – Filtrage de l'intensité HH+VV, données E–SAR, bande L, Oberpfaffenhofen : rapport des moyennes $\mu_{filtre}/\mu_{initial}$ sur des régions de référence homogènes.

Région	**Pixels**	**BN ML**	**BN LLMMSE**	**DN ML**	**DN LLMMSE**	**IDAN ML**	**IDAN LLMMSE**
forte	534	1.03	1.02	1.01	0.93	0.89	0.94
faible	520	1.05	1.02	1.01	0.97	0.87	0.91

TAB. 3.6 – Filtrage de l'intensité HH+VV, données E–SAR, bande L, Oberpfaffenhofen : coefficient de variation σ/μ sur des régions de référence homogènes.

Région	**Initial**	**BN ML**	**BN LLMMSE**	**DN ML**	**DN LLMMSE**	**IDAN ML**	**IDAN LLMMSE**
forte	0.80	0.13	0.44	0.26	0.49	0.18	0.38
faible	0.99	0.15	0.48	0.30	0.53	0.27	0.41

Les tableaux 3.5 et 3.6 présentent les performances en terme de préservation de la moyenne radiométrique et de réduction de la variance sur des régions homogènes. Le rapport des moyennes présenté dans le tableau 3.5 indique une légère surestimation dans le cas des filtres BN-ML, BN-LLMMSE et DN-ML, alors que DN-LLMMSE, IDAN-ML et IDAN-LLMMSE présentent une sous-estimation de la radiométrie. Le minimum du coefficient de variation illustré dans le tableau 3.6 est obtenu en utilisant le filtre IDAN-ML (à l'exception du BN-ML qui est un filtre non-adaptatif avec un comportement idéal sur des régions homogènes).

Les performances des six filtres sont illustrées dans la figure 3.27 sur la cohérence interférométrique HH+VV. Les conclusions obtenues sur les cohérences InSAR illustrées précédemment (cf. Fig. 3.20) sont les mêmes : IDAN-ML filtre davantage que IDAN-LLMMSE sans introduire une perte notable de résolution. Une évaluation objective est présentée par les tableaux 3.7 et 3.8 en terme de réduction du biais et de la variance d'estimation sur des régions homogènes. Dans tous les cas, le filtrage de la matrice de cohérence induit une baisse du niveau de cohérence sur les zones de faible cohérence i.e. les régions où le biais est important (cf. Sect. 2.3.3). Dans les régions homogènes de forte cohérence, le niveau de cohérence est plus ou moins conservé après le filtrage. Le tableau 3.8 présente l'écart type calculé sur les trois régions homogènes. Le minimum est obtenu en utilisant le filtre IDAN-ML. Ceci confirme les bonnes performances en réduction du bruit/biais de la méthode proposée IDAN-ML.

L'étape suivante d'une chaîne de traitement de données POL-InSAR consiste à extraire des informations complémentaires sur les mécanismes de rétrodiffusion au travers de décompositions polarimétriques ou polarimétriques-interférométriques. Les paramètres les plus couramment utilisés en polarimétrie sont les paramètres $H/\alpha/A$ de la décomposition de Cloude et Pottier. Ils peuvent être calculés à partir de logiciels libres tels que POLSARpro de l'ESA ou RAdar Tools [Neum-05]. Leur estimation après filtrage de la matrice de cohérence par les filtres BN-ML,

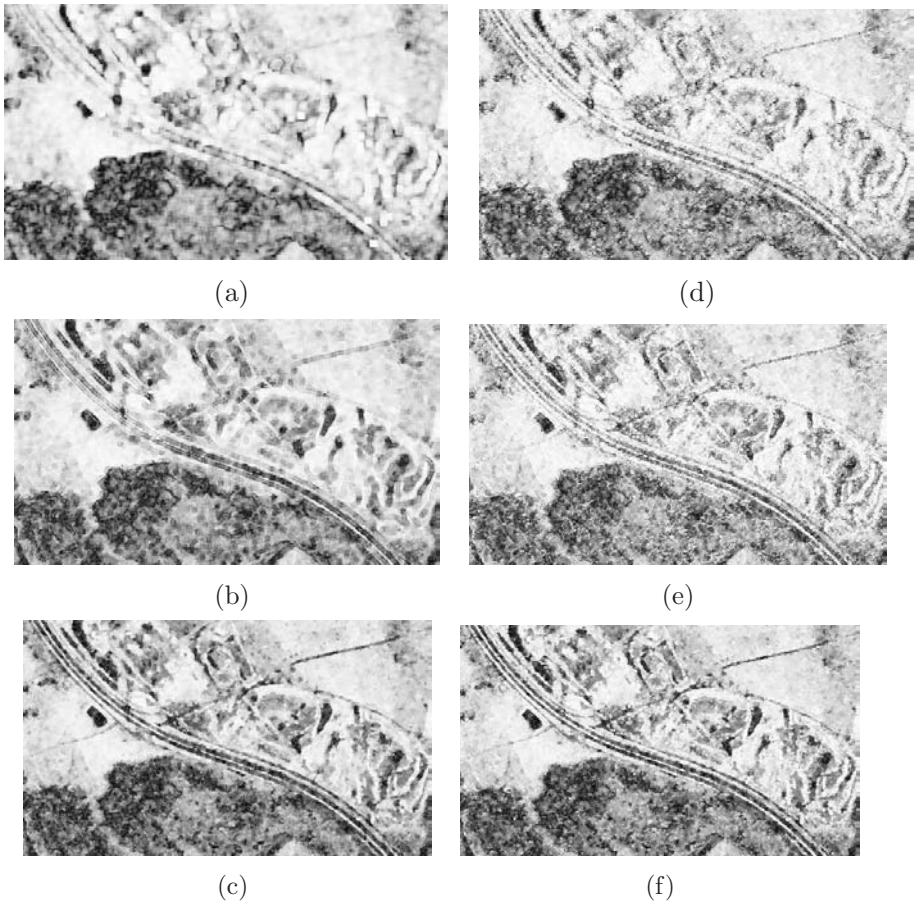


FIG. 3.27 – Filtrage de la cohérence HH+VV, données E–SAR, bande L, Oberpfaffenhofen, extrait 524×311 : (a) BN-ML, (b) DN-ML, (c) IDAN-ML, (d) BN-LLMMSE, (e) DN-LLMMSE et (f) IDAN-LLMMSE.

TAB. 3.7 – Cohérence HH+VV, données E–SAR, bande L, Oberpfaffenhofen : moyenne sur des régions de référence homogènes.

Région	**Initial**	**BN ML**	**BN LLMMSE**	**DN ML**	**DN LLMMSE**	**IDAN ML**	**IDAN LLMMSE**
forte	0.967	0.957	0.958	0.951	0.954	0.947	0.949
médium	0.854	0.703	0.707	0.663	0.688	0.638	0.648
faible	0.794	0.301	0.366	0.305	0.376	0.257	0.278

TAB. 3.8 – Cohérence HH+VV, données E–SAR, bande L, Oberpfaffenhofen : écart type sur des régions de référence homogènes.

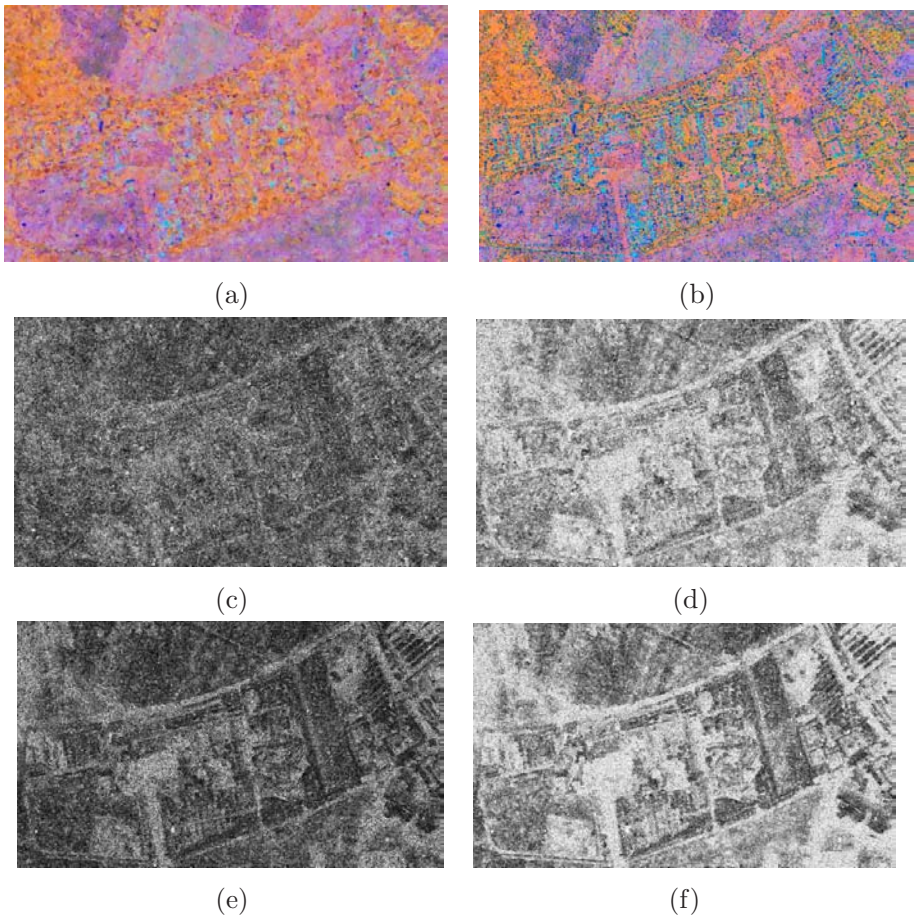
Région	**Initial**	**BN ML**	**BN LLMMSE**	**DN ML**	**DN LLMMSE**	**IDAN ML**	**IDAN LLMMSE**
forte	0.070	0.014	0.024	0.018	0.028	0.016	0.019
médium	0.178	0.105	0.134	0.115	0.147	0.081	0.096
faible	0.201	0.157	0.194	0.160	0.208	0.086	0.117

BN-LLMMSE, DN-ML, DN-LLMMSE, IDAN-ML et IDAN-LLMMSE est illustrée dans la figure 3.28. Plus récents et moins couramment utilisés, les paramètres A_1 A_2 (cf. Eq. 2.20) issus de l'optimisation de la cohérence permettent également d'illustrer l'influence du filtrage sur les paramètres extraits des données POL-InSAR. Bien que l'absence de vérité terrain rende difficile une évaluation quantitative des performances, l'évaluation visuelle des résultats IDAN-ML montre l'apport de l'extension du voisinage réalisée par l'algorithme IDAN. Cette approche permet de réduire à la fois le lissage des structures et la variance des paramètres estimés. L'usage de l'estimateur adaptatif IDAN-LLMMSE fournit des résultats moins régularisés et plus contrastés que ceux obtenus par IDAN-ML au niveau des paramètres A_1 et A_2 issus des cohérences optimisées.

La figure 3.29 présente des histogrammes 2D des paramètres $H - \alpha$ calculés sur deux régions quasi-homogènes, manuellement sélectionnées. Les paramètres $H - \alpha$ sont estimés à partir de la matrice de cohérence polarimétrique maître $[T]_M$ filtrée avec IDAN-ML initialisée par trois valeurs différentes de N_{max} : 25, 50 et 100 échantillons. Dans les deux cas illustrés dans la figure 3.29 (zone I :(a),(c),(e) et zone II : (b),(d),(f)), les deux nuages de points se resserrent autour du centre de masse (valeur moyenne) grâce à l'augmentation du nombre d'échantillons. Ceci est expliqué par la réduction de biais liée à l'estimation de la matrice $[T]_M$ (cf. Sect. 1.6.1). Ainsi, le choix optimal du paramètre N_{max} par rapport à l'estimation des paramètres $H - \alpha$ correspond au nombre d'échantillons recommandé par Lee et al. [Lee-06a] : $N_{max} = 50 \approx card\{BN_{7\times7}\}$.

Les valeurs moyennes et la variance des paramètres polarimétriques H et α calculées sur des régions de référence quasi-homogènes sélectionnées manuellement sont illustrées dans les tableaux 3.9, 3.10, 3.11 et 3.12. Pour l'entropie polarimétrique, le tableau 3.9 indique une légère sous-estimation pour BN-LLMMSE et DN-LLMMSE, alors que les réductions de biais obtenues avec BN-ML, DN-ML, IDAN et IDAN-LLMMSE sont similaires. Une fois de plus, la variance minimum de l'entropie (cf. tableau 3.10) et de l'angle α (cf. tableau 3.12) est obtenue en utilisant le filtre IDAN-ML (à l'exception du BN-ML).

L'influence de l'estimateur appliqué sur le voisinage IDAN se retrouve au niveau d'une classification Wishart, initialisée avec le clustering des paramètres $H/\alpha/A$ en 8 régions. Les deux résultats illustrés dans la figure 3.30 ont été obtenus sans aucune régularisation spatiale autre que celle induite par les fenêtres de filtrage des matrices de cohérence. Une image optique recalée sur les données E-SAR permet de comparer les classifications radar polarimétriques avec



(a) (b) (c) (d) (e) (f)

FIG. 3.28 – Paramètres POL-InSAR, données E–SAR, bande L, Oberpfaffenhofen, extrait 563×325 : (a) H-α-A de $[T]_M$ filtrée avec IDAN-ML, (b) H-α-A de $[T]_M$ filtrée avec IDAN-LLMMSE, (c) A_1 de $[T]$ filtrée avec IDAN-ML, (d) A_1 de $[T]$ filtrée avec IDAN-LLMMSE, (e) A_2 de $[T]$ filtrée avec IDAN-ML, (f) A_2 de $[T]$ filtrée avec IDAN-LLMMSE.

TAB. 3.9 – Entropie polarimetrique, données E–SAR, bande L, Oberpfaffenhofen : moyenne sur des régions de référence homogènes.

Région	**Pixels**	**BN ML**	**BN LLMMSE**	**DN ML**	**DN LLMMSE**	**IDAN ML**	**IDAN LLMMSE**
forte	535	0.84	0.75	0.80	0.74	0.84	0.83
faible	520	0.38	0.33	0.38	0.34	0.40	0.39

TAB. 3.10 – Entropie polarimetrique, données E–SAR, bande L, Oberpfaffenhofen : écart type sur des régions de référence homogènes.

Région	**Pixels**	**BN ML**	**BN LLMMSE**	**DN ML**	**DN LLMMSE**	**IDAN ML**	**IDAN LLMMSE**
forte	535	0.019	0.109	0.057	0.118	0.036	0.057
faible	520	0.028	0.097	0.063	0.106	0.044	0.070

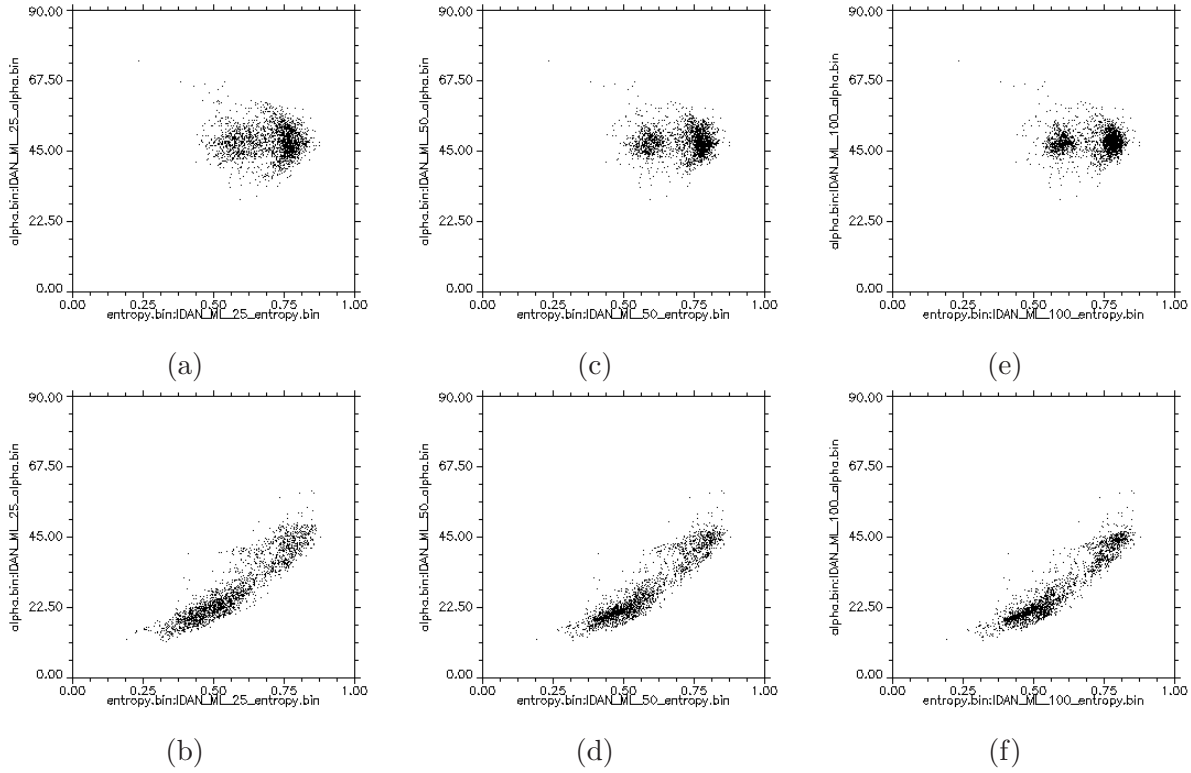


FIG. 3.29 – Distribution des paramètres $H - \alpha$ de $[T]_M$, 2 zones extraites des données E–SAR, bande L, Oberpfaffenhofen, filtrée par IDAN-ML avec différentes tailles maximales : (a), (b) $N_{max} = 25$; (c), (d) $N_{max} = 50$; (e), (f) $N_{max} = 100$.

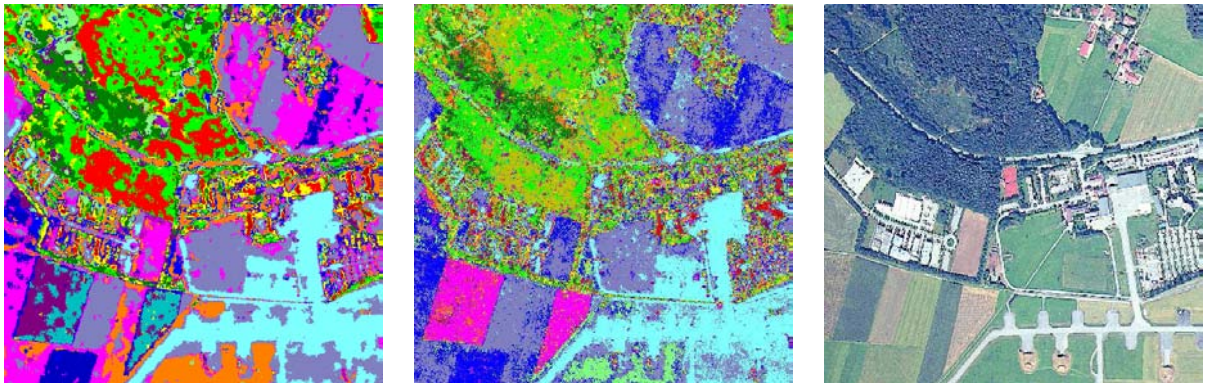
TAB. 3.11 – Angle α, données E–SAR, bande L, Oberpfaffenhofen : moyenne sur des régions de référence homogènes.

Région	**Pixels**	**BN ML**	**BN LLMMSE**	**DN ML**	**DN LLMMSE**	**IDAN ML**	**IDAN LLMMSE**
forte	520	39.53	39.83	39.83	39.95	39.60	39.63
faible	535	45.28	45.45	45.31	45.63	45.17	45.01

TAB. 3.12 – Angle α, données E–SAR, bande L, Oberpfaffenhofen : écart type sur des régions de référence homogènes.

Région	**Pixels**	**BN ML**	**BN LLMMSE**	**DN ML**	**DN LLMMSE**	**IDAN ML**	**IDAN LLMMSE**
forte	520	1.926	5.238	3.289	5.613	2.082	3.519
faible	535	1.065	4.808	2.990	5.143	1.936	3.030

l'occupation des sols. Grâce à une réduction de biais et de variance plus importante, le filtrage IDAN-ML conduit à une meilleure séparation des classes dans les zones homogènes alors que les structures fines haute résolution semblent dans les deux cas bien conservées.



(a) (b) (c)

FIG. 3.30 – Classification POLSAR Wishart, données E–SAR, bande L, Oberpfaffenhofen, extrait 501 × 501 : (a) IDAN-ML, (b) IDAN-LLMMSE et (c) image optique.

3.6 Conclusions

Après avoir présenté les grandes lignes du filtrage de speckle d'images SAR multicomposantes, nous avons proposé dans ce chapitre une approche originale de l'estimation des matrices de cohérence 2 × 2 (InSAR), 3 × 3 (POLSAR) ou 6 × 6 (POL-InSAR) et des paramètres qui en découlent. Publiée en 2004 dans une version guidée par l'amplitude et dédiée à la cohérence [Vasi-04], cette approche a été généralisée à l'estimation de l'ensemble de la matrice de cohérence POL-InSAR avec une croissance de région contrôlée par les différentes intensités disponibles [Vasi-06]. Elle est désormais proposée dans deux logiciels libres "open-sources" :

1. "RAT" (RAdar Tools) développé à l'Université Technologique de Berlin, Allemagne (Département Computer Vision and Remote Sensing). IDAN a servi à illustrer RAT au workshop POLinSAR 2005 [Neum-05] et est actuellement utilisé comme cas d'école dans les tutoriaux de RAT [Reig-07RAT].
2. "POLSARpro" (POLarimetric SAR data PROcessing and educational tool) développé sous contrat ESA par un consortium : Institut d'Électronique et de Télécommunications de Rennes (Université de Rennes 1), Microwaves and Radar Institute HR (DLR) et AEL Consultants [Pott-07].

Nous avons testé les algorithmes IDAN-ML et IDAN-LLMMSE sur différents jeux de données aéroportées acquis par E-SAR [Vasi-04a], [Vasi-05a], Convair-580 [Vasi-05] et RAMSES [Vasi-05b], et comparé les résultats obtenus avec deux estimateurs : la moyenne multi-vues complexe (estimateur ML) et l'estimateur LLMMSE qui réalise un compromis entre la valeur initiale et la moyenne locale en fonction de l'hétérogénéité de l'intensité sur le voisinage. Pour le filtrage des images directement issues de la matrice de cohérence telles que les intensités ou les cohérences interférométriques, l'utilisation de l'estimateur LLMMSE ne semble pas améliorer

les résultats. Il aurait plutôt tendance à réintroduire du biais et de la variance perturbant la détection de contours. En revanche, pour le filtrage de paramètres POL-InSAR issus de décompositions polarimétriques ou de l'optimisation de la cohérence, le LLMMSE fournit des résultats moins régularisés qui peuvent être plus discriminants du point de vue de la séparation des types de rétrodiffusion, au détriment de la robustesse de l'estimation dans les zones homogènes. Le couplage avec l'estimateur LLMMSE offre dans ce cas l'avantage de limiter les effets d'une éventuelle sous-segmentation en présence de structures différentes du point de vue polarimétrique et équivalentes du point de vue radiométrique.

Dans le contexte InSAR haute résolution, nous avons également proposé une méthode originale pour l'estimation des fréquences locales des interférogrammes topographiques. L'approche LR+HR est basée sur la fusion des trois principes : analyse multi-échelle [Davi-99], voisinages adaptatifs multicomposantes IDAN [Vasi-06] et estimation robuste non-adaptative basse résolution (boxcar) [Trou-96]. La radiométrie étant fortement conditionnée par les orientations, le voisinage IDAN permet de sélectionner des populations de pixels appartenant aux mêmes types de rétrodiffusion et d'orientation. Afin d'être en mesure de compenser les franges sur des voisinages adaptatifs, nous avons développé un nouvel algorithme d'estimation des fréquences locales [Vasi-06a] basé sur l'estimation de la fonction d'auto-corrélation 2D du signal complexe de phase à partir des paires de pixels disponibles dans un voisinage quelconque et de déduire de sa phase les fréquences recherchées. Ces fréquences locales sont utilisées aux différents niveaux dans le traitement InSAR : filtrage de phase interférométrique, développement de phase et compensation des composantes déterministes dans l'estimation de la corrélation complexe InSAR.

La méthode LR+HR a été testée sur des données réelles ERS TANDEM dans le massif du Mont-Blanc et sur une simulation de données interférométriques TerraSAR-X réalisée à partir d'un MNT haute résolution. L'apport du modèle LR+HR et la robustesse des résultats devront être confirmés sur des futures données HR satellitaires.

Par la suite, plusieurs évolutions de l'approche IDAN méritent encore d'être explorées. La première consiste à introduire d'autres sources d'informations que les intensités multicomposantes pour guider la croissance de régions. Ces informations peuvent provenir d'autres acquisitions radar (autres dates, autres bandes...) ou bien d'autres capteurs comme des images optiques. Cette direction amène des difficultés dans la caractérisation statistique des régions stationnaire dans des différentes types des données : dans la littérature il existe seulement une version d'IDAN pour le bruit gaussien additif dans les images couleur [Ciuc-00].

La seconde évolution consiste à découpler l'information qui guide la croissance de région de celle utilisée pour calculer la pondération du LLMMSE. En effet, la double adaptativité (géométrique et statistique) est a priori redondante : si par construction le voisinage est homogène, le LLMMSE aboutit à un simple moyennage. Cette redondance se justifie dans le cas du filtrage de données homogènes car elle sécurise le filtrage en cas d'erreur dans la construction du voisinage. En revanche, elle renforce l'influence de l'information utilisée pour l'adaptativité qui diffère de l'information filtrée. C'est le cas du filtrage directionnel [Lee-03] ou de l'approche IDAN couplé avec l'estimateur LLMMSE [Vasi-06].

Une troisième direction d'approfondissement de l'approche IDAN, plus spécifique à la polarimétrie, consiste à reprendre la stratégie de croissance de région en introduisant un test de cohérence afin d'isoler les cibles cohérentes ou de limiter le filtrage de cible partiellement cohérente. Ce travail pourrait-être entrepris avec une utilisation du modèle TSVM proposé par Ridha Touzi qui offre une description unifiée des cibles cohérentes et non-cohérentes [Touz-07].

Chapitre 4

Conclusions de la partie méthodologique

L'utilisation des images SAR dans le contexte de la télédétection quantitative nécessite le plus souvent une analyse multi-dimensionnelle des données. Cette analyse repose en particulier sur les techniques de mesure "différentielles" des images SAR : la polarimétrie et/ou l'interférométrie.

La première partie de cette thèse a présenté le contexte méthodologique lié au traitement des données SAR multicomposantes. L'arrivée des satellites SAR mesurant le signal radar rétrodiffusé sur tous les canaux polarimétriques permet aujourd'hui d'utiliser l'information complète du champ électromagnétique rétrodiffusé. Nous avons employé le formalisme général vectoriel POLSAR pour décrire les principes de l'imagerie SAR. Le cas scalaire en découle comme un cas particulier à dimension réduite. Les principes de base de l'interférométrie SAR ont également été présentés à la fois dans le cas scalaire (InSAR) et vectoriel (POL-InSAR).

Dans le chapitre 3 nous nous sommes focalisé sur les méthodes multicomposantes de filtrage de speckle, étape du traitement qui constitue un verrou important pour l'utilisation des données interférométriques ou polarimétriques. Les avancées méthodologiques proposées dans cette thèse se placent ainsi dans le cadre du filtrage cohérent du speckle des images complexes SAR multivariées. Avec une approche inspirée des opérateurs de voisinage, nous avons proposé une nouvelle méthode appelée IDAN (Intensity-Drivn-Adaptive-Neighborhood). Cette méthode est basée sur des voisinages adaptatifs obtenus par croissance de régions guidée par les composantes d'intensité. Elle permet d'améliorer la préservation de la stationnarité locale et d'obtenir un nombre d'échantillons suffisant pour réduire la variance et le biais des paramètres estimés. En combinant trois types de voisinage, boxcar, directionnel et IDAN, et deux estimateurs, moyenne multivues complexe et LLMMSE, nous avons aussi étudié la complémentarité entre les choix du voisinage et de l'estimateur pour le filtrage des matrices de cohérence POL(In-)SAR.

Afin d'être en mesure de compenser les composantes déterministes de la phase interférométrique, nous avons également développé un nouvel algorithme d'estimation des fréquences locales des interférogrammes topographiques qui repose sur trois principes : l'analyse multi-échelle, les voisinages adaptatifs IDAN et l'estimation de la fonction d'auto-corrélation

2D du signal de phase. Cette méthode répond en particulier au besoin d'estimer proprement la cohérence et la phase InSAR dans le milieu glacier alpin avec des données SAR haute résolution.

Dans le contexte de l'analyse des attributs issus des images POLSAR, nous avons également proposé une nouvelle approche pour la fusion des attributs polarimétriques, qui s'appuie sur les systèmes de fusion à base de règles floues. Cette approche est interactive et permet d'introduire de la connaissance experte sur le comportement des attributs POLSAR et les classes thématiques recherchées.

En conclusion, le traitement des images SAR multicomposantes représente une alternative fiable et complémentaire à l'imagerie optique pour l'observation d'objets géophysiques à la surface de la Terre. Grâce aux avancées récentes, notamment dans les domaines de la polarimétrie et l'interférométrie, l'imagerie radar est aujourd'hui utilisée dans de nombreux domaines thématiques comme la vulcanologie, l'étude de la végétation (agriculture) et de la biomasse (environnement) ou la sismologie. Un domaine où elle est encore peu utilisée malgré un fort potentiel est celui de la glaciologie. Les problèmes posés et les réponses que peuvent apporter l'interférométrie et la polarimétrie à l'étude des glaciers alpins font l'objet de la deuxième partie de ce manuscrit.

Deuxième partie

Application à l'observation des glaciers du massif du Mont-Blanc

Chapitre 5

Introduction

Sommaire

5.1 Présentation des glaciers étudiés : Mer-de-glace et Argentière . . . 97

5.2 Données SAR 101

5.2.1 Données satellitaires 101

5.2.2 Données aéroportées 101

5.3 Données de terrain 102

La fin du XX-ème siècle et le début du XXI-ème voient un recul spectaculaire des glaciers dans les Alpes [IPCC-01], [Dyur-03]. S'il est confirmé dans les années à venir, ce recul aura des conséquences importantes sur le bilan des ressources en eau, le développement économique et la gestion des risques dans les régions limitrophes [Rich-00], [Kaab-05]. En 2002, seulement 1% des glaciers tempérés étaient surveillés à travers le monde entier [Brai-02]. Généralement, la technique conventionnelle de surveillance s'appuie sur des mesures de terrain ponctuelles (balises d'ablation), effectuées une ou deux fois par an [Vinc-04]. Face aux difficultés d'accès aux points de mesure au sol dans des conditions à risque élevé (haute montagne), l'acquisition et le traitement des données de télédétection offrent une alternative aux mesures de terrains [Kaab-05], [Kaab-05a]. Récemment, les communautés géosciences et télédétection ont commencé une activité conjointe d'archivage des données de télédétection [Karg-05] pour la surveillance des glaciers, à travers des programmes internationaux comme GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space ; http ://www.glims.org) ou GLACIORISK (Survey and Prevention of Extreme Glaciological Hazards in European Mountainous Regions ; http ://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr).

Dans les Alpes, où le relief haute montagne rend nécessaire l'utilisation des techniques de télédétection, des séries de données à la fois optiques et radar sont disponibles via les agences locales d'information géographique [RGD-7374], les agences spatiales nationales (CNES) et internationales (ESA - European Space Agency). Mais l'exploitation de cette abondance de données reste une tâche difficile et l'extraction des mesures géophysiques (champs de vitesse, topographie basale et en surface ...) appartient exclusivement au domaine de la recherche scientifique jusqu'à présent. L'observation des glaciers alpins par télédétection est un exemple typique de développements méthodologiques orientés application. En effet, le déplacement des glaciers alpins (plusieurs dizaines de centimètres par jour), leur composition (glace, eau, neige, rochers), les évolutions temporelles (état de surface, accumulation/ablation dans les parties supérieures/inférieures ...) et le fort relief des montagnes qui les entourent constituent un véritable défi pour le traitement d'images satellitaires.

En particulier en imagerie radar, passer des données ERS sur la forêt tropicale à des données haute résolution sur le massif du Mont-Blanc ne peut pas se faire sans retravailler les méthodes de traitement et prendre en compte les spécificités des images et du contexte géophysique. Au delà des aspects méthodologiques, les mesures effectuées par télédétection sur les glaciers alpins sont intéressantes du point de vue géosciences car l'évolution des glaciers constitue un indicateur local des conséquences des changements climatiques globaux. Les résultats obtenus sur quelques glaciers d'une chaîne de montagnes sont généralement représentatifs de l'évolution locale [Vinc-04]. En revanche, des chaînes montagneuses situées à des latitudes comparables évoluent différemment en fonction des conditions climatiques.

Les travaux de Berthier et al. [Bert-05], [Bert-05a] ont abouti aux premiers champs de vitesse en surface de glaciers du massif Mont-Blanc. La technique utilisée se base sur la corrélation des images SPOT et présente le désavantage classique des capteurs optiques : la sensibilité à l'albédo de surface (le rayonnement visible ou proche infrarouge ne pénètre pas dans la neige ou la glace) qui peut changer fortement lors d'une chute de neige. Un capteur radar actif (comme le SAR en bande C) est en revanche insensible à la neige fraîchement tombée puisque l'onde

radar pénètre à travers la neige si elle est sèche [Gela-05]. Ainsi, les champs de vitesse dérivés par Berthier et al. sont estimés sur un intervalle de temps supérieur à 26 jours et uniquement en été (juillet-septembre) car en hiver le glacier est couvert par la neige.

L'imagerie SAR avec des intervalles d'observation de plusieurs jours est complémentaire de l'imagerie optique. Les travaux présentés dans la deuxième partie de cette thèse s'inscrivent dans le cadre de projet MEGATOR (Mesure de l'Évolution des Glaciers Alpins par Télédétection Optique et Radar - des archives à ORFEO ; http ://gipsa.lis.inpg.fr/megator), financé par une Action Concertée Incitative "Masses des données" du ministère de la recherche avec la participation du CNES (Centre National d'Études Spatiales). Les contributions personnelles autour de ce projet se situent au niveau de l'axe : **synthèse SAR et génération d'interférogrammes dans le contexte "haute montagne - haute résolution" pour mesurer les déplacements des glaciers sur une échelle de temps courte (quelques jours)** [Trou-06a], [Trou-07].

Cette partie applicative est divisée en deux chapitres correspondant aux deux types de données traitées :

- données SAR interférométriques mono-polarisation ERS 1/2 (cf. Chap. 6),
- données SAR polarimétriques interférométriques E-SAR (cf. Chap. 7).

Les caractéristiques et les mesures géophysiques envisagées sont : des champs de vitesse en surface par interférométrie SAR et la cartographie des glaciers par des techniques de classification POLSAR/POL-InSAR.

5.1 Présentation des glaciers étudiés : Mer-de-glace et Argentière

Le massif du Mont-Blanc contient la plupart des grands glaciers français. Le site test "Chamonix Mont-Blanc" (cf. Fig. 5.1) proposé par le projet MEGATOR est localisé aux frontières communes entre la France, l'Italie et la Suisse et il comprend les glaciers situés entre Le-Grand-Plateau ($45^0 50'$ N, $6^0 51'$ E ; 4000m ASL) et le glacier du Trient ($46^0 59'$ N, $7^0 01'$ E ; 2000m ASL). Nous nous intéressons particulièrement au complexe glaciaire formé de la Mer-de-glace et de ses "affluents", les glaciers de Leschaux et celui du Tacul, et du glacier d'Argentière. La Mer-de-glace et Argentière font partie des glaciers les plus instrumentés et sont visibles dans les acquisitions radar ERS descendantes (cf. Fig. 5.2 et Fig. 5.3). L'ordre de grandeur de leur vitesse d'écoulement est de 30 centimètres par jour.

La figure 5.3 donne une vue 3D du massif du Mont-Blanc à travers le radar ERS sur une orbite descendante. L'image d'élévation de la zone a été recalée avec les données SAR, ainsi qu'avec une image multi-spectrale aéroportée [RGD-7374]. Dans les deux cas, les régions correspondant à l'ombre et au repliement dans la géométrie SAR ont été mise à zéro. Ainsi, le Mont-Blanc, étant en repliement, n'est pas visible en géométrie radar ERS descendante.

Le glacier de Leschaux naît sous les crêtes des Grandes-Jorasses culminant à plus de 4000m ASL. Lors de son écoulement, il rencontre sur son flanc gauche le glacier des Périades

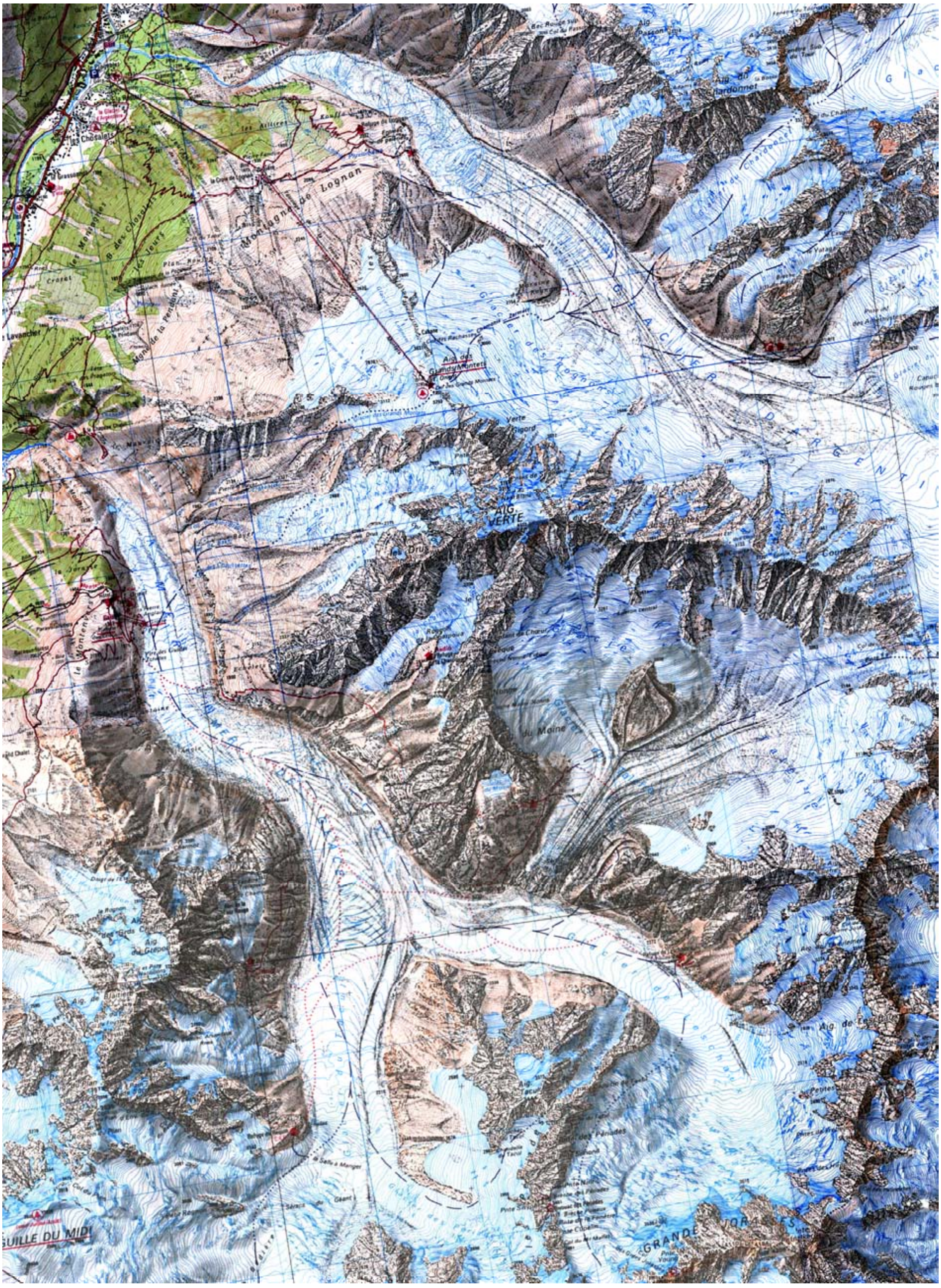
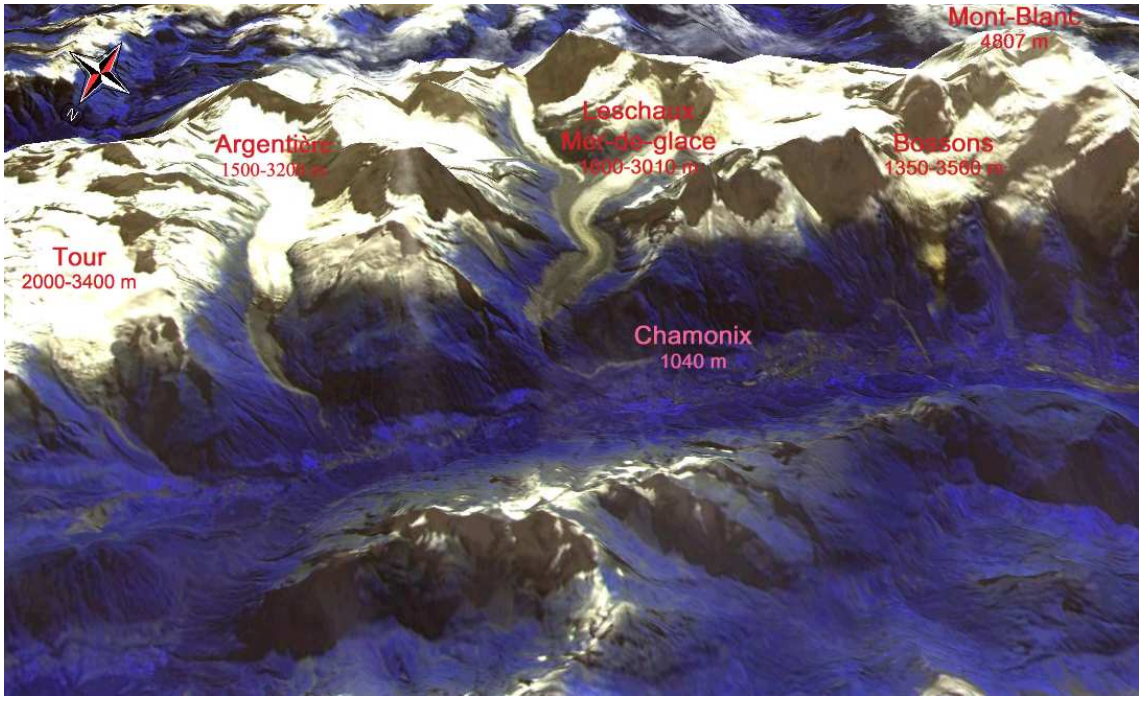
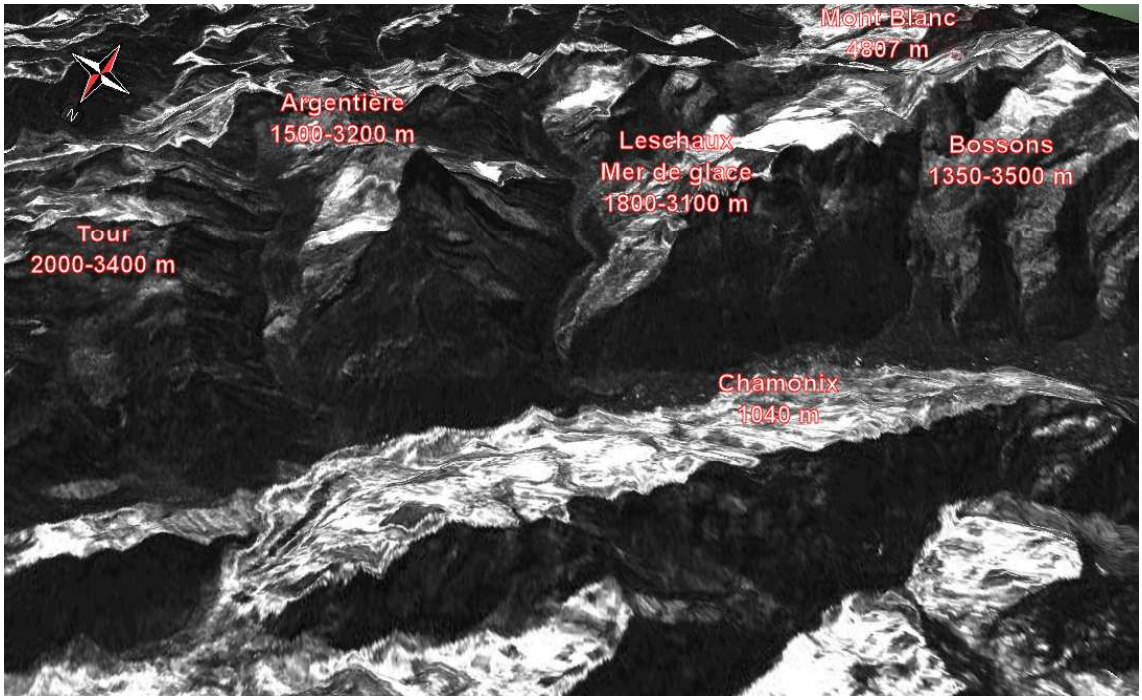


FIG. 5.1 – Carte IGN au 1 :25000 éme du site test Chamonix Mont-Blanc [RGD-7374].

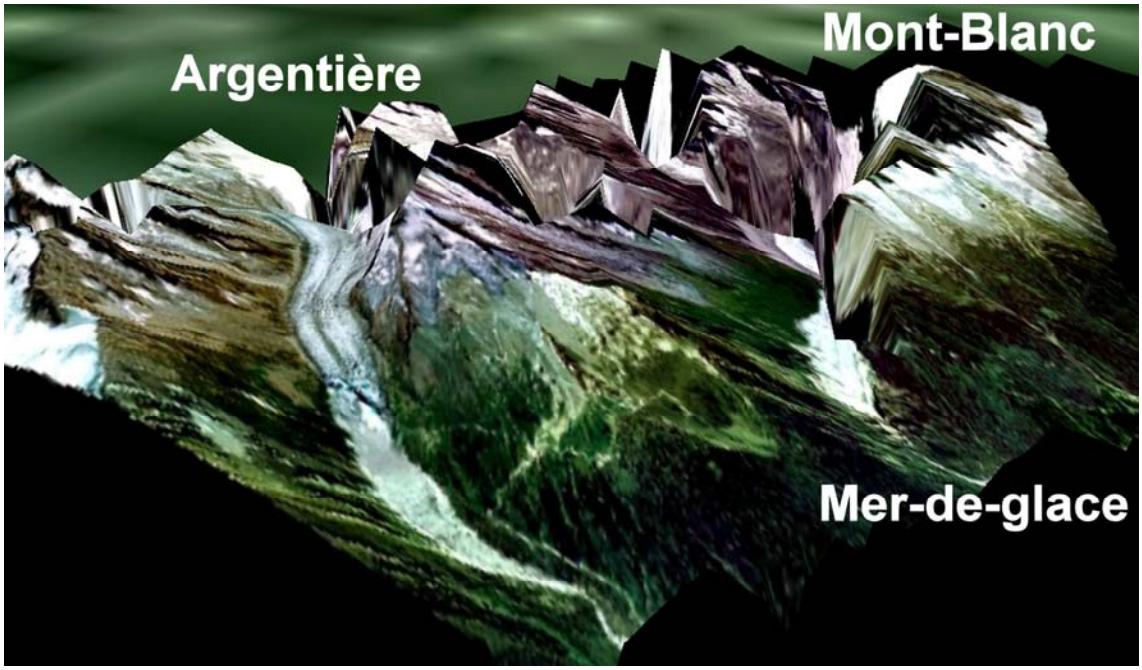


(a)

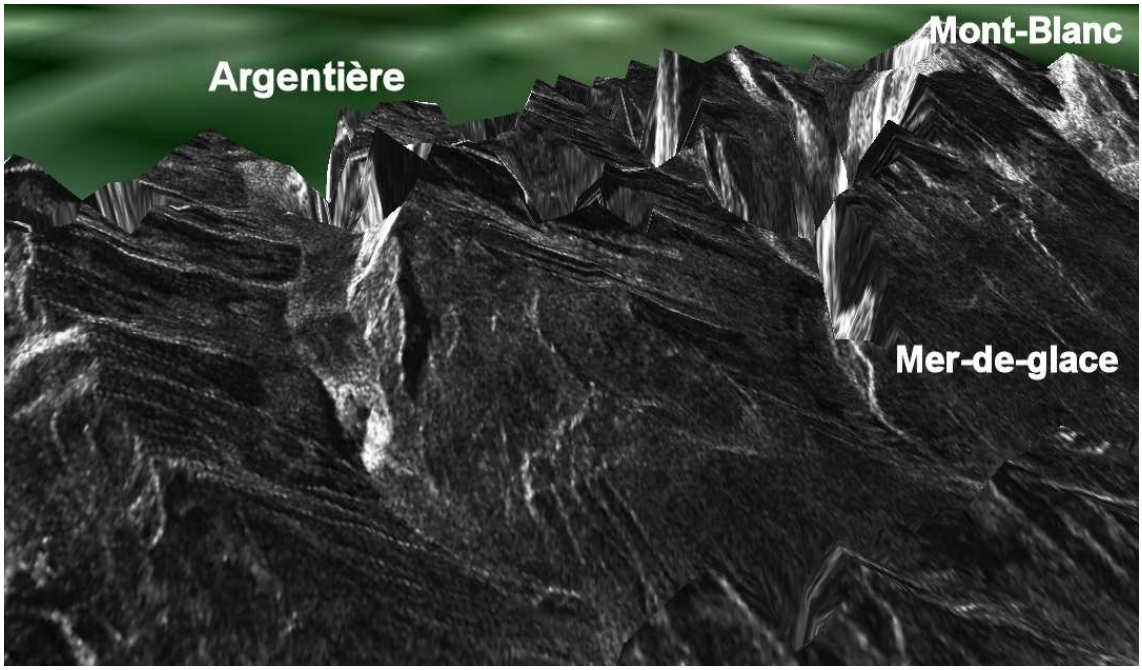


(b)

FIG. 5.2 – Le massif du Mont-Blanc, vue 3D en géométrie sol Lat/Long : (a) image SPOT2 multi-spectrale, (b) image d'amplitude SAR fournie par le satellite ERS1.



(a)



(b)

FIG. 5.3 – Le massif du Mont-Blanc, vue 3D en géométrie radar Distance/Azimut : (a) image aéroportée multi-spectrale [RGD-7374], (b) image d'amplitude SAR fournie par le satellite ERS1.

ainsi que l'énorme glacier du Tacul, héritier d'une partie des flux provenant du glacier du Géant et de la Vallée-Blanche. Ensemble, ils forment la Mer-de-Glace dont la langue terminale s'arrête peu au dessus de la commune de Chamonix. La Mer-de-Glace, en permanence alimentée par trois langues glaciaires, s'étire ainsi sur 4km depuis le point de confluence de ces glaciers, situé à environ 2150m ASL, et jusqu'au Rocher-des-Mottets, sa langue terminale atteignant aujourd'hui approximativement l'altitude de 1500m ASL.

Le glacier d'Argentière, situé à quelques kilomètres au Nord-Est de la Mer-de-Glace, s'écoule aussi vers la vallée du Chamonix, globalement dans la direction Sud-Est Nord-Ouest. Il s'étend approximativement sur 1530m de dénivelé, entre les cotes 3000m et 1470m ASL.

5.2 Données SAR

5.2.1 Données satellitaires

Par la suite, 16 données RAW ERS 1/2 ont été sélectionnées pour étudier le potentiel et les limites de l'interférométrie SAR pour extraire les champs de vitesse des glaciers du Mont-Blanc. Le jeu de données présenté dans le tableau 5.1 a été fourni par l'ESA dans le cadre des projets "Category 1" no. 1088 et no. 3525 et il comprend des acquisitions avec plusieurs écarts temporels (6 jours, 3 jours et pour les couples TANDEM à 1 jour), à différentes saisons et sur des orbites ascendantes et descendantes.

TAB. 5.1 – Données RAW ERS sur le massif du Mont-Blanc. B : base interférométrique (parallèle et perpendiculaire au LOS), e_a : altitude d'ambiguïté.

Dates	Δt	**Satel.**	**Orbites**	**Frame**	**Pas.**	$B_\parallel$**(m)**	$B_\perp$**(m)**	e_a**(m)**
17.08.91 / 20.08.91	3 j	ERS-1/1	00449 / 0492	2682	Des.	-44	-7	1202
29.08.91 / 04.09.91	6 j	ERS-1/1	00621 / 0707	2682	Des.	36	291	29
09.07.95 / 10.07.95	1 j	ERS-1/2	20830 / 1157	0909	Asc.	17	52	162
13.08.95 / 14.08.95	1 j	ERS-1/2	21331 / 1658	0909	Asc.	-37	-98	86
22.10.95 / 23.10.95	1 j	ERS-1/2	22326 / 2653	2673	Des.	-44	-107	87
31.12.95 / 01.01.96	1 j	ERS-1/2	23328 / 3655	2673	Des.	79	208	45
10.03.96 / 11.03.96	1 j	ERS-1/2	24330 / 4657	2673	Des.	26	9	935
14.04.96 / 15.04.96	1 j	ERS-1/2	24831 / 5158	2673	Des.	39	93	100

5.2.2 Données aéroportées

Une collaboration entre les équipes de recherche françaises participant au projet MEGATOR et le Centre Spatial Allemand (DLR-HR) a permis de réaliser une campagne d'acquisition des données SAR aéroportées, en octobre 2006, sur les glaciers d'Argentière, de Talèfre, de Lescahaux et du Tacul [Land-07]. Le système allemand E-SAR est un des rares système européens civils capable d'acquérir des images radar dans 4 bandes de fréquence (X, C, L et P), pleinement

polarimétriques en bande L et P, sur des passes répétées pour obtenir des données POL–InSAR avec différentes basses et différents écarts temporels.

Nous avons ainsi pu travailler durant les derniers mois de ma thèse sur les premières séries de données POLSAR et POL-InSAR (cf. Tab. 5.2) acquises sur les glaciers du site test Chamonix Mont-Blanc. L'application des méthodes proposées dans la première partie de cette thèse, telles que l'estimation adaptative des paramètres et la classification non-supervisée, nous ont permis d'effectuer l'analyse des résultats en liaison avec l'expertise acquise sur le terrain et les mesures réalisées "in situ".

TAB. 5.2 – Données SAR aéroportées acquises sur les glaciers d'Argentière, de Talèfre, de Lescahaux et du Tacul.

agence	DLR-HR	DLR-HR	DLR-HR
campagne	MEGATO	MEGATO	MEGATO
date	11.10.2006	10.10.2006	10.10.2006
capteur	E-SAR	E-SAR	E-SAR
bande	P	L	L
mode	monostatique	monostatique	monostatique
polarisation	HH, VV, XX	HH, VV, XX	HH, VV, XX
échantillonnage SLC en distance (m)	1.5	1.5	1.5
échantillonnage SLC en azimut (m)	0.72	0.45	0.45
altitude MSL (m)	6045	6045	6040
Δt (min)	-	-	16.4
$B_{\parallel}$ (m)	-	-	0.12
$B_{\perp}$ (m)	-	-	-9.79

5.3 Données de terrain

L'intérêt principal du site test proposé par le projet MEGATOR réside dans la possibilité de comparer les mesures dérivées par interférométrie SAR à des données de terrain. Ces dernières ont été fournies par l'Observatoire de Recherche en Environnement - GLACIOCLIM (Les GLACIers, un Observatoire du CLIMat ; http ://www-lgge.ujf-grenoble.fr) et sont issues des balises d'ablation implantées sur les glaciers d'Argentière et de la Mer-de-Glace par le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de Grenoble).

Les figures 5.4 et 5.5 présentent la localisation exacte des profils définis par les balises d'ablation mesurées régulièrement depuis 1994 par le LGGE. Dans ces travaux on utilise les profils suivantes :

- Mer-de-Glace : profils Montenvers, Echelets et Trélaporte ;
- Argentière : profils 4, 5, 7 et quelques points supplémentaires disponibles pour la saison 1996-1997.

La campagne MEGATOR/DLR d'acquisition d'images SAR aéroportées décrite dans [Land-07] a été couplée avec des mesures "in situ" sur le glacier d'Argentière avec notamment des mesures GPS différentiel (positions des "corner reflectors" CR et profils de vitesses), des

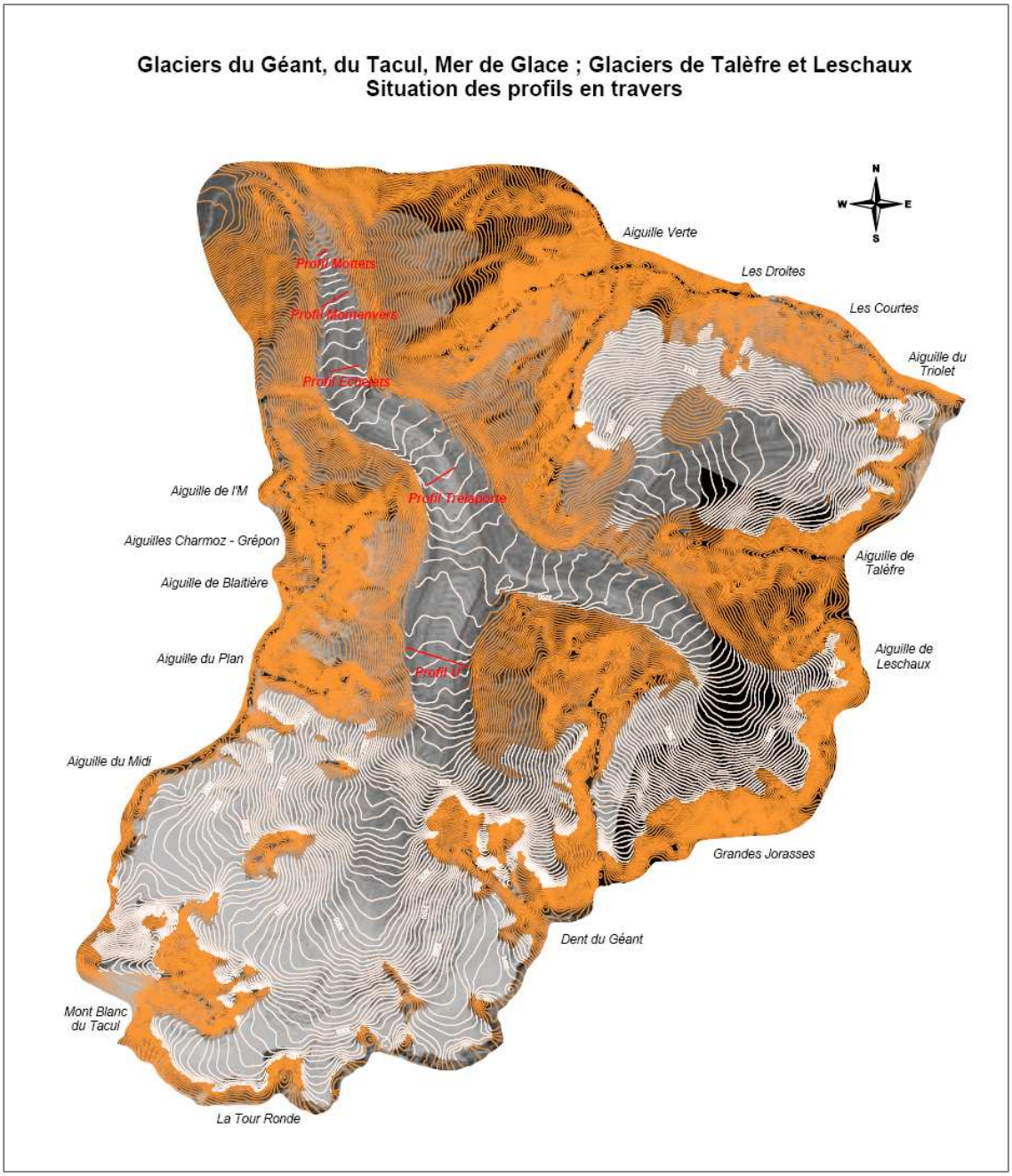


FIG. 5.4 – Données de terrain sur la Mer-de-Glace ©GLACIOCLIM.

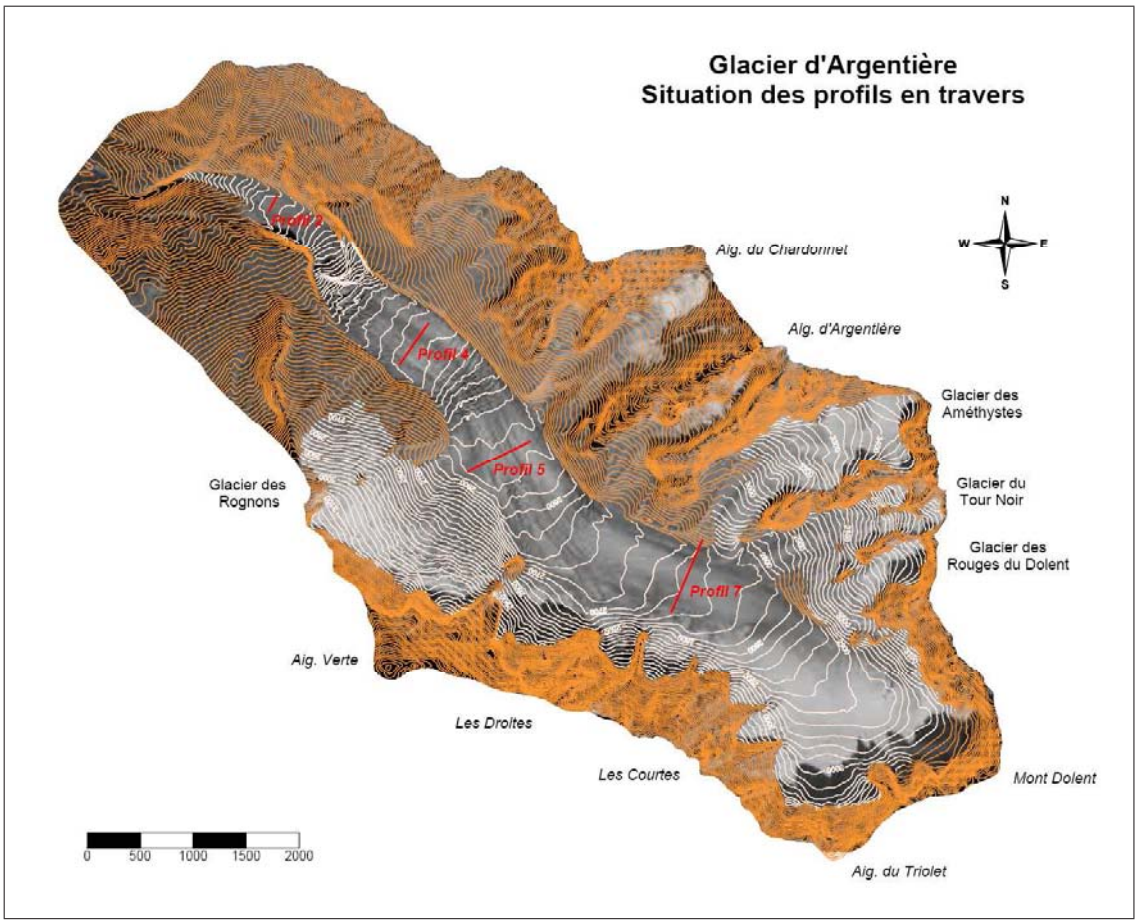


FIG. 5.5 – Données de terrain sur le glacier d'Argentière ©GLACIOCLIM.

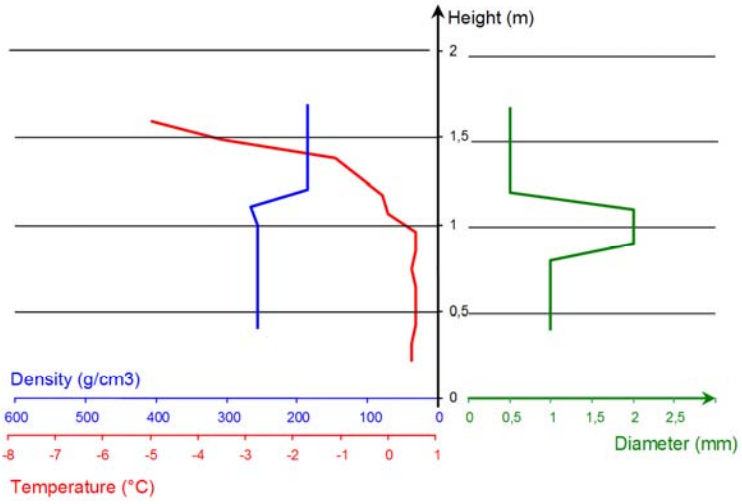


FIG. 5.6 – Données de terrain sur le glacier d'Argentière (octobre 2006). Profil stratigraphique du manteau neigeux à 2976m ASL (10/10/2006, 11h30 AM).

profils stratigraphiques de la neige et des profils GPR (Ground Penetrating Radar). Les données de terrain utilisées dans l'interprétation des résultats de classification présentés au chapitre 7 sont :

- un profil stratigraphique du manteau neigeux à 2976m ASL qui est situé à la limite de la zone d'accumulation du glacier d'Argentière (cf. Fig. 5.6),
- un profil longitudinal GPR à 250MHz (fréquence proche de celle de la bande P du système E-SAR qui est entre $300 - 400$MHz).

Chapitre 6

Déplacements des glaciers mesurés par D-InSAR

Sommaire

6.1 Synthèse SAR : DIAPSON, ROI-PAC et SYTER 108
6.2 Génération d'interférogrammes 110
6.2.1 Évaluation de la visibilité des glaciers par ERS 111
6.2.2 Analyse des résultats InSAR 111
6.2.3 Générations d'interférogrammes différentiels SAR 115
6.3 Filtrage, développement de phase D-InSAR et géoréférencement . 117
6.4 Champs de vitesse 3D 119
6.4.1 Du déplacement en ligne de visée (LOS) au champs de vitesse 3D 119
6.4.2 Comparaison avec les données terrain 121
6.4.3 Confiance de la mesure D-InSAR 123
6.5 Conclusions 126

L'interférométrie radar différentielle (D-InSAR) a très tôt été employée pour mesurer des mouvements de glaciers, principalement dans des zones polaires [Gold-93] ou à des latitudes élevées (glaciers sub-polaires) [Kwok-96] [Joug-98]. En revanche, les résultats obtenus sur des glaciers alpins (glaciers de montagne situés dans les zones tempérées) sont relativement peu nombreux [Matt-98]. A notre connaissance, il n'y a pratiquement pas de résultats publiés sur les glaciers des Alpes, à l'exception de résumés de communications : en Suisse [Stro-02] et en Italie [Ster-03] .

Le contexte des glaciers alpins diffère de celui des glaciers polaires ou sub-polaires. Il nécessite de reconsidérer certaines hypothèses et induit des limitations ou des problèmes de traitement supplémentaires [Trou-07] :

1. **Relief de haute montagne**. La visibilité des glaciers alpins situés dans des vallées étroites est réduite à cause des phénomènes d'ombre et de repliement.
2. **Taille réduite des glaciers alpins**. Typiquement, dans le massif Mont-Blanc la taille des glaciers fait approximativement une dizaine de kilomètres de long et souvent seulement quelques kilomètres de large. Cette petite taille a deux conséquences importantes du point de vue traitement : elle restreint les possibilités de filtrage avec de grandes fenêtres [Joug-98] et augmente le risque de morcellement d'un glacier en régions séparées par des zones où la phase est inutilisable.
3. **Température des glaciers**. La modification d'état de surface des glaciers alpins due à la fonte d'été entraîne une forte décorrélation temporelle pénalisante pour l'interférométrie. D'autre part, les profils mesurés sur les glaciers situés à basse altitude montrent que la température de la glace est très proche de 0° alors qu'elle est fortement négative sur les glaciers polaires.

Ces spécificités des glaciers alpins conduisent à une approche légèrement différente de la chaîne classique de traitement D-InSAR des données satellitaires. Par exemple, l'estimation des images de phase et de cohérence nécessite un algorithme de filtrage adaptatif qui doit assurer la préservation de la discontinuité entre les glaciers et les montagnes autour. Le filtrage IDAN-ML, proposé dans la première partie de cette thèse, assure un bon compromis entre la perte de la résolution spatiale induite par le moyennage multivues complexe et la réduction de bruit. Cette étape est cruciale dans la chaîne de traitement, car la projection de déplacement du glacier sur la ligne de visée du satellite est calculée en appliquant le déroulement de phase directement sur l'interférogramme filtré avec IDAN-ML. La suite de ce chapitre présente l'application de la chaîne de traitement InSAR dans le contexte particulier de glaciers alpins du massif Mont-Blanc.

6.1 Synthèse SAR : DIAPSON, ROI-PAC et SYTER

Le traitement D-InSAR des données ERS 1/2 présentées dans le tableau 5.1 a été effectué à l'aide de trois logiciels :

1. DIAPASON (Differential Interferometric Automated Process Applied to Survey Of Nature) [Mass-94],

2. ROI–PAC (Repeated Orbit Interferometry Package) [Rose-04],
3. SYTER (SYnthèse TEmporelle Radar) [Nico-07].

Le logiciel DIAPASON propose une chaîne complète de traitement D-InSAR avec une volonté d'ouverture vers les utilisateurs finaux des différents domaines d'application (sismologie, vulcanologie, ...) [Mass-94], [Mass-97]. Développé dans les années 1990 par le CNES, DIAPASON fournit de meilleures performances en utilisant des données RAW à la place des SLC. La synthèse SAR est effectuée dans le domaine spectral pour réduire la complexité algorithmique (une contrainte cruciale à l'époque). DIAPASON fonctionne en deux modes :

– *sans MNT*. Il utilise une altitude constante sur toute la scène SAR. Les résultats ainsi obtenus sont utilisables seulement pour les interférogrammes avec un gradient local d'élévation inférieur à la moitié de l'altitude d'ambiguïté. Ceci n'est pas le cas du massif du Mont-Blanc.
– *avec MNT*. DIAPASON propose l'utilisation du MNT pour la génération d'interférogrammes SAR. Les images d'amplitude, phase et cohérence peuvent être échantillonnées directement en géométrie terrain, ce qui augmente la précision de géoréférencement des données SAR. En général, nous préférons éviter cette approche car l'échantillonnage en géométrie radar permet un traitement postérieur fiable (filtrage, développement de phase).

Le deuxième logiciel de traitement D-InSAR testé sur les données du massif Mont-Blanc est ROI-PAC. Né lors des premières expériences de Zebker et al. en interférométrie SAR satellitaire [Zebk-86] et, enrichi par les contributions des différents chercheurs du JPL (Jet Propulsion Laboratory) et Caltech, le logiciel ROI-PAC a été mis en ligne en 2000 [Rose-00]. Il utilise des images RAW et des données télémétriques en combinaison avec un MNT de la scène imagée pour générer des cartes de déplacement [Rose-04]. Dans la chaîne D-InSAR proposée par ROI-PAC, le MNT intervient à trois niveaux : corrections orbitales, compensation des franges topographiques et géoréférencement des produits issus du traitement (cohérence, phase développée ou amplitude).

Pour les deux logiciels, la synthèse SAR est effectuée sous une hypothèse d'altitude constante dans la scène (l'élévation moyenne). Cette hypothèse est susceptible d'introduire des erreurs de focalisation dans les zones de hautes montagnes : la vallée de Chamonix et le sommet du Mont-Blanc présentent une différence d'élévation de presque 4000m, alors que la profondeur de champ (FOV) des images ERS est du même ordre de grandeur (quelques kilomètres). Le futur mode SAR haute résolution augmentant encore plus les contraintes de focalisation, la prise en compte d'un MNT devient nécessaire pour la synthèse SAR HR [Nico-07].

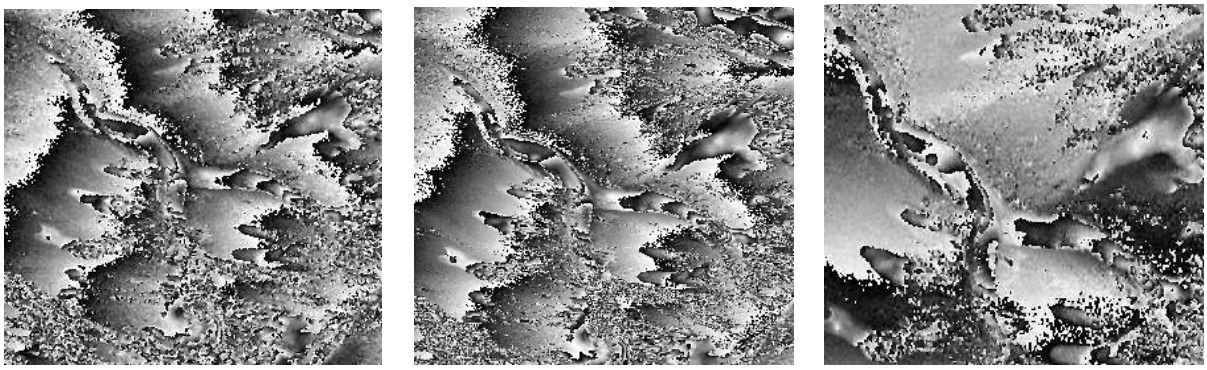
Nous avons également expérimenté le logiciel SYTER développé par Jean-Marie Nicolas à l'ENST (GET-Télécom Paris). L'approche correspond à une formation de voies dans le domaine temporel et se base sur les principes suivants [Nico-07] :

– En utilisant localement une approximation circulaire de l'orbite du satellite, combinée avec la rotation de la Terre, on calcule le déplacement relatif des points imagés par le radar. Ce calcul permet de déterminer la position exacte du CPA (Closest Point Approach), qui représente le point où la distance cible-radar est la plus faible. Toutes les positions, par rapport au CPA, des points du sol sont ensuite enregistrées dans une liste auxiliaire.
– La synthèse SAR est obtenue par sommation cohérente (dans le domaine temporel) des pixels RAW retardés suivant leur position relative au pixel à focaliser. Le retard nécessaire

pour la formation de voies est déterminé en utilisant la liste des positions relatives générée précédemment.

– Au final, des images « pseudo SLC » sont obtenues en effectuant la synthèse SAR directement sur une grille régulière à la surface du géoïde. Les deux images étant synthétisées directement dans la même géométrie, la difficulté du recalage interférométrique disparaît et les franges orbitales se trouvent éliminées par l'introduction de la base comme un décalage dans la position du satellite.

Dans le cadre du projet MEGATOR, nous avons participé à l'expérimentation de cette approche et à la publication des premiers résultats SYTER [Nico-07]. Les résultats présentés dans la figure 6.1 sur la zone du Mont-Blanc permettent de retrouver, à la surface des glaciers, des franges de déplacement comparables à celles issues des logiciels standards ROI-PAC et DIAPASON. Les différences observées dans la taille et la forme des franges sont liées à la géométrie d'échantillonnage : les interférogrammes DIAPASON et ROI-PAC sont en géométrie radar distance/azimut et le résultat SYTER est en géométrie sol.



(a) (b) (c)

FIG. 6.1 – Interférogramme différentiel TANDEM ERS 1/2, 10-11/03/1996 : (a)-(b) résultat DIAPASON et ROI–PAC en géométrie radar, après soustraction des franges orbitales, (c) résultat SYTER en géométrie terrain.

Par la suite, l'utilisation d'un MNT à la place du géoïde devrait permettre de prendre en compte dans l'approche SYTER les variations de distance dues à la topographie et d'éliminer les franges topographiques. Dans le contexte des données spatiales haute résolution, cette approche devrait permettre d'optimiser la synthèse du point de vue de la focalisation et de la corrélation.

Les résultats D-InSAR présentés dans la suite du chapitre sont obtenus en utilisant le logiciel ROI-PAC et les orbites précises fournies par l'Université de Delft (http ://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs), Pays-Bas.

6.2 Génération d'interférogrammes

Nous avons traité 10 couples ERS, dans des passes ascendantes ou descendantes, acquises à 1 et 3 jours d'intervalle sur les glaciers de la vallée de Chamonix aux différentes périodes de

l'année (cf. Tab. 5.1).

6.2.1 Évaluation de la visibilité des glaciers par ERS

Les données SAR acquises dans les zones de fort relief se prêtent mal à une interpretation directe en raison de leur géométrie spécifique : un axe échantillonné en distance radar-cible (correspondant à la nature même du radar) et un axe donné par le déplacement du porteur (direction azimutale). Du fait de l'échantillonnage en distance, la transformation qui relie la "géométrie sol" à la "géométrie radar" n'est plus bijective dès que le relief de la zone imagée comprend des pentes orientées vers le radar qui dépassent l'angle d'illumination. Avec une faible incidence (autour de 23°) les images ERS sont très vite perturbées par le phénomène de basculement à l'origine de ces problèmes de visibilité. Des zones d'ombre apparaissent également lorsque qu'une partie du relief s'interpose entre le radar et le sol et se traduisent par l'absence de signal rétrodiffusé aux distances correspondantes.

Afin d'interpréter thématiquement les données InSAR (visibilité radar, préservation de cohérence...), le fort relief de la zone (site du Mont-Blanc) rendant difficile la localisation précise des phénomènes étudiés, il est nécessaire d'effectuer des échanges entre les données radar et des données géoréférencées progressivement rassemblées au sein d'un système d'information géographique (SIG) [Jule-06]. Les logiciels SIG utilisés pour illustrer les résultats en géométrie terrain sont : ENVI (Remote Sensing Exploitation Platform), QGIS (Quantum GIS) et la gamme de produits ArcGIS (ArcMap et ArcGlobe) [Koeh-06].

L'évaluation de visibilité des glaciers par les satellites ERS dans des passes ascendantes ou descendantes a été effectuée en utilisant le MNT illustré dans la figure 6.2-(a), mise à notre disposition par la Régie de Gestion des Données des Pays de Savoie [RGD-7374]. En connaissant les paramètres du système radar ERS (altitude, angle d'incidence...), les masques de visibilité sont calculés pour les passes ascendantes et descendantes correspondant aux frames 0909 et 2673 [Jule-06]. Les deux masques sont ensuite superposés sur une image multi-spectrale SPOT 2 ortho-rectifiée et géoréférencée (Fig. 6.2-(b)). Les résultats sont illustrés dans la figure 6.2-(c),(d). On peut distinguer les zones d'ombre et les zones de repliement qui permettent de déterminer la visibilité ERS des glaciers d'Argentière et de la Mer-de-glace :

- 85% visible en configuration descendante,
- 20% visible en configuration ascendante.

En conséquence, seulement les images ERS en passes descendantes sont susceptibles de fournir des champs de vitesse D-InSAR.

6.2.2 Analyse des résultats InSAR

Une limitation importante de l'interférométrie est la préservation de la cohérence. Nous l'avons étudiée sur les glaciers de la vallée de Chamonix aux différentes périodes de l'année en traitant les données présentées dans le tableau 5.1.

Fig 6.3 présente deux interférogrammes acquis en période d'été. Dans les deux configurations

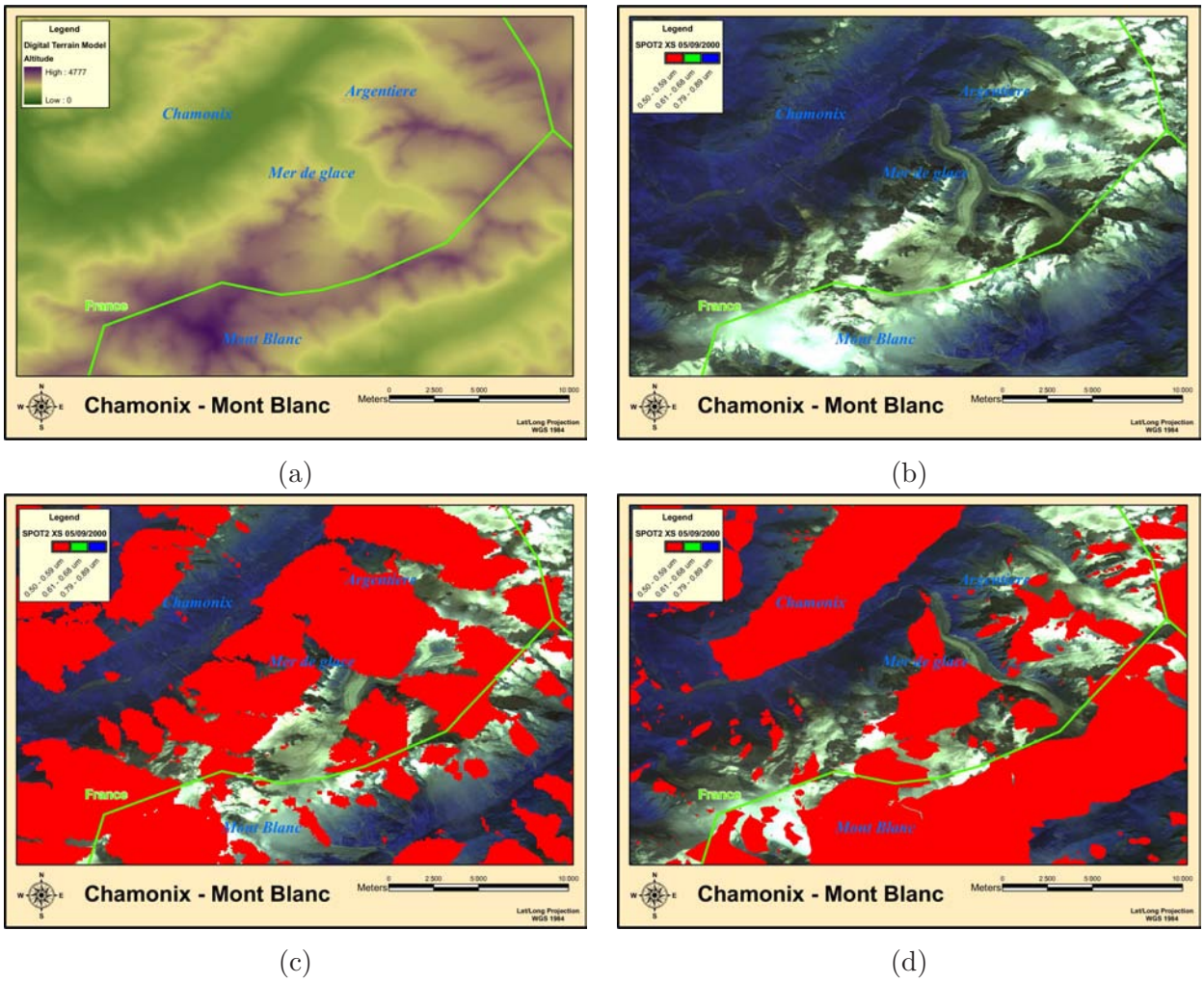


FIG. 6.2 – Évaluation de visibilité des glaciers par ERS : (a) MNT, (b) image multi-spectrale SPOT 2 ortho-rectifiée et géoréférencée, (c) masque des zones non-visibles en passe ascendante, (d) masque des zones non-visibles en passe descendante.

ascendante/descendante nous avons pu constater une perte complète de cohérence à la surface des glaciers étudiés. Ainsi, avec une bonne visibilité en passe descendante (cf. Fig 6.3-(a),(b)), la cohérence fournit même un "bon" détecteur de glaciers, les zones de rochers ou d'herbes ayant généralement une forte cohérence et les forêts un niveau moyen (selon la base perpendiculaire), séparable de celui des glaciers après filtrage. Deux phénomènes peuvent expliquer cette perte de cohérence :

1. soit un déplacement trop important (plus d'1 mètre en 3 jours) non-compensé par le recalage, les glaciers étant de petite taille par rapport à la scène,
2. soit un changement d'état de surface lié aux températures de l'été.

Nous avons pu éliminer la première hypothèse en formant, à partir d'une seule image SLC, plusieurs interférogrammes correspondant à des déplacements successifs avec un pas d'un quart de pixel. Le déplacement dans l'image SLC esclave est obtenu par suréchantillonnage de l'image SLC maître avec un facteur 4 (four–point cubic convolution [Hans-99]). La cohérence correspond dans ce cas à une fonction d'auto-corrélation normalisée et elle représente en fait la réponse

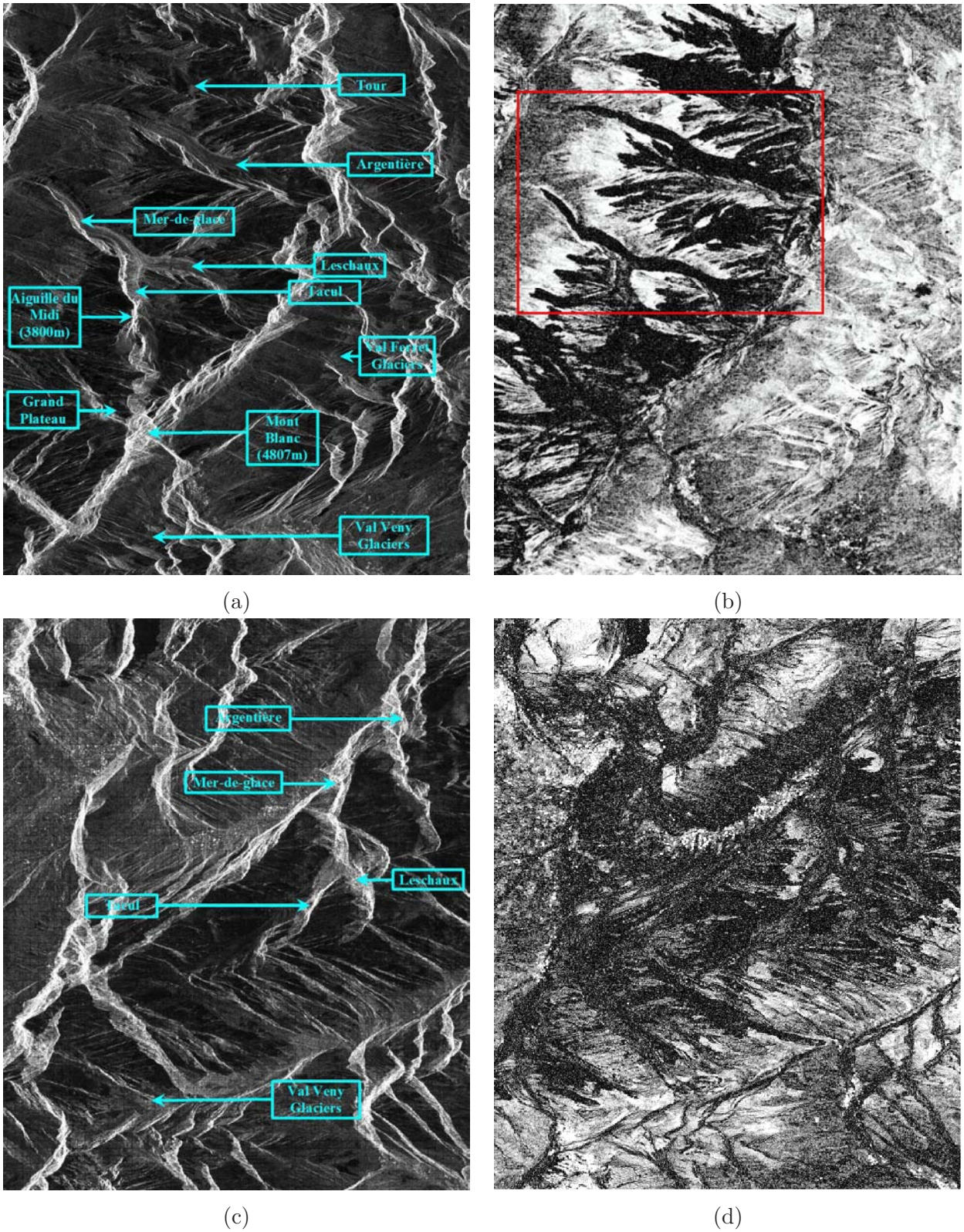


FIG. 6.3 – Interférogrammes ERS, 5-vues, massif du Mont-Blanc. ERS 1/1, descendant, 3 jours d'intervalle, été 1991, 1251×1531 pixels : (a) amplitude SAR annotée, (b) cohérence. Le rectangle indique la zoné utilisée pour illustration dans la suite de ce chapitre. ERS 1/2, ascendante, 1 jour d'intervalle, été 1995, 837 × 1024 pixels : (c) amplitude SAR annotée, (d) cohérence.

impulsionnelle [Touz-99]. On constate (cf. Fig. 6.4) que la cohérence moyenne sur un glacier chute progressivement mais reste supérieure à 0.5 sur une distance de plus de 10 mètres dans la direction d'écoulement. Cette tolérance aux erreurs de recalage s'explique par la corrélation spatiale des données et exclut par conséquent la première hypothèse.

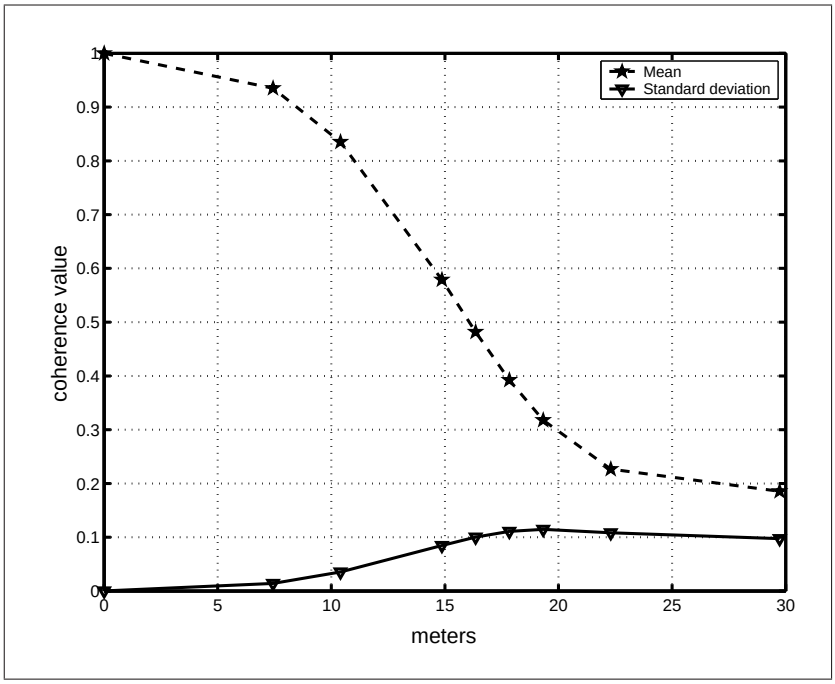
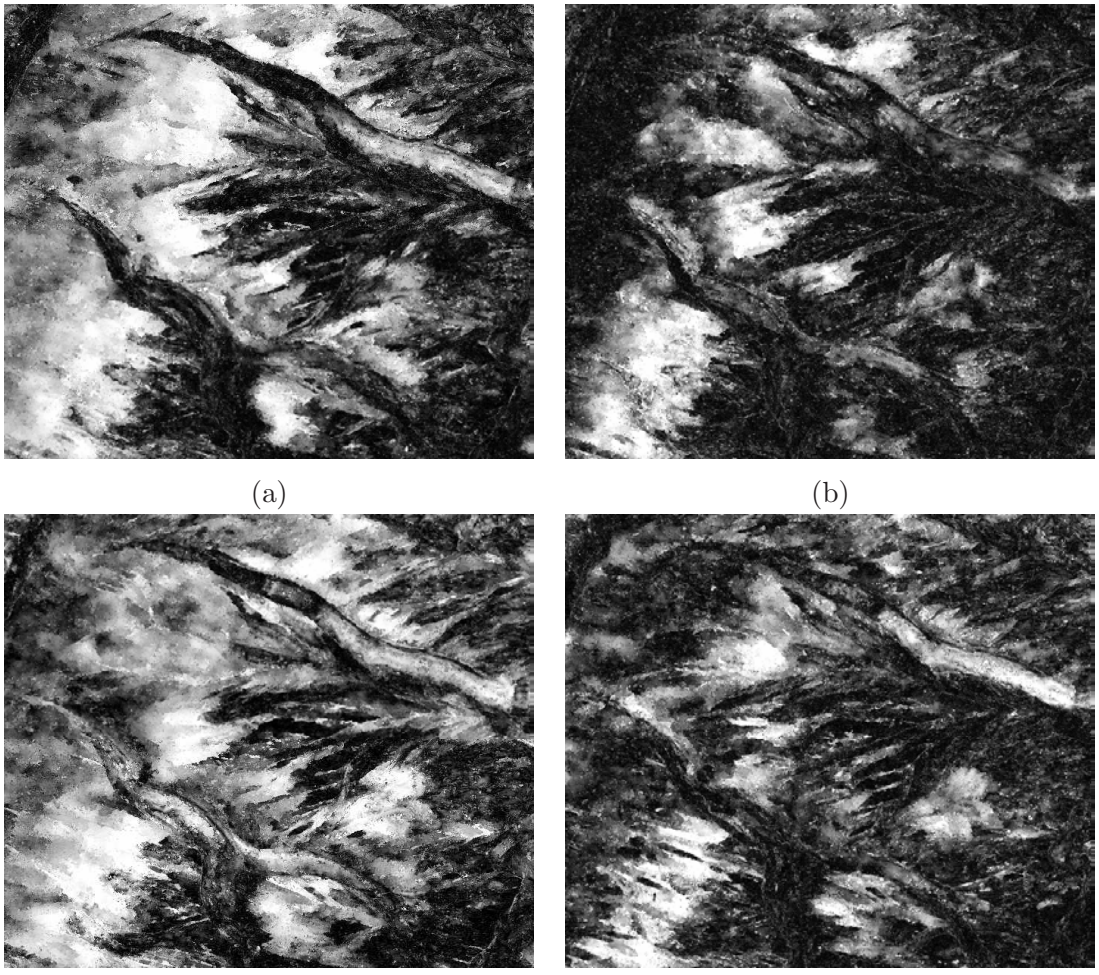


FIG. 6.4 – Cohérence interférométrique en fonction du déplacement artificiel (pas d'un quart de pixel appliqué sur une seule image SLC-17/08/1991). La moyenne et la variance de la cohérence 5-vues sont calculées sur les glaciers Mer-de-glace et Leschaux.

La seconde hypothèse est donc la plus probable. Les changements d'état de surface des glaciers, liés notamment à la fonte, aux ruissellements et aux micro-déplacements aléatoires des débris surfaciques, sont trop importants pour que la cohérence à 1 jour soit préservée. Un modèle empirique de vitesse d'ablation confirme cette hypothèse : chaque degré positif conduit à une ablation de 6.6mm par jour [Vinc-02], soit une épaisseur non-négligeable par rapport aux 5.6cm de longueur d'onde. Il est donc impossible de mesurer en été par interférométrie classique en bande C le déplacement de glaciers tels que la Mer-de-glace, Leschaux ou Argentière qui sont fréquemment situés en dessous de l'isotherme 0°.

Sur les données tandem acquises en hiver, les niveaux de cohérence mesurés fin décembre et mi-mars (Fig. 6.5-(b),(c)) sont en revanche compatibles avec la mesure de déplacement par interférométrie différentielle. La faible cohérence observée sur une grande partie du couple de 31 décembre 1995 / 1er janvier 1996 est probablement due à la décorrélation volumique en raison d'une base importante (291m). Le maintien d'une cohérence autour de 0.5 sur les glaciers indique a priori une rétrodiffusion moins volumique que dans les parties boisées. Cette interprétation renforce l'hypothèse d'une réflection surfacique en bande C au niveau de l'interface neige-glace avec une bonne pénétration dans la neige du début d'hiver. Sur les couples tandem acquis aux saisons intermédiaires, il est intéressant de constater que les parties les plus hautes des glaciers restent cohérentes alors que les langues terminales sont déjà plus décorrélées (cf. Fig. 6.5–(a),(d)).



(a) (b)

(c) (d)

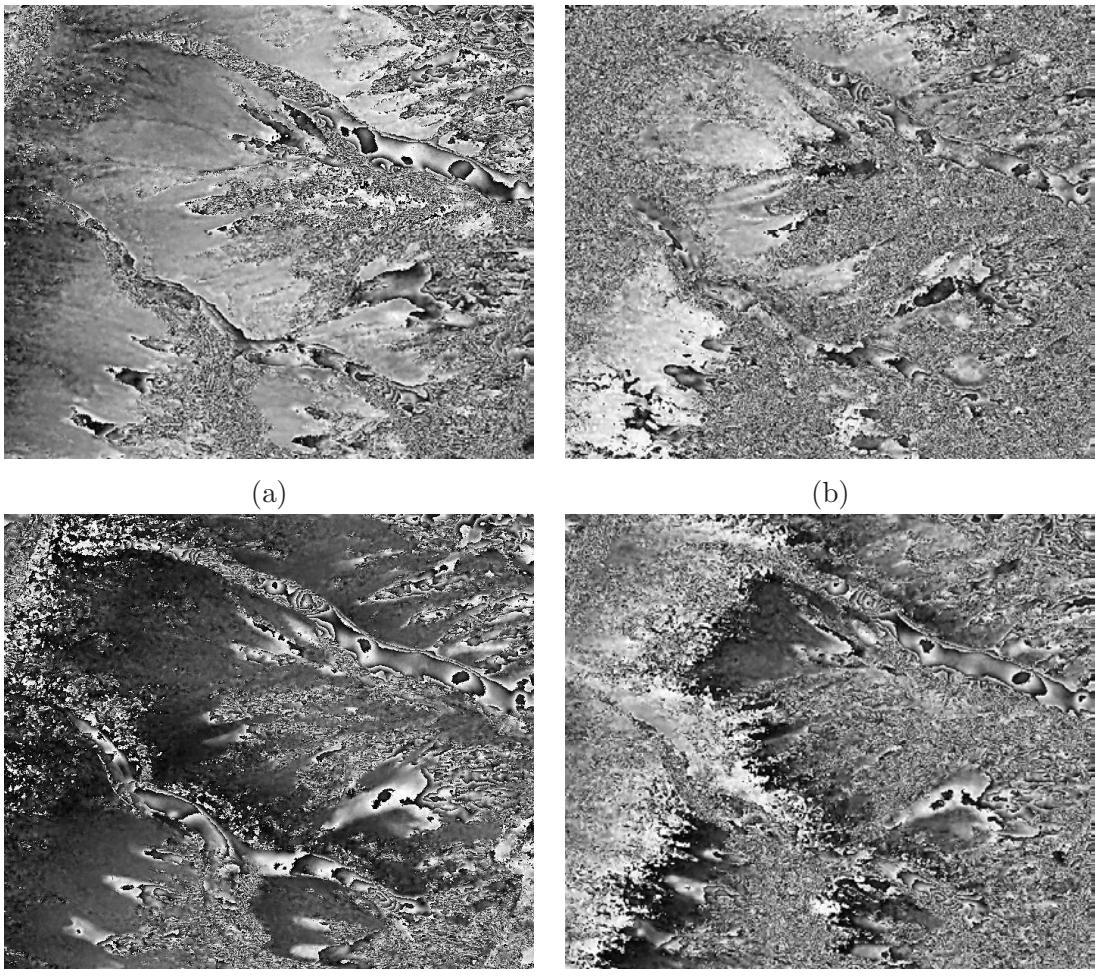
FIG. 6.5 – Cohérences IDAN-ML des interférogrammes TANDEM ERS 1/2, descendant, glaciers d'Argentière et Mer-de-glace/Leschaux, 700 × 600 pixels : (a) 22-23 octobre 1995, (b) 31 déc. 1995 - 01 jan. 1996, (c) 10-11 mars 1996, (d) 14-15 avril 1996.

On peut donc conclure qu'en hiver l'interférométrie à 1 jour en bande C permet de mesurer le déplacement des glaciers alors qu'en été la perte de cohérence est trop importante pour l'approche classique.

6.2.3 Générations d'interférogrammes différentiels SAR

En général, la phase InSAR présente plusieurs termes indépendants : franges orbitales, franges topographiques, phase de déplacement et artefacts liés aux changements atmosphériques [Mass-98]. Les composantes orbitales et topographiques de la phase peuvent être compensées en utilisant les informations orbitales et un MNT de la scène imagée par le radar. L'évaluation visuelle des interférogrammes différentiels ainsi obtenus (cf. Fig. 6.6) montre une bonne précision dans le traitement : hors des régions glaciaires, la phase D-InSAR est quasi constante selon l'axe azimut et présente des variations inférieures à un quart de frange en distance. Il est important de souligner le fait que ce résultat est obtenu dans des conditions difficiles, avec des bases perpen-

diculaires importantes et jusqu'à 4000m de dénivellé entre la vallée du Chamonix et le sommet du Mont-Blanc.



(a) (b)

(c) (d)

FIG. 6.6 – Interférogrammes différentiels IDAN-ML, TANDEM ERS 1/2, descendant, glaciers d'Argentière et Mer-de-glace/Leschaux, 700 × 600 pixels : (a) 22-23 octobre 1995, (b) 31 déc. 1995 - 01 jan. 1996, (c) 10-11 mars 1996, (d) 14-15 avril 1996.

En ce qui concerne les artefacts atmosphériques, la surface d'un glacier étant très petite par rapport à une scène ERS, seuls des changements atmosphériques locaux peuvent modifier les mesures. La vitesse de propagation dépendant principalement de la température et de la pression de vapeur d'eau (formule de Weistraub [Tara-96]), la faible pression de vapeur d'eau saturante autour de 0° rend a priori négligeables les variations de vitesse à l'échelle du glacier à 1 jour d'intervalle.

Nous avons vérifié cette hypothèse en calculent les différences de phases (cf. Fig. 6.7) entres les paires D-InSAR représentées dans la figure 6.6. L'interférogramme de référence est celui de mars 1996. Cette différences de phases est quasiment nulle pour deux couples D-InSAR consécutifs (avril/mars 1996) et elle croit avec l'augmentation de l'écart temporel entre les interférogrammes (mars/janvier 1996 et mars 1996 / octobre 1995) [Bomb-06]. Les mesures "in situ" présentées en [Hant-81] semblent confirmer cette évolution annuelle.

(a) (b) (c)

FIG. 6.7 – Différences de phases interférométriques, TANDEM ERS 1/2, descendant, glaciers d'Argentière et Mer-de-glace/Leschaux, 700 × 600 pixels : (a) avril 1996 / mars 1996 (Δt = 35 jours), (b) mars 1996 / janvier 1996 (Δt = 70 jours), (c) mars 1996 / octobre 1995 (Δt = 140 jours) [Bomb-06].

En conclusion, à l'échelle locale des glaciers alpins du massif du Mont-Blanc, les perturbations atmosphériques dans les interférogrammes différentielles ERS peuvent être considérées comme négligeables pendant le saison froide (octobre-avril).

6.3 Filtrage, développement de phase D-InSAR et géoréférencement

L'étape du développement de phase 2D est nécessaire pour transformer l'image de phase repliée en un champ de déplacement. Cette étape est difficile à automatiser, en particulier dans le contexte des glaciers tempérés en raison de nombreuses zones inexploitables et des discontinuités aux bords des parties en mouvement. La question du développement de phase est rarement abordée dans les publications qui présentent des mesures D-InSAR de déplacements de glaciers. Lorsque les auteurs ne passent pas cette étape sous silence, ils soulignent généralement la difficulté d'un traitement automatique ou décrivent une procédure proche d'un traitement manuel telle qu'un développement 1D le long d'un profil moyen au centre du glacier [Rabu-00].

Les obstacles communs aux différentes applications InSAR sont d'une part le bruit de la phase lié au niveau de cohérence et d'autre part la disparition du signal de phase due au relief (basculement), à l'aliasing (échantillonnage insuffisant). La réponse généralement apportée à ces difficultés consiste à réduire le bruit par filtrage et à limiter le développement aux zones où le signal de phase est a priori exploitable. Les interférogrammes illustrés dans ce chapitre sont filtrés en utilisant IDAN-ML. Cette approche nous semble particulièrement intéressante dans le contexte des glaciers encaissés dans des vallées alpines, car l'algorithme IDAN évite de mordre sur la moraine fixe et respecte ainsi la discontinuité entre le corps glaciaire en mouvement et les montagnes autour de lui.

Dans le contexte des glaciers alpins, parmi les deux approches du développement de phase présentées au paragraphe 2.3.5, l'approche globale nous semble préférable pour deux raisons :

1. Les erreurs de développement sont visibles et quantifiables localement à l'aide des franges résiduelles obtenues en formant la différence modulo 2π entre le résultat et la phase initiale.
2. Ces méthodes peuvent travailler aussi bien sur les différences de phases point à point (limitées à l'intervalle $[-\pi, \pi]$) que sur des estimations du gradient fournies par les fréquences locales [Trou-98], ces dernières pouvant dépasser le critère de Shannon si un modèle ou une estimation multi-résolution (cf. Sect. 3.4) permet de les mesurer.

Les résultats obtenus sur les glaciers de la vallée de Chamonix, illustrés dans la figure 6.8, ont ainsi été calculés par moindres carrés pondérés par la cohérence filtrée et un masque des parties visibles des glaciers. Les erreurs de développement mesurées sur la Mer-de-glace/Leschaux et sur la partie supérieure du glacier d'Argentière sont inférieures à une frange.

(a) (b) (c)

FIG. 6.8 – Interférogramme tandem ERS 1/2 (10-11 mars 1996) ; développement de phase sur les glaciers d'Argentière et Mer-de-glace/Leschaux par moindres carrés pondérés par la cohérence : (a) cohérence filtrée (IDAN-ML), (b) phase filtrée (IDAN-ML), (c) phase développée.

Indépendamment de la méthode utilisée, le résultat du développement de phase est obtenu sur chaque glacier (ou région connexe) à une constante additive près. Il est parfois difficile de trouver dans les parties visibles des glaciers une zone de vitesse nulle qui puisse servir au calage absolu du résultat. Il est alors nécessaire de recourir à des données externes telles que des mesures "in situ" effectuées par exemple par GPS différentiel : un point suffit à caler l'ensemble d'un champ de déplacement sur une composante connexe. L'intégration de cette donnée complémentaire se fait en projetant les vitesses mesurées "in situ" sur l'axe de visée radar et en recalant les points avec les données D-InSAR. En vue de la dernière étape, le plus simple consiste à ortho-rectifier la phase développée (cf. Fig. 6.9) et calculer ensuite les offsets qui permettent d'ajuster les deux sources de mesure.

En l'absence de mesure "in situ" aux dates d'acquisition des images ERS disponibles sur les glaciers de la vallée de Chamonix, nous avons utilisé des mesures de déplacement annuel entre 1995 et 1996 effectuées sur des balises d'ablation (cf. Sect. 5.3). Les fluctuations entre les vitesses basses (en hiver) et hautes (en été) mesurées sur ces glaciers étant de l'ordre de 30%, cet ajustement de l'offset du développement de phase est inévitablement source d'imprécision. Il faut toutefois noter que tant que la vitesse est en ligne de visée LOS, cette erreur est constante sur l'ensemble de la zone développée. Elle se distingue d'une erreur due par exemple au bruit qui varie aléatoirement d'un pixel à l'autre. De plus, ce problème d'offset inconnu n'affecte pas les dérivées du champ de vitesse utilisées pour calculer les champs de contraintes à la surface

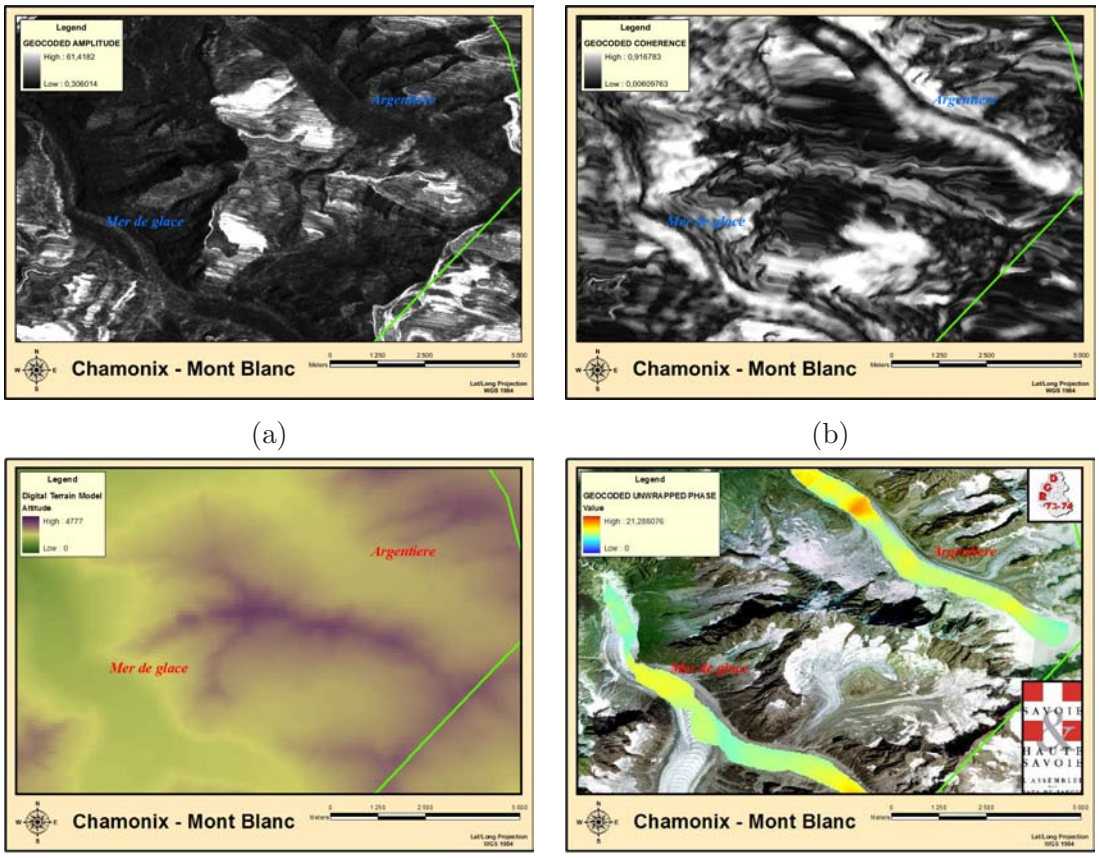


FIG. 6.9 – Géoréférencement des données TANDEM ERS 1/2 du 10-11 mars 1996, glaciers d'Argentière et Mer-de-glace/Leschaux : (a) amplitude, (b) cohérence, (c) MNT, (d) phase développée incrustée sur une image aéroportée multi-spectrale ortho-rectifiée.

des glaciers [Fors-03].

6.4 Champs de vitesse 3D

La dernière étape de la chaîne de traitement D-InSAR appliquée aux déplacements des glaciers consiste à convertir la vitesse mesurée par interférométrie radar en vitesse 3D. Les travaux présentés par la suite ont été réalisés lors de mon séjour au laboratoire GIPSA-lab (Grenoble Images Parole Signal Automatique - Institut National Polytechnique de Grenoble) grâce à une collaboration étroite avec Lionel Bombrun et Michel Gay. La suite de cette section est dédiée à la présentation des résultats finaux, la comparaison avec les données "in situ" ainsi que l'analyse de la confiance des mesures dérivées par D-InSAR.

6.4.1 Du déplacement en ligne de visée (LOS) au champs de vitesse 3D

Les glaciers étudiés n'étant visibles par les satellites ERS que dans les passes descendantes, les champs de vitesse 3D peuvent être mesurés à travers une seule composante, c'est à dire la

projection du déplacement sur la LOS des passes descendantes. L'information manquante est obtenue en utilisant un MNT, sous certaines hypothèses simplificatrices :

1. écoulement parallèle à la surface du glacier (SPF), ce qui néglige la vitesse d'émergence (réémergence) glaciaire [Reeh-99] ;
2. déplacement dans la direction de plus grande pente (SSF), qui exclut le déplacement glaciaire par glissement basal [Rabu-00].

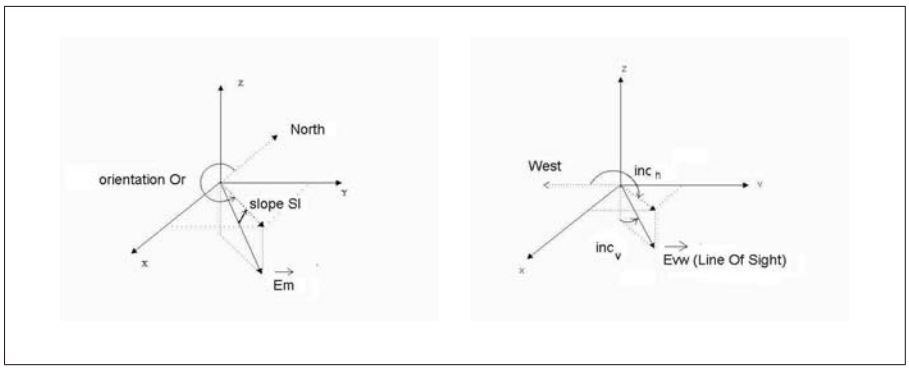


FIG. 6.10 – Angles formés entre la surface du glacier et la ligne de visée SAR (LOS).

Les étapes de l'algorithme de projection sont les suivantes :

– Les deux composantes du gradient de l'élévation sont calculées en chaque pixel du MNT. La pente Sl et l'orientation Or (cf. Fig. 6.10) sont ainsi déterminées et le vecteur unitaire $\overrightarrow{E}_m$ donne la direction de la pente locale :

$$\overrightarrow{E}_m = \begin{bmatrix} \cos(Sl).\cos(Or-\pi) \\ \cos(Sl).\sin(Or-\pi) \\ -\sin(Sl) \end{bmatrix}. \tag{6.1}$$

– Pour chaque pixel de la phase développée, l'orientation de la LOS et le déplacement suivant la direction du mouvement sont calculés. Tout d'abord, la direction du satellite est paramètrées par les deux angles d'incidence horizontale et verticale : l'incidence verticale inc_v est l'angle conventionnel d'incidence de l'onde radar et l'incidence horizontale inc_h est l'angle défini par la projection sur le plan horizontal du LOS et le parallèle géodésique locale qui passe par le point courant. Le vecteur unitaire de la LOS est donnée par :

$$\overrightarrow{E}_{vw} = \begin{bmatrix} -\sin(inc_v).\sin(inc_h) \\ -\sin(inc_v).\cos(inc_h) \\ -\cos(inc_v) \end{bmatrix} \tag{6.2}$$

– Le déplacement mesuré en ligne de visée LOS s'écrit sous la forme :

$$D_{vw} = \alpha \frac{\Phi_u}{2\pi} \tag{6.3}$$

où α est un coefficient donné par les constantes physiques (pour ERS $\alpha = 28$mm). Le module du déplacement suivant l'axe d'écoulement du glacier D_m est :

$$D_m = \frac{D_{vw}}{\overrightarrow{E}_{vw} \cdot \overrightarrow{E}_m} \tag{6.4}$$

Au final, le vecteur vitesse à la surface du glacier est calculé :

$$\overrightarrow{V}_m = \frac{D_m}{\Delta t}\overrightarrow{E}_m \tag{6.5}$$

avec Δt l'intervalle de temps entre les deux acquisitions SAR.

Nous avons ainsi calculé les mesures de vitesse obtenues avec le couple TANDEM ERS de mars 1996 sous l'hypothèse d'écoulement parallèle à la surface dans la direction de plus grande pente. Le MNT utilisé a été filtré passe bas par des fenêtres de $200 \times 200\text{m}^2$ pour éviter les variations de pente locales qui ne correspondent pas à la direction d'écoulement, mais aux motifs de crevasses [Reeh-03]. Les vitesses obtenues sont illustrées dans la figure 6.11. La cohérence ortho-rectifiée, utilisée comme "fond de carte" fournit une mesure de confiance sur la phase interférométrique initiale.

6.4.2 Comparaison avec les données terrain

Nous avons analysé la correspondance entre les mesures D-InSAR et les mesures "in situ" sur trois profils du module de la vitesse 3D issus des deux glaciers étudiés. Les mesures de vitesse moyenne annuelle disponibles sur les glaciers d'Argentière et Mer-de-glace/Leschaux (cf. Sect.5.3) ont permis une évaluation objective des résultats D-InSAR.

La figure 6.12 présente les trois profils avec les intervalles de confiance correspondant (cf. Sect.6.4.3) représentés par les traites pointillés. Le profil longitudinal sur le glacier d'Argentière (Fig. 6.12-(b)) révèle une tendance d'accélération du haut (zone d'accumulation) vers le bas (région très crevassée). Le point utilisé pour le réglage d'offset de la phase développée est le premier point du profil (le point le plus haut). D'une manière générale, le profil D-InSAR suit les variations de vitesse mesurées par les balises d'ablation.

Sur les glaciers Mer de glace/Leschaux, le profil longitudinal (Fig. 6.12-(d)) présente des vitesses faibles à proximité du glacier du Mont-Mallet et une augmentation rapide des vitesses d'écoulement. Des vitesses beaucoup plus faibles se retrouvent à la jonction Tacul-Leschaux. Ceci est dû à la pente locale faible et aux interactions entre l'écoulement des deux glaciers. Finalement, après une zone de réaccélération dans le bassin d'ablation, les vitesses diminuent sur la langue terminale de la Mer de glace. Cette évolution globale du profil de vitesse est en concordance avec les résultats publiés dans [Llib-81] à partir des mesures "in situ" et ceux obtenus récemment par corrélation des images SPOT [Bert-05].

La présence d'un artefact de traitement est observable dans la figure 6.12-(d) approximativement à 9000m de début du profil. Il s'explique par la relation d'orthogonalité entre la direction LOS et la direction d'écoulement qui fait que le dénominateur de l'équation 6.4 tend vers zéro. On peut noter que cette orthogonalité correspond à des pentes critiques à l'origine du repliement (foldover). Le masquage des zones de repliement devrait permettre d'éviter cette partie des zones non-mesurables [Trou-07].

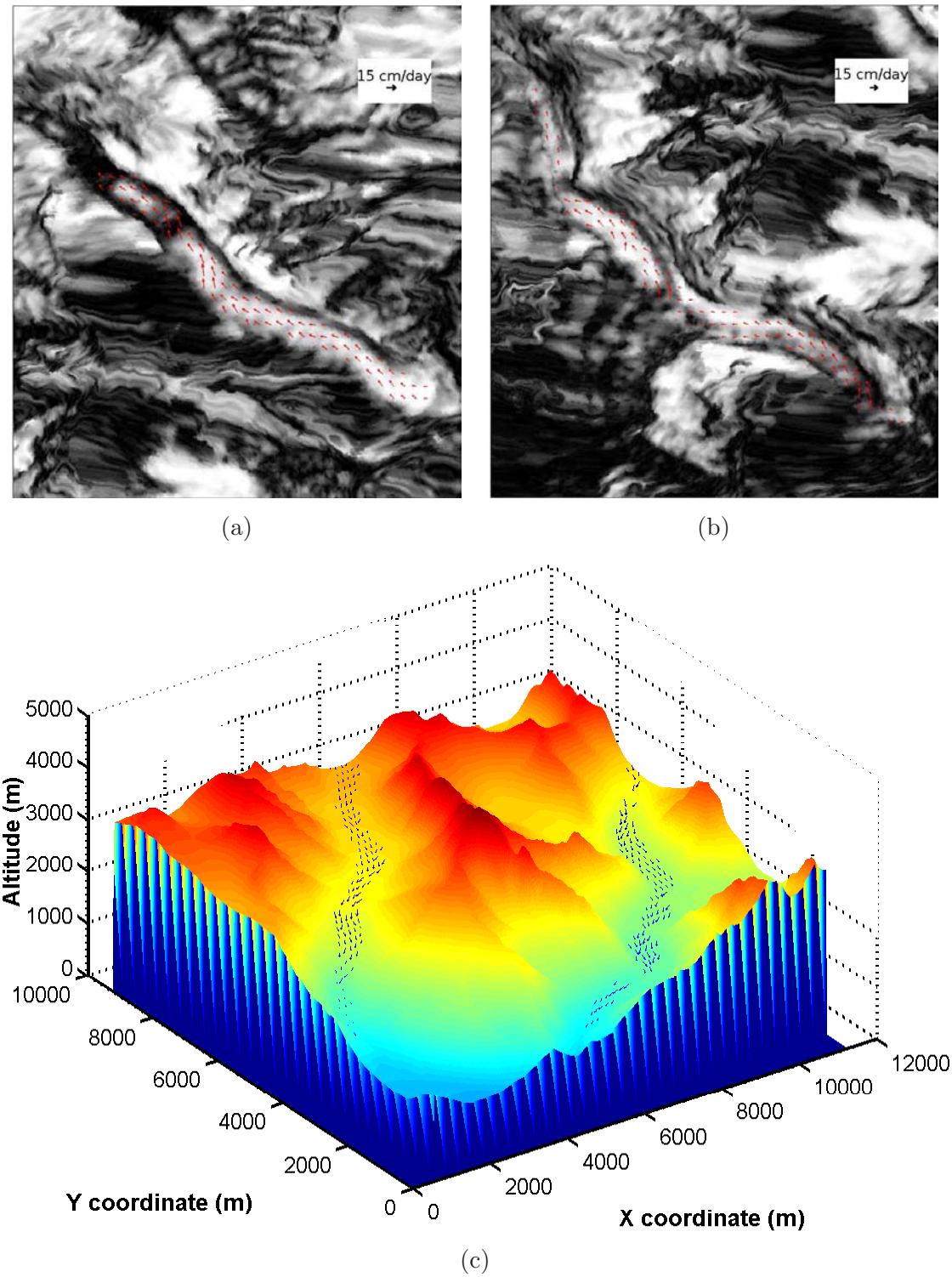


FIG. 6.11 – Champs de vitesse D-InSAR (TANDEM ERS, 10-11 mars 1996) convertis en vitesse 3D sous l'hypothèse d'écoulement : (a) - Argentière et (b) - Mer-de-glace/Leschaux, composantes horizontales superposées sur la cohérence ortho-rectifiée et géoréférencée ; (c) représentation 3D sur MNT.

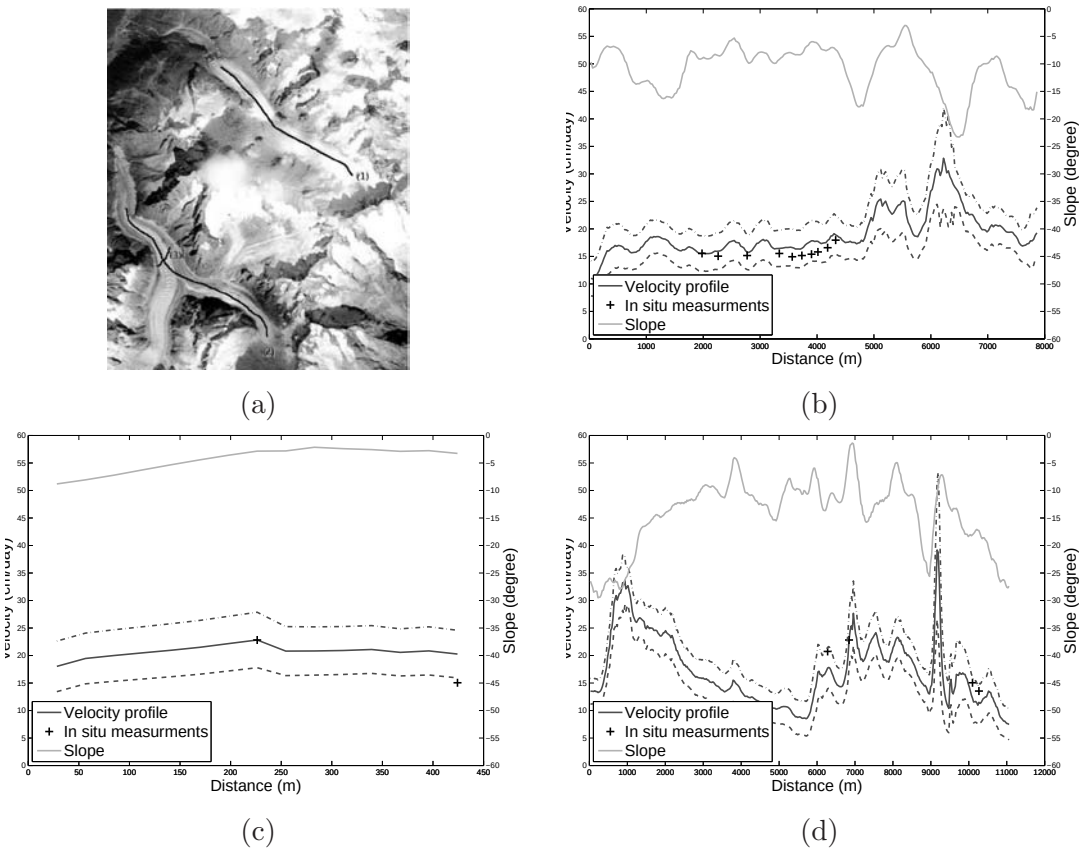


FIG. 6.12 – Profils du module de la vitesse 3D comparés aux mesures "in situ" et à la pente : (a) localisation des profils, (b) profils longitudinal sur Argentière, (c) profil transversal sur Mer-de-glace/Leschaux, (d) profil longitudinal sur Mer-de-glace/Leschaux.

6.4.3 Confiance de la mesure D-InSAR

Une étude complète sur la confiance de la mesure D-InSAR reste encore un point critique car elle nécessite des mesures complémentaires "in situ" aux dates d'acquisition des données SAR. De plus, la complexité de la chaîne de traitement D-InSAR rend difficile la simple propagation des erreurs car ces erreurs rencontrées aux différents niveaux de la chaîne ne sont pas mutuellement indépendantes.

Dans le contexte général D-InSAR, Mohr et al. considèrent les principales sources d'incertitude des mesures [Mohr-03] : les caractéristiques des données SAR, l'approche de traitement D-InSAR et les propriétés géophysiques caractéristiques des glaciers étudiés. Pour cette étude, nous pouvons considérer deux sources d'incertitude :

- l'incertitude au niveau des données et leur traitement : les paramètres liés au couple InSAR, au MNT et aux mesures "in situ" utilisées pour le réglage d'offset de la phase développée ;
- l'incertitude au niveau des hypothèses simplificatrices : écoulement parallèle à la surface du glacier et déplacement dans la direction de plus grande pente.

Incertitude au niveau des données et leurs traitements

Généralement, l'information de déplacement LOS donnée par la phase D-InSAR est affectée par trois sources d'incertitude. La première est le bruit du speckle, particulièrement dans les régions où la cohérence est faible. Le filtrage IDAN-ML a permis d'atteindre un nombre L important (jusqu'à 50 échantillons) dans la plus part des pixels tout en assurant une bonne localisation du voisinage de l'estimation pour préserver les structures spatiales à la échelle des glaciers alpins. Cette incertitude affecte chaque pixel de l'interférogramme par une variable aléatoire dont la variance peut être évaluée dans le cas marginal par la borne de Cramer Rao [Rodr-92] :

$$\sigma_\phi = \sqrt{\langle(\hat{\phi} - \langle\hat{\phi}\rangle)^2\rangle} = \frac{1}{\sqrt{2M}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}, \tag{6.6}$$

avec γ le niveau de cohérence et M le nombre de vues indépendantes utilisées par le moyennage multivues complexe pour estimer la phase $\hat{\phi}$.

La deuxième source d'incertitude provient des perturbations atmosphériques, ainsi que des franges résiduelles d'origine orbitale ou topographique [Joug-98]. Les effets atmosphériques étant négligeables dans le cas des glaciers alpins (cf. Sect. 6.2.3), une évaluation visuelle des interférogrammes D-InSAR présentés dans la figure 6.6 révèle la bonne compensation des franges orbitales ou topographiques. Celle-ci s'explique par le relief de haute montagne qui assure le recalage précis MNT-SAR : la bonne corrélation entre l'amplitude SAR réelle et l'amplitude de l'interférogramme simulée à partir du MNT (présence des zones de repliement de forte radiométrie).

La dernière source d'incertitude vient du développement de phase et du calage des offsets. L'incertitude liée au développement de phase peut être évaluée visuellement par la différence "modulo 2π" entre la phase repliée D-InSAR et la phase développée. Par itérations successives de l'algorithme de développement de phase avec des masques binaires raffinés, définis par l'expert, l'erreur résiduelle peut être ainsi minimisée. En revanche, l'erreur induite par le calage des offsets dépend de la précision des mesures "in situ" et son impacte est constante sur la totalité du champ de vitesse.

L'interférogramme D-InSAR utilisée pour l'illustration de ce chapitre présente les caractéristiques suivantes : des variations de phase D-InSAR inférieures à π (la moitié d'une frange) sur les zones stables (cf. Fig. 6.8) et un nombre de vues équivalent $M \simeq 25$, après le filtrage IDAN-ML. Nous avons utilisé ces paramètres pour calculer un intervalle de confiance autour des mesures de vitesse D-InSAR :

1. le calcul de l'incertitude LOS en additionnant $\pm\pi/2$ et $\pm\sigma_\phi$;
2. la projection de l'incertitude LOS dans la direction d'écoulement (cf. Eq. 6.4). Ainsi la valeur de l'incertitude tends vers l'infini quand la direction de la pente locale est perpendiculaire à la ligne de visée LOS.

L'intervalle de confiance obtenu par la méthode décrite précédemment est illustré dans la figure 6.12. Il ne prend pas en compte l'erreur de calage des offsets, qui se traduit par la translation verticale des profils de vitesse D-InSAR.

Incertitude au niveau des hypothèses simplificatrices

Les hypothèses simplificatrices SPF et SSF (cf. Sect. 6.4.1) utilisées pour la conversion du déplacement LOS en champ de vitesse 3D représentent des sources d'incertitude liées aux propriétés géophysiques des glaciers alpins.

La première hypothèse d'écoulement parallèle à la surface du glacier néglige la vitesse d'émergence (réémergence) glaciaire. L'incertitude liée à l'hypothèse SPF est relativement faible dans le cas des glaciers rapides situés dans les vallées alpines (relief de haute montagne) et elle affecte principalement la composante verticale de la vitesse [Joug-98]. Les erreurs dépendent de la différence entre les valeurs exactes de la vitesse d'émergence (réémergence) glaciaire et la composante verticale de la vitesse D-InSAR.

Pour les glacier étudiés, nous avons calculé le bilan de masse local sur l'année 1995-1996, à partir de relevés de terrain. Les résultats illustrés dans le tableau 6.1 montrent que l'ablation représente entre 20% et 75% du déplacement vertical annuel sur les glaciers d'Argentière et de la Mer-de-glace. En l'occurrence, l'incertitude liée à l'hypothèse SPF est non-négligeable sur une période d'observation annuelle. En revanche, le contexte d'observation D-InSAR permet de minimiser cette incertitude car la composante verticale de la vitesse est moins polluée par l'ablation entre octobre 1995 et avril 1996 (saison froide). Malheureusement, on ne peut pas vérifier cette possibilité car il n'y a pas des mesures d'ablation mensuelle "in situ" pour la période d'observation D-InSAR avec la mission TANDEM ERS.

Concernant l'incertitude liée à l'hypothèse SSF, la composante de déplacement par glissement basal d'un glacier peut introduire des variations locales dans la direction d'écoulement qui ne correspondent pas à la direction donnée par la plus grande pente. Dans le cas des glaciers d'Argentière et de la Mer-de-glace, cette hypothèse a été testée en calculant l'erreur sur la direction d'écoulement estimée à partir du MNT dans le plan horizontal (Lat/Lon). Ainsi, les différences enregistrées (cf. Tab. 6.1) entre les directions données par le MNT et celles données par les balises d'ablation est approximativement de 9^0 en moyenne. En conséquence, l'incertitude liée à l'hypothèse SSF est négligeable entre octobre 1995 et avril 1996.

TAB. 6.1 – Argentière. Mesures d'ablation annuelle "in situ" sur deux profils transversaux. Comparaison entre la direction d'écoulement mesurée "in situ" et celle calculée à partir du MNT.

Glacier	Alt.	No.	Depl. horiz.	Depl. vert.	Ablation	Erreur dir. d'écoul.	
						Moy.	RMS
Argentière	2700m	11	56.6m	-5.0m	-0.9m	8.9°	17.0°
Mer-de-glace	1900m	4	82.4m	-8.9m	-6.7m	8.4°	30.7°

6.5 Conclusions

Ce chapitre a présenté les travaux réalisés pour étudier le potentiel de l'interférométrie différentielle SAR pour la surveillance des glaciers alpins de massif du Mont-Blanc. L'analyse de plusieurs interférogrammes TANDEM ERS a montré que l'interférométrie SAR, en bande C et à un jour d'intervalle, représente une option fiable pour la spatialisation en champs denses des mesures ponctuelles "in situ". Néanmoins, les principales limitations sont :

- **La perte de cohérence en été** (entre mai et septembre) qui est une conséquence directe du changement d'état surfacique des glaciers dû à la superposition de deux phénomènes : l'ablation et le déplacement. Une direction possible pour augmenter cet intervalle d'observation D-InSAR est l'utilisation des systèmes SAR avec une bande de fréquence plus basse que la bande C (bandes L et P), jusqu'au présent disponible en mode interférométrique uniquement en aéroporté.
- **Les hypothèse simplificatrices** utilisées pour la conversion du déplacement LOS en champs de vitesse 3D. Cette limitation peut être compensée en combinant deux interférogrammes D-InSAR avec des angles de vue différents (données ERS ascendentes/descendentes) [Bech-06].

L'arrivé des satellites SAR avec une résolution spatiale métrique (RADARSAT–2, TerraSAR-X, et ALOS) représente un nouveaux défi pour l'interférométrie différentielle SAR. Les acquisitions interférométriques proposées par ces satellites, avec un écart temporel de plus de dix jours, ne présentent pas des conditions favorables à l'interférométrie SAR sur le glaciers de massif du Mont-Blanc, car la préservation de la cohérence est difficilement assurée. Ainsi, les techniques complémentaires à l'interférométrie SAR classique devront être investiguées : radargrammétrie (corrélation d'amplitude en bénéficiant de la texture renforcée par la haute résolution), PS-InSAR (permanent scatterers) [Ferr-01] ou CSS-InSAR (coherent stable scatterers) [Hoop-06],[Chaa-07].

Chapitre 7

Caractérisation des glaciers par imagerie POL(-In)SAR

Sommaire

7.1 Données POLSAR : comparaison entre les bandes de fréquence L et P 129

7.1.1 Cibles ponctuelles 129

7.1.2 Cibles étendues 132

7.1.3 Comparaison avec le profil GPR 135

7.2 Données POL-InSAR en bande L 137

7.3 Conclusions 143

Dans le chapitre précèdent, nous avons présenté l'interférométrie différentielle SAR appliquée à la surveillance des glaciers du massif du Mont-Blanc à partir de données satellitaires issues des archives ERS. Les données polarimétriques et interférométriques augmentent le potentiel de surveillance des glaciers par imagerie SAR. Ce chapitre présente les premiers résultats issus du dépouillement des données E–SAR acquises en octobre 2006. Nous illustrons notamment les possibilités de cartographie automatique de la surface (ou la partie proche de la surface) des glaciers alpins de massif du Mont-Blanc.

Dans la littérature du domaine, les applications POL-InSAR à la surveillance des glaciers tempérés sont relativement rares. Des campagnes aéroportées POL-InSAR couplées avec des mesures "in situ" ont été rapportés : Fiescherhorn (Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn, Suisse) [Steb-05] et Austfonna (Svalbard, Norvège) [Shar-07].

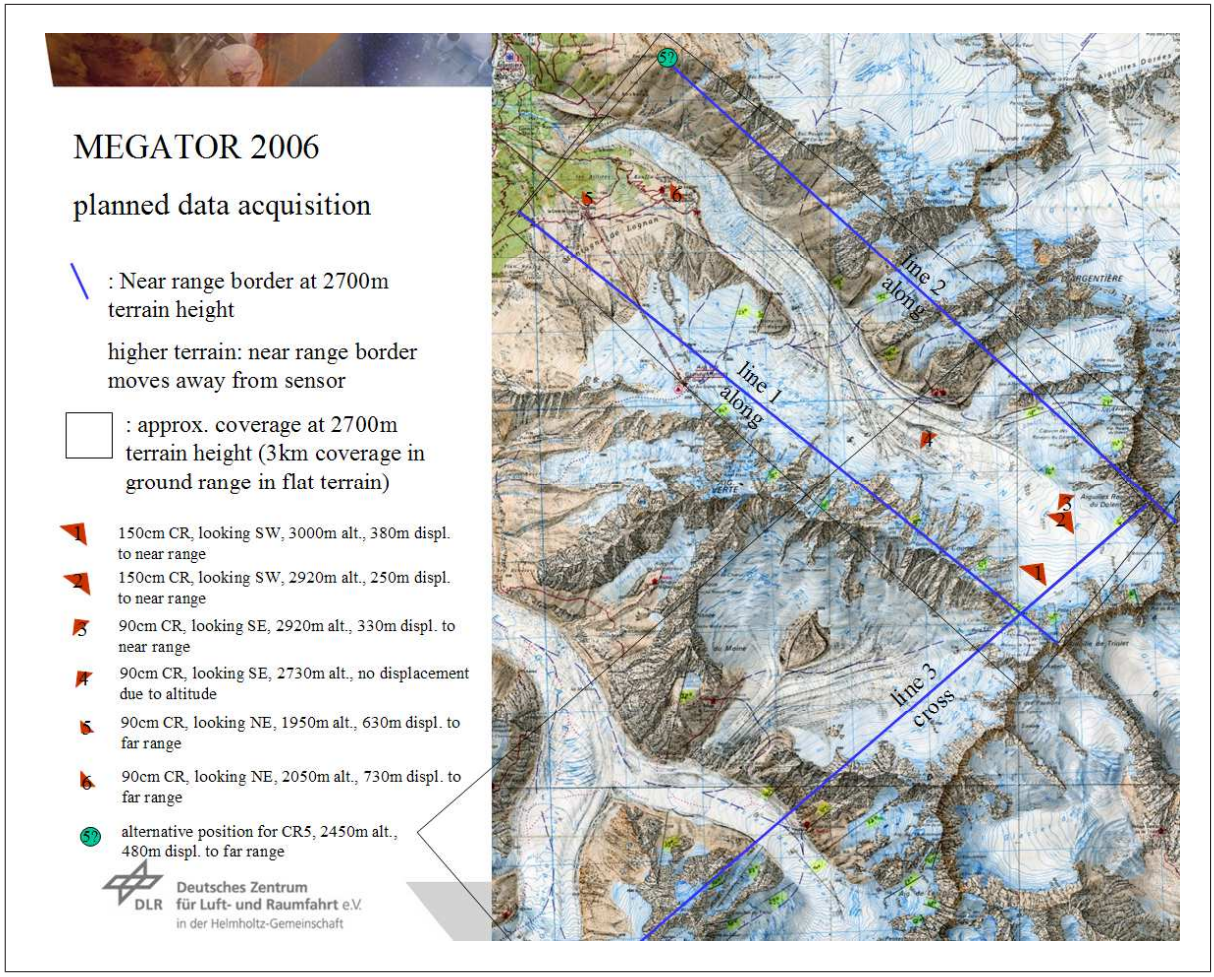


FIG. 7.1 – Directions de vol E-SAR ©DLR, massif du Mont-Blanc, campagne d'octobre 2006.

Les données POL-InSAR utilisées dans ce chapitre sont issues de la campagne aéroportée E–SAR multipolarisations et multibandes réalisée en octobre 2006 en collaboration entre le projet MEGATOR et le DLR [Land-07]. Durant les trois jours, l'avion E-SAR a survolé le massif du Mont-Blanc suivant deux directions de vol illustrées dans la figure 7.1 :

1. la direction NE-SO en visant la totalité du glacier d'Argentière,
2. la direction SE-NO en visant le bassin d'accumulation d'Argentière et les glaciers du

Talèfre, Leschaux et Tacul.

Les données SAR utilisées dans la suite de ce chapitre correspondent aux acquisitions NE-SO pour l'analyse POLSAR (bande L et P) et aux acquisitions SE-NO pour l'analyse POL-InSAR en bande L. Dans les deux cas, la synthèse SAR et le recalage interférométrique ont été effectués par le DLR en utilisant l'algorithme proposé dans [Prat-07] pour la compensation du mouvement de l'avion.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont essentiellement qualitatifs en raison des contraintes de temps. Ils sont proposés pour illustrer d'une part la mise en œvre des méthodes développées au cours de cette thèse et d'autre part, le fort potentiel de l'imagerie POL(-In)SAR pour ce domaine d'application.

7.1 Données POLSAR : comparaison entre les bandes de fréquence L et P

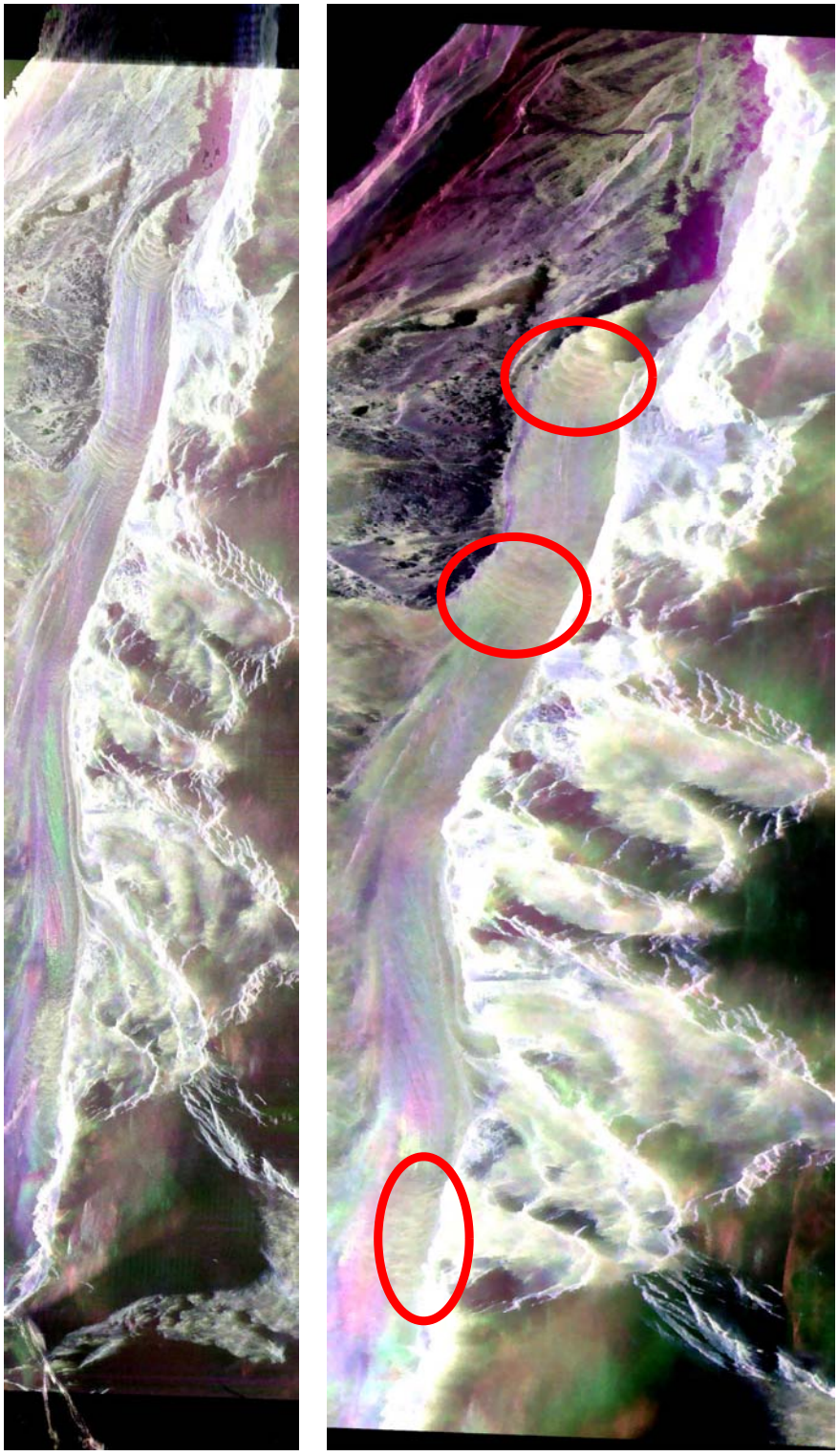
Dans cette section, nous proposons une illustration du potentiel de classification POLSAR appliqué au glacier d'Argentière. Le traitement choisi est celui présenté dans la figure 1.12 et repose sur des méthodes conventionnelles d'extraction et fusion d'informations POLSAR telles que la décomposition $H-\alpha-A$ et la classification de Wishart. Les résultats présentés pour deux bandes différentes de fréquence (L et P) ont été obtenus en utilisant les logiciels POLSARpro [Pott-07] et RAdar Tools [Neum-05].

La première étape est la mise en géométrie "isotrope" destinée au traitement. Des pixels approximativement carrés sont obtenus par moyennage multivues : 1 pixel en distance et 4 pixels en azimut. Par la suite, les images SAR ainsi obtenues sont filtrées avec IDAN-ML.

La figure 7.2 présente deux compositions colorées des composantes diagonales des matrices de cohérence polarimétrique estimées par IDAN-ML en bandes L et P, respectivement. Une interprétation visuelle directe de ces images reste difficile. Globalement, la signature radar varie dans les deux images suivant la région d'intérêt : la zone d'accumulation (en bas de l'image), la zone d'ablation (au milieu) et la langue terminale (en haut). Ces effets sont liés aux changements de l'état superficiel de la glace. Par exemple, dans la région d'accumulation, on peut identifier deux régions : neige sèche à gauche (faible exposition au soleil) illustrée aussi par le profil stratigraphique du manteau neigeux (cf. Fig. 5.6-(a)) et une couche de neige humide (approximativement $20-30$cm d'épaisseur) à droite (forte exposition au soleil). Un des facteurs déterminants qui perturbe l'interprétation directe des images présentées dans la figure 7.2 est la sensibilité à la pente locale.

7.1.1 Cibles ponctuelles

Une analyse des cibles ponctuelles est présentée dans la figure 7.3 pour la bande L. Nous avons identifié la position CR4 (cf. Fig. 7.1) sur l'image SAR illustrée dans la figure 7.2-(a). Il s'agit



(a) (b)

FIG. 7.2 – Données E-SAR, glacier d'Argentière, composition colorée dans la base de Pauli (HH-VV, 2HV, HH+VV) avec estimation IDAN–ML : (a) bande L (1133 × 5563 pixels), (b) bande P (1133 × 5563 pixels). Les trois principaux champs de crevasses du glacier d'Argentière sont entourés en rouge.

d'un des "corner reflectors" pour la bande L, utilisés dans la phase de calibration des données. Leur réponse dans l'image d'amplitude HH+VV est illustrée dans la figure 7.3-(a) avant filtrage et dans la figure 7.3-(b) après filtrage par IDAN-ML. Le filtrage IDAN-ML assure une bonne préservation de la résolution spatiale car le lobe principal du sinus cardinal est conservé. Autour de ces réflecteurs, le speckle est considérablement réduit sur la région homogène.

Nous avons également illustré les signatures de deux cibles ponctuelles, obtenues après filtrage IDAN-ML. La figure 7.3-(c),(d) présente la réponse du radar sur deux blocs erratiques qui sont en contact avec la surface du glacier. Ces roches se déplacent à la même vitesse que le glacier et elles représentent d'éventuels candidats pour les mesures de vitesse par la technique CSS-InSAR (suivi des cibles) [Hoop-06]. Ainsi, contrairement aux images SAR ERS (approximativement 20×20m), la haute résolution spatiale des données aéroportées E–SAR (approximativement 1.5×1.5m) devrait permettre d'extraire des informations locales sur la vitesse des cibles ponctuelles.

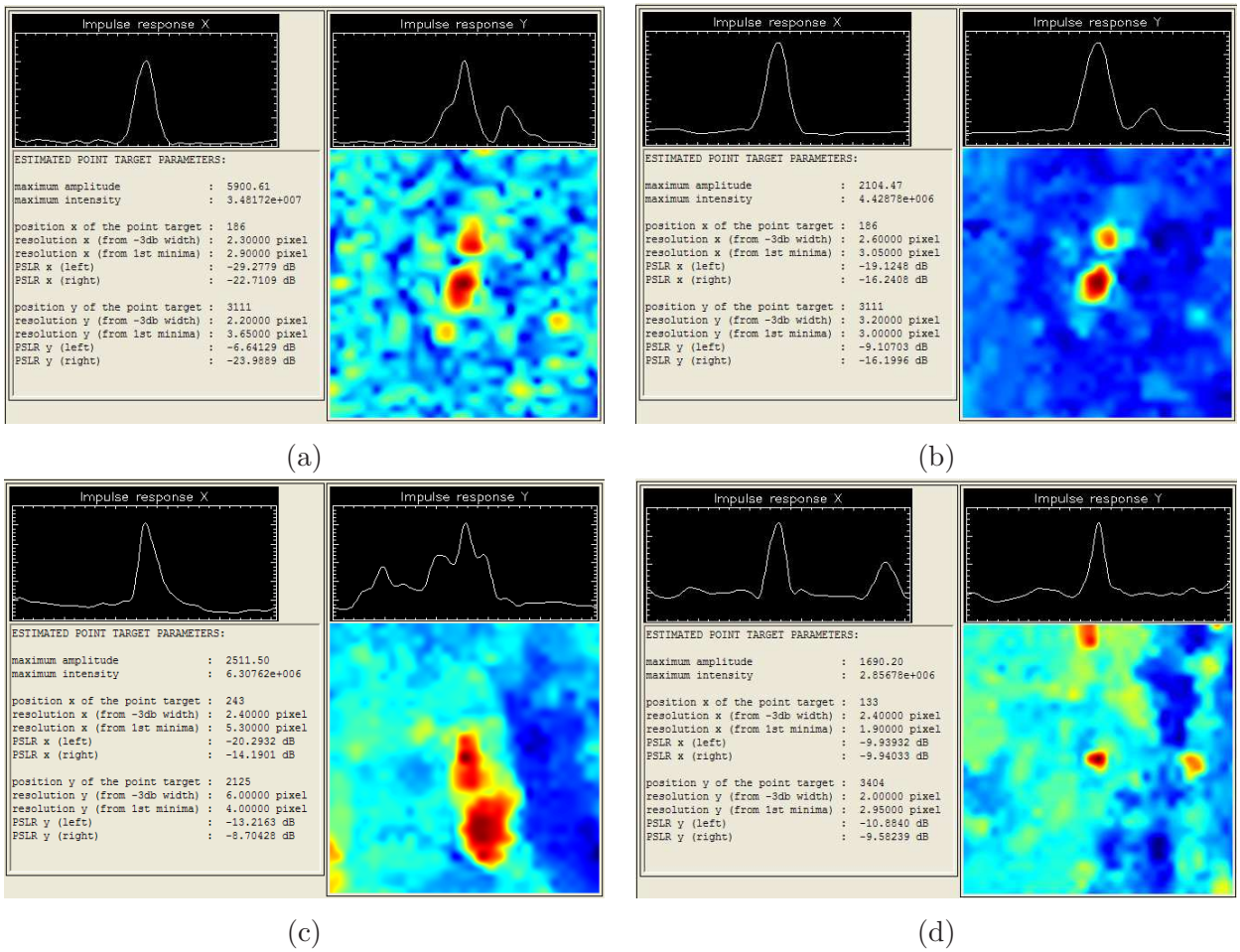


FIG. 7.3 – Données E-SAR, glacier d'Argentière, bande L, évaluation des cibles ponctuelles sur l'image d'amplitude HH+VV. "Corner" réflecteurs à la position CR4 (cf. Fig. 7.1) : (a) image originale et (b) image filtrée avec IDAN-ML. (c) et (d) sont deux cibles naturelles (blocs erratiques) dans l'image d'amplitude filtrée par IDAN-ML.

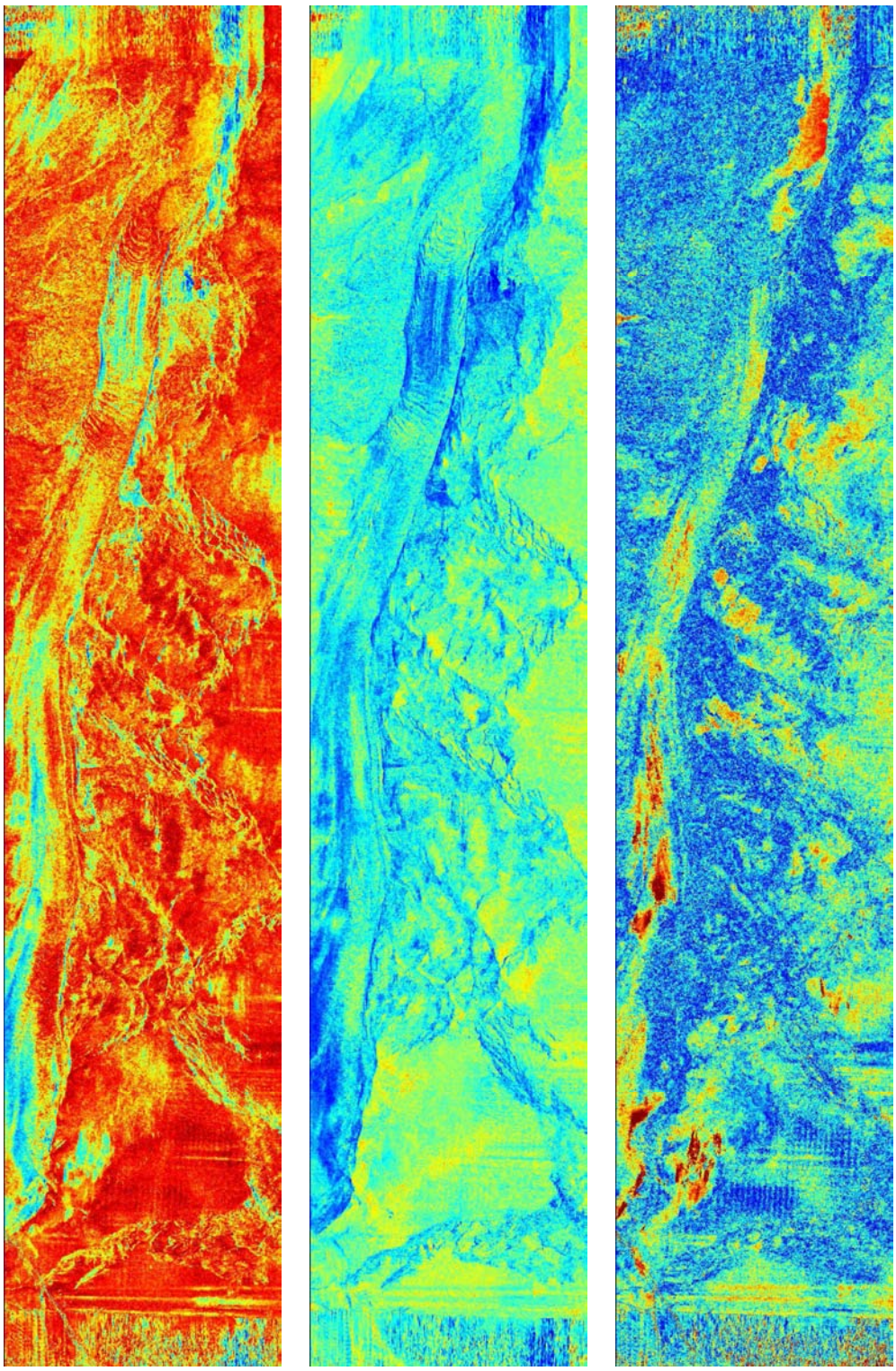
7.1.2 Cibles étendues

Les mécanismes de rétrodiffusion décrits par les matrices de cohérence polarimétriques, correspondant aux deux bandes de fréquence, sont analysés à travers les paramètres $H - \alpha - A$. La figure 7.4 présente ces trois paramètres obtenus pour l'acquisition E–SAR en bande L. Dans le milieu glaciaire, on constate que l'entropie prend des valeurs élevées sur la plupart des régions. Visuellement, trois régions peuvent être perçues dans la figure 7.4-(a) : les régions représentées en rouge (entropie forte), en jaune (entropie moyenne) et bleu-vert (entropie faible). Ces régions correspondent aux mécanismes des rétrodiffusion décrits par le paramètre α (cf. Fig. 7.4-(c)). On observe notamment la présence de crevasses à l'origine de la rétrodiffusion en double rebond. Dans les données POLSAR en bande L, seules les crevasses avec une orientation appropriée vers l'axe de visée du radar (LOS) peuvent être caractérisées à travers l'angle α. Au contraire, dans les parties du glacier suffisamment lisses, le mécanisme de rétrodiffusion prédominant reste le simple rebond. L'information supplémentaire apportée par le troisième paramètre A affine la caractérisation des différents mécanismes de rétrodiffusion en décrivant le mélange de deux ou trois mécanismes.

La décomposition $H - \alpha - A$ est appliquée ensuite aux données E–SAR en bande P. Les résultats illustrés dans la figure 7.5 sont globalement cohérents avec ceux obtenus pour la bande L. Par contre, l'intérêt majeur d'une bande de fréquence plus basse repose sur la profondeur de pénétration de l'onde radar : si le comportement des paramètres $H - \alpha - A$ semble quasiment identique (simple rebond) dans les parties lisses du glacier, la pénétration dans la glace des crevasses induit une transformation du mécanisme de double rebond en rétrodiffusion volumique. La description des régions crevassées en bande P par des cibles distribuées devrait ainsi renforcer la détection des crevasses par des méthodes de segmentation de l'espace $H-\alpha-A$, car le résultat est moins sensible à l'orientation par rapport à l'axe de visée LOS.

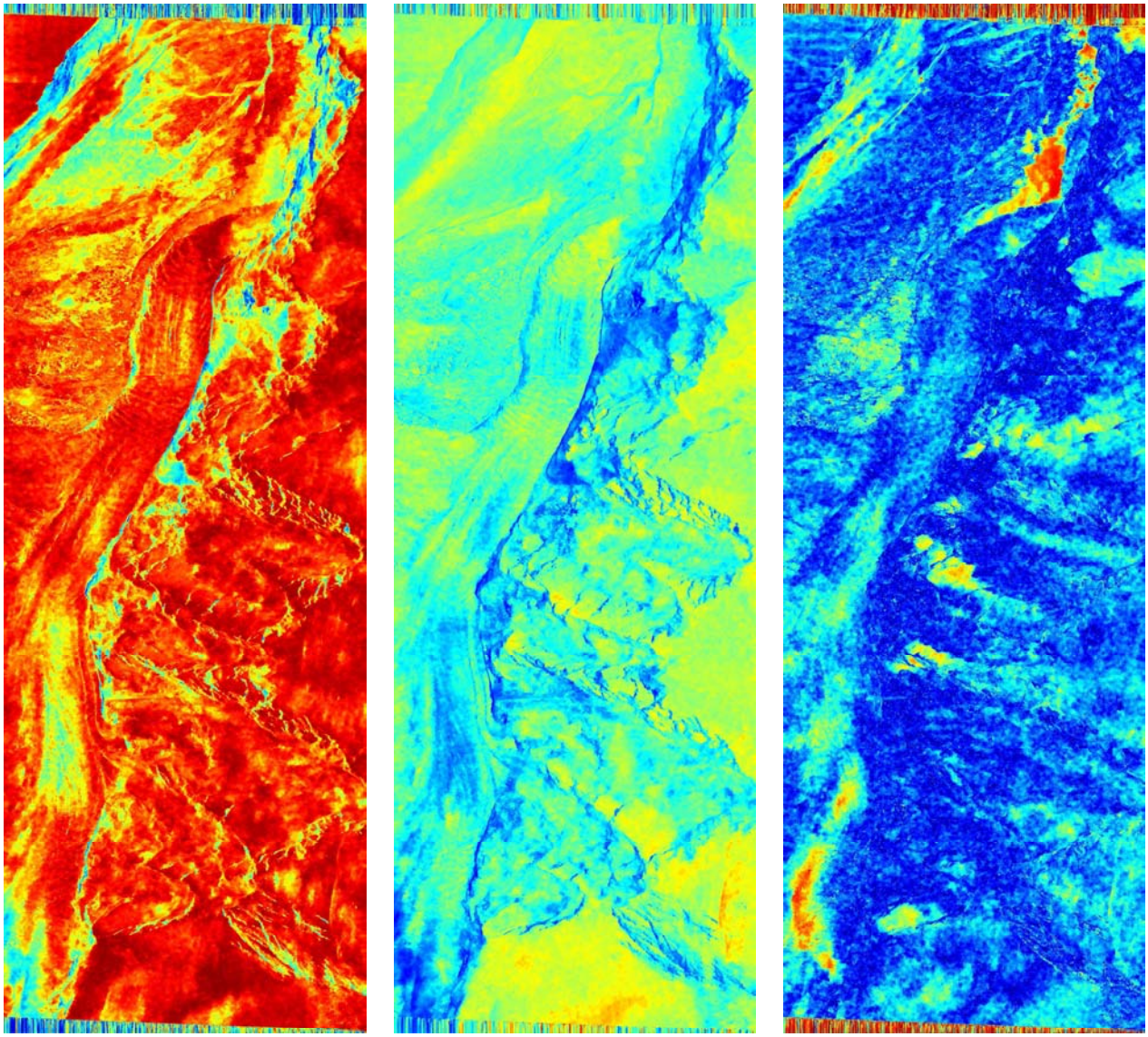
La figure 7.6 présente les histogrammes conjoints des paramètres $H - \alpha - A$ pour les deux bandes de fréquences : entropie/alpha, anistropie/alpha et entropie/anisotropie. Chacun parmi ces trois plans peut être ensuite segmenté suivant les règles nettes proposées dans [Clou-96], [Fami-01] et décrites dans la section 1.7.1. Les résultats de classification dans l'espace entropie/alpha sont illustrés dans la figure 7.7. Contrairement aux observations visuelles présentées dans le paragraphe précédant, les paramètres $H - \alpha$ issus des données en bande L conduisent à une interprétation du mécanisme de rétrodiffusion volumique (couleur verte dans la figure 7.7) qui peut s'expliquer par la combinaison des deux phénomènes :

- **la profondeur de pénétration non-négligeable en bande L**. La glace des crevasses est traversée par l'onde radar pour les champs de crevasses caractérisés par une épaisseur inter-crevasses assez faible (e.g. les champs, entourés en rouge dans la figure 7.2-(b)). Néanmoins, ceci n'est pas suffisant pour déterminer avec une bonne spatialisation l'intégralité des régions crevassées et le résultat ainsi obtenu reste sousestimé.
- **la sous-estimation du paramètre** α. Le filtrage par multivues complexe utilise des échantillons pour estimer localement la matrice de cohérence polarimétrique. Pour l'entropie un nombre important d'échantillons est nécessaire (entre 60 et 120) [Lope-05], [Touz-07a]. En revanche, l'accroissement de la taille du voisinage entraîne une sous-estimation de l'angle



(a) (b) (c)

FIG. 7.4 – Décomposition H-α-A, données E-SAR, glacier d'Argentière, bande L : (a) entropie, (b) angle α, (c) anisotropie.



(a) (b) (c)

FIG. 7.5 – Décomposition H-α-A, données E-SAR, glacier d'Argentière, bande P : (a) entropie, (b) angle α, (c) anisotropie.

α sur des milieux naturels. En utilisant approximativement 50 échantillons (valeur recommandée dans [Lee-06a]) dans le calcul IDAN-ML de la matrice de cohérence, on obtient un angle α légèrement sous-estimé et donc la limite moins nette entre les mécanismes de double rebond et volumique. Cette observation est en concordance avec l'analyse présentée dans [Lee-06a].

La classification $H-\alpha$ issue des données E-SAR en bande P est illustrée dans la figure 7.7-(b). L'évaluation visuelle du résultat, mise en correspondance avec la connaissance "in situ" acquise pendant le déroulement de la campagne E-SAR, nous indique une bonne localisation des champs de crevasses à travers les classes correspondant à une rétrodiffusion volumique dans le milieu glaciaire. Ainsi, les images radar POLSAR en bande P sont susceptibles de fournir une bonne caractérisation des régions crevassées pour les glaciers alpins.

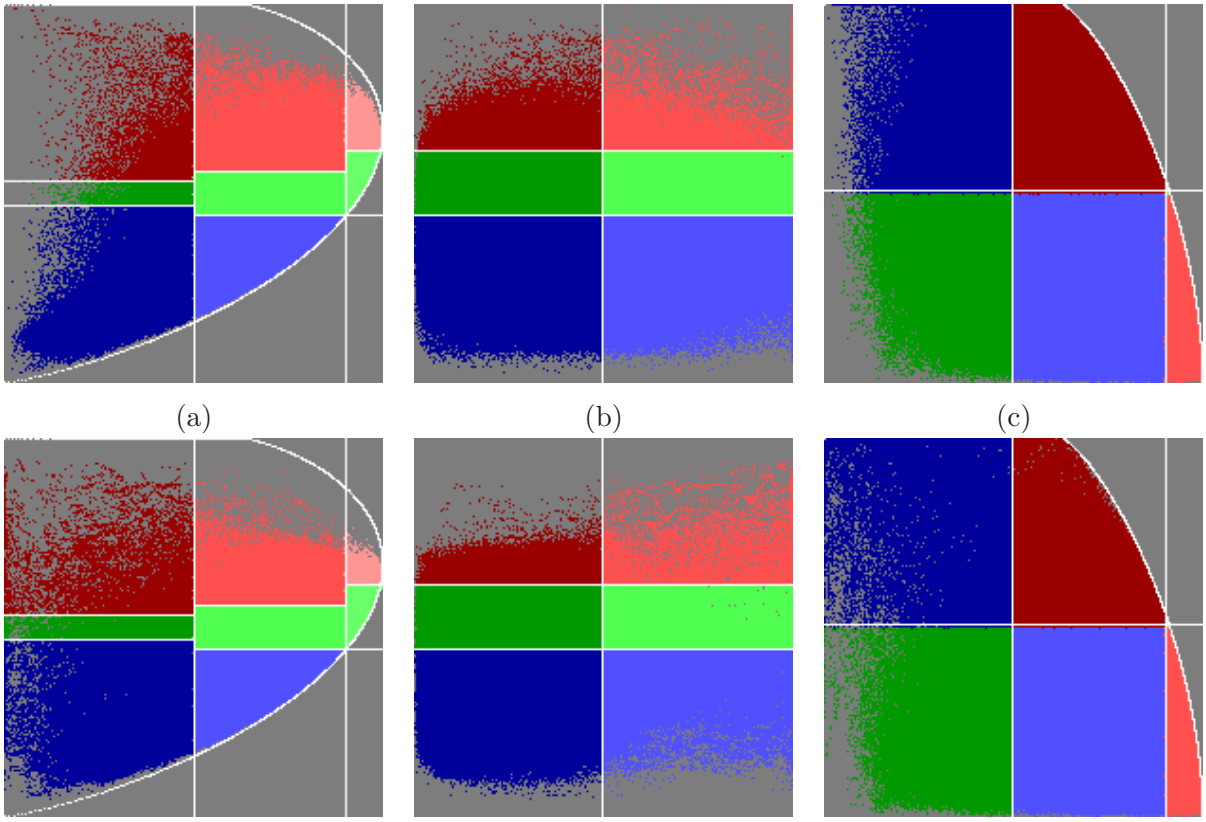
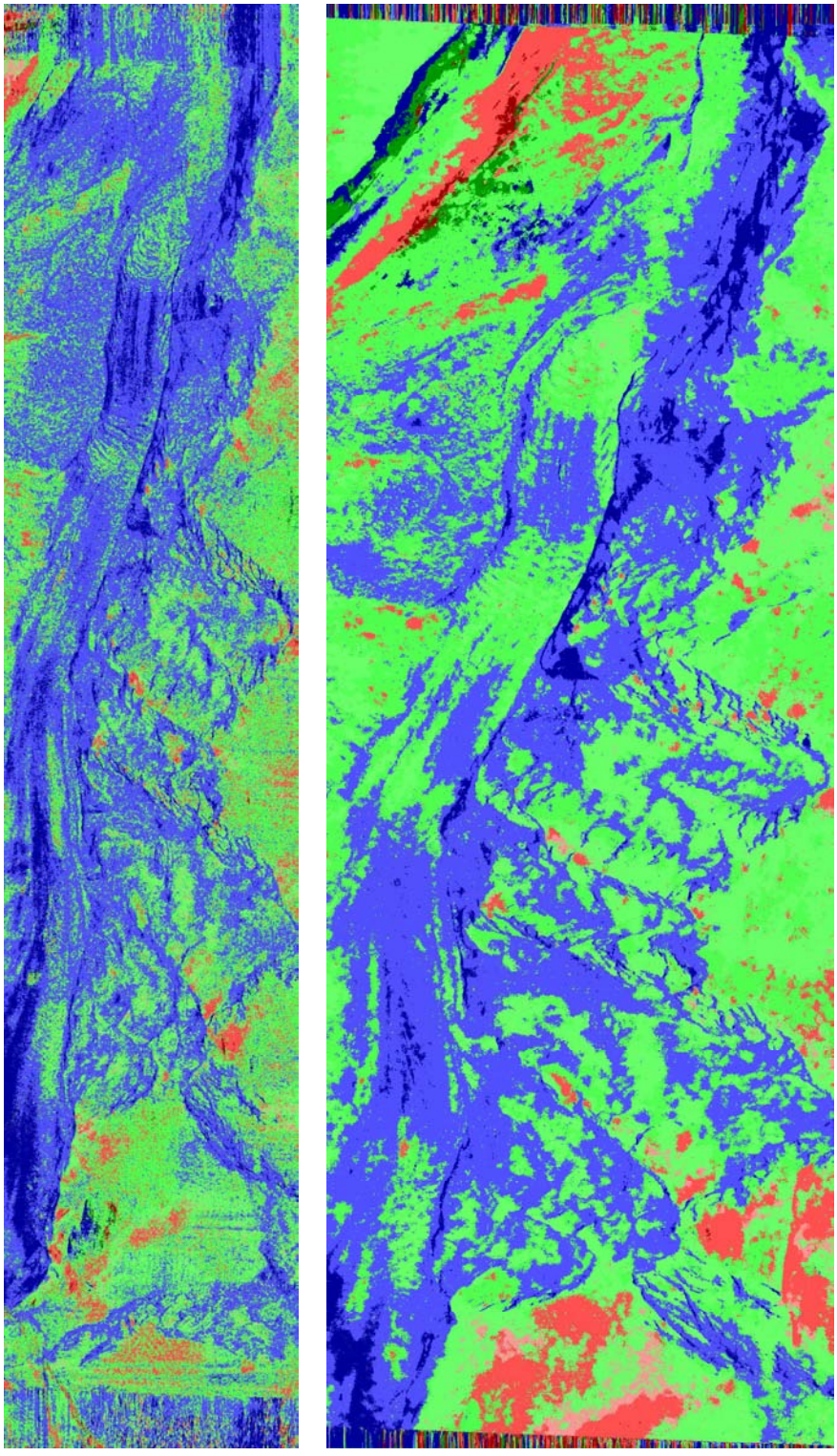


FIG. 7.6 – Distribution des paramètres $H-\alpha-A$, données E–SAR, glacier d'Argentière (double rebond, rétrodiffusion volumique, rétrodiffusion surfacique). Bande L : (a) plan $H-\alpha$, (b) plan $A-\alpha$, (c) plan $H-A$. Bande P : (d) plan $H-\alpha$, (e) plan $A-\alpha$, (f) plan $H-A$.

7.1.3 Comparaison avec le profil GPR

Nous avons aussi comparé ces résultats avec le profil GPR illustré dans la figure 7.8–(a). Malheureusement, les images POLSAR ne couvre que la seconde moitié du profil (approximativement 350m-700m) relevé pendant la campagne d'acquisition. La localisation approximative du profil GPR est illustrée en bleu sur les images d'amplitude HH+VV filtrées avec IDAN-ML



(a) (b)

FIG. 7.7 – Classification $H-\alpha$, données E–SAR, glacier d'Argentière : (a) bande L, (b) bande P.

dans la figure 7.9-(a),(b). Ce profil a été relevé dans la partie haute du glacier d'Argentière (de haut vers le bas) et il révèle une bonne caractérisation de l'épaisseur de la couche de neige superficielle.

Le profil GPR a été ensuite représenté sur les images de classification $H - \alpha$ (cf. Fig. 7.9–(c),(d)). Vraisemblablement, les paramètres $H - \alpha$ calculés pour la bande L ne révèlent pas une sensibilité à l'épaisseur de neige qui couvre la couche superficielle de névé.

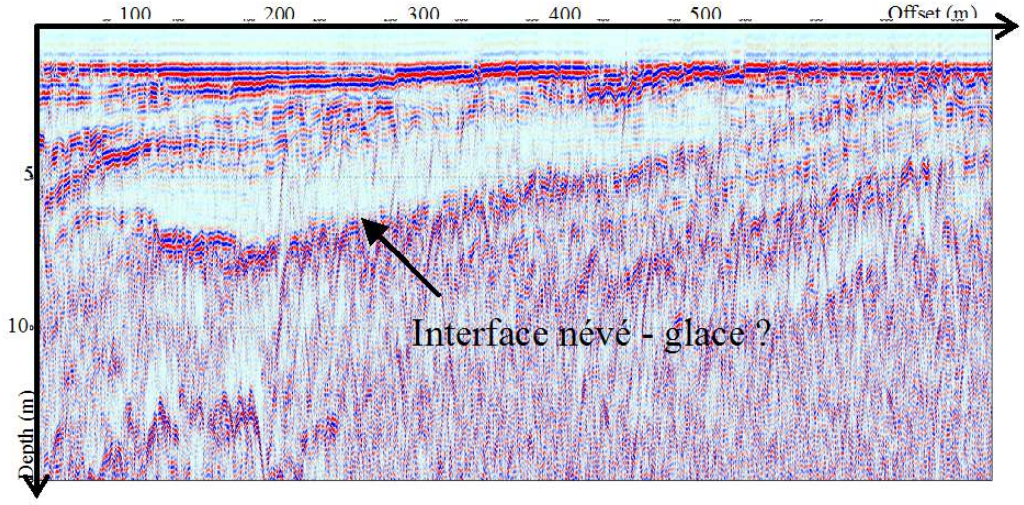
Par contre, les données POLSAR en bande P présentent un changement de classe entre les deux classes correspondant au mécanisme de rétrodiffusion simple rebond. L'entropie polarimétrique est à l'origine des variations entre les classes bleu et bleu-foncé le long du profil (cf. Fig. 7.9–(d)). Nous avons tracé un profil spatial sur l'image d'entropie qui correspond approximativement au profil GPR. Le profil sur l'entropie, illustré dans la figure 7.8–(b), semble montrer une dépendance entre le paramètre H et l'épaisseur de neige à la surface du glacier : plus la couche de neige est faible, plus l'entropie est grande. Une analyse quantitative approfondie des paramètres polarimétriques et une interprétation thématique sont nécessaires pour confirmer et expliquer ces premiers résultats.

Jusqu'ici la représentation de l'information polarimétrique repose sur un raisonnement purement physique, qui s'appuie sur la caractérisation de différents mécanismes de rétrodiffusion dans la scène à travers les paramètres $H - \alpha - A$. La prise en compte des spécificités liées aux données POLSAR est généralement effectuée en raffinant le résultat de classification $H - \alpha - A$ par une classification C-moyennes avec la distance de Wishart (cf. Sect. 1.7.2). Les résultats ainsi obtenus sont illustrés dans la figure 7.9–(c),(f). Une remarque générale valable pour les deux bandes de fréquences étudiées consiste à souligner la difficulté d'interprétation directe des résultats. Des travaux futurs, qui dépassent le cadre de cette thèse, devront prendre en compte des informations supplémentaires issues de l'expert en glaciologie pour avancer dans l'interprétation des classes issues de l'approche statistique Wishart.

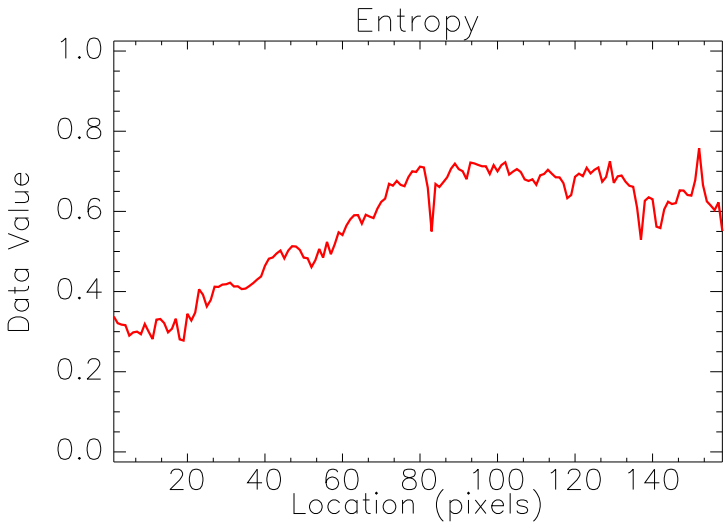
En conclusion, cette section dédiée au dépouillement des données POLSAR de la campagne d'acquisition E-SAR d'octobre 2006 a montré une grande richesse en information et un fort potentiel de classification par des méthodes conventionnelles. Deux applications sont ainsi identifiées : la cartographie des crevasses et la caractérisation de l'épaisseur de neige. Néanmoins, le contexte particulier des glaciers tempérés du massif du Mont-Blanc nécessite des développements méthodologiques futurs notamment au niveau de la caractérisation physique des interactions entre l'onde de radar et la surface des glaciers (mélange de neige, glace et roches).

7.2 Données POL-InSAR en bande L

Cette section présente l'analyse des données POL-InSAR effectuée sur un couple d'images E–SAR acquises en bande L sur le glacier du Tacul (direction SE-NO dans la figure 7.1) avec une base de 10m et un écart de 15min entre les deux passes. Une des spécificités du Tacul est la présence des bandes de Forbes [Llib-81], [More-00] : l'alternance de bandes de glace claire et foncée au centre de la langue glaciaire. La différence de couleur est due à la charge plus ou



(a)



(b)

FIG. 7.8 – Glacier d'Argentière : (a) profil longitudinal GPR (250MHz), (b) profil sur l'image d'entropie polarimétrique illustrée dans la figure 7.5-(a), position approximative du profil GPR.

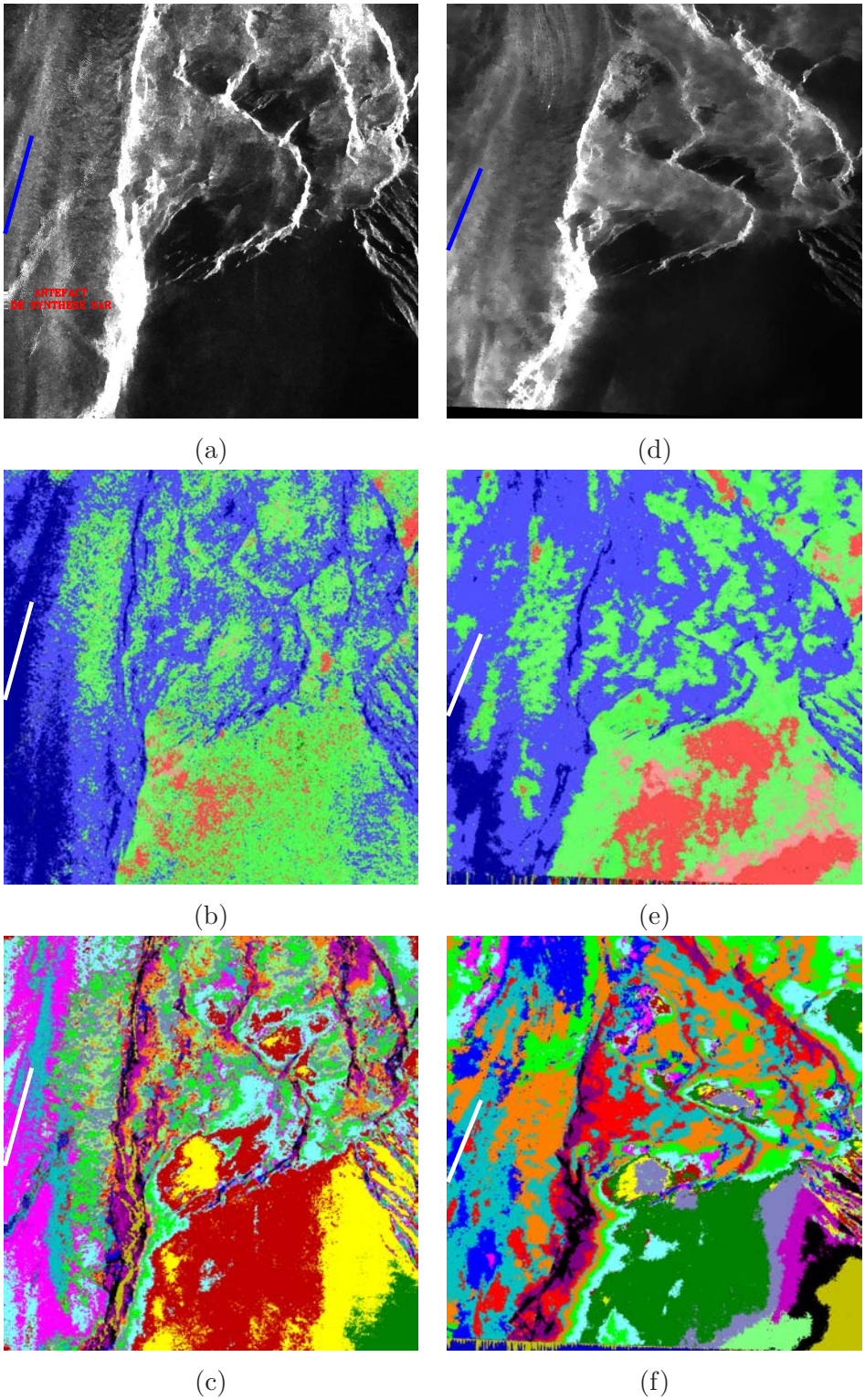
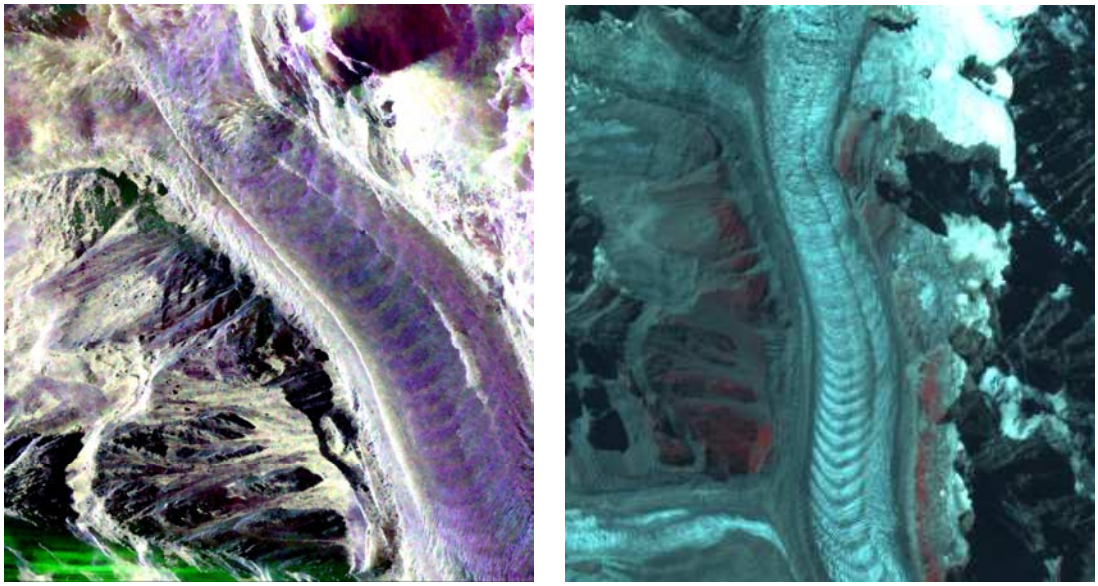


FIG. 7.9 – Position approximative du profil GPR illustré dans la figure 5.6-(a), données E–SAR, glacier d'Argentière, extraits 800×800 pixels. Bande L : (a) amplitude HH+VV, (b) classification $H - \alpha$, (c) classification Wishart. Bande P : (d) amplitude HH+VV, (e) classification $H - \alpha$, (f) classification Wishart.

moins importante en poussières de la glace. La poussière se dépose en été dans les crevasses de la glace qui se forment au niveau de la chute de séracs du Géant. Les bandes de Forbes sont généralement visibles dans les images optiques pendant la saison chaude, quand ces régions ne sont pas couvertes par la neige (cf. Fig. 7.10-(b)).



(a) (b)

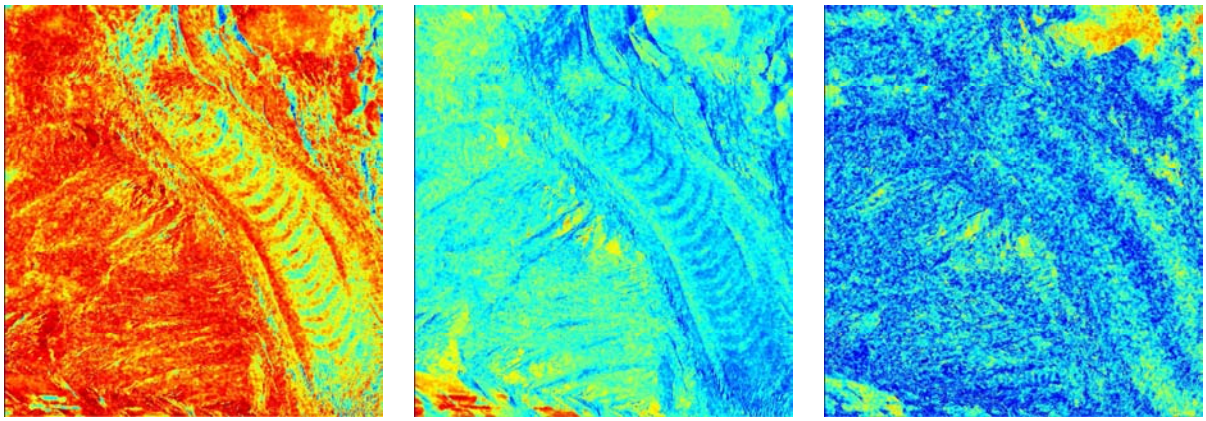
FIG. 7.10 – Données E-SAR, glacier du Tacul, bande L : (a) composition colorée dans la base de Pauli (HH-VV, 2HV, HH+VV) avec estimation IDAN–ML (extrait 1205 × 1312 pixels de l'image maître), (b) image optique multi-spectrale SPOT–5 (août 2005).

La première étape du traitement des données POL-InSAR (cf. Fig. 2.2) consiste à calculer la matrice de cohérence polarimétrique interférométrique $[T_6]$. Après avoir appliqué un moyennage complexe 4-vues pour obtenir des pixels carrés, nous avons estimé la matrice $[T_6]$ par la méthode IDAN-ML. La figure 7.10-(a) présente la composition colorée des composantes diagonales de la matrice de cohérence polarimétrique maître. L'interprétation visuelle révèle la présence des bandes de Forbes du glacier du Tacul qui est orienté selon la diagonale principale de l'image.

Par la suite, nous proposons une première caractérisation des bandes de Forbes à travers des paramètres polarimétriques interférométriques issus des données SAR. Les attributs calculés à partir de la matrice de cohérence polarimétrique interférométrique sont :

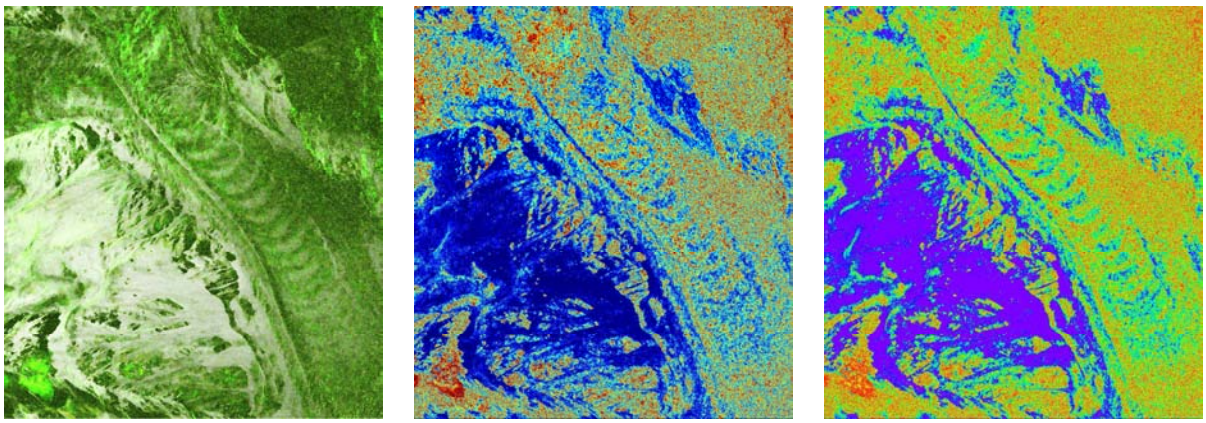
- POLSAR : la décomposition H-α-A illustrée dans la figure 7.11 ;
- POL-InSAR : les cohérences optimisées, A_1 et A_2 (cf. Fig. 7.12).

Parmi les cinq paramètres, les plus discriminants sont l'entropie et l'angle α. L'interprétation physique de ces deux paramètres indique la prédominance d'un mécanisme de rétrodiffusion surfacique (simple rebond) dans les régions rocheuses du glacier : la profondeur de pénétration de l'onde radar en bande L reste faible dans ces régions. Une des explications possibles est la présence d'eau liquide dans ces régions qui serait globalement plus importante que dans les régions de neige "propre". Les impuretés (les cryoconites) incrustées dans la glace, ainsi que les roches éparpillées à la surface du glacier, augmentent la température de la couche superficielle. Le reste du glacier étant globalement très proche de 0^0C (le point critique de l'eau pure), le



(a) (b) (c)

FIG. 7.11 – Décomposition H-α-A, données E-SAR, glacier de Tacul, bande L : (a) entropie, (b) angle α, (c) anisotropie.



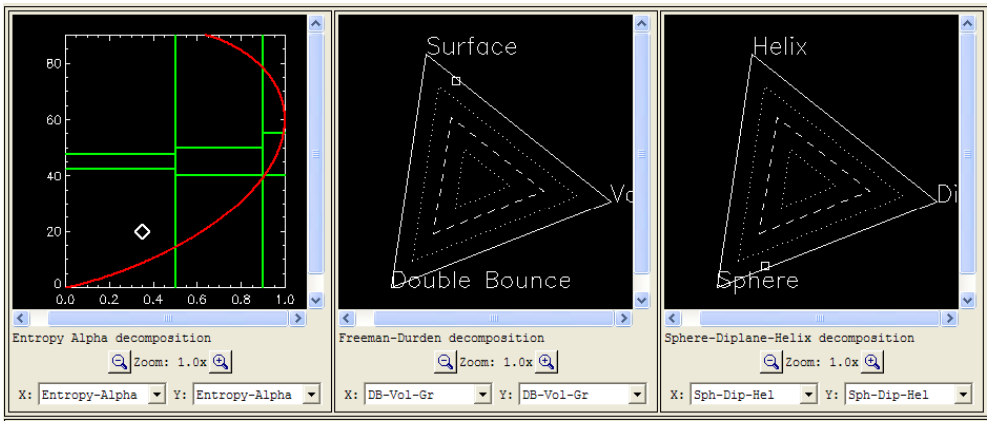
(a) (b) (c)

FIG. 7.12 – Paramètres POL-InSAR, données E-SAR, glacier du Tacul, bande L : (a) composition colorée des trois cohérences optimisées, (b) paramètre A_1, (c) paramètre A_2.

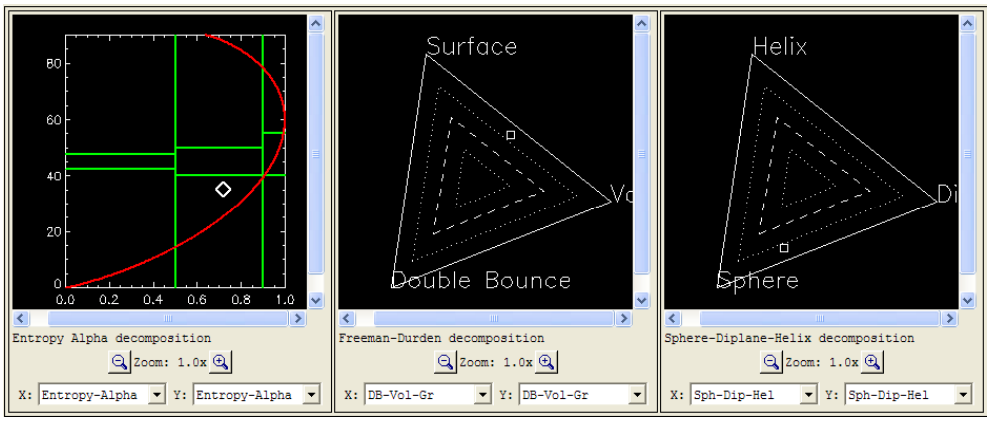
passage de l'état solide (glace) à l'état liquide surgit localement. Cela induirait une décroissance de la profondeur de pénétration SAR et une entropie polarimétrique plus faible. Au contraire, les régions de glace "propre" correspondent en théorie à une profondeur de pénétration plus importante qui donne, en bande L, un mélange de rétrodiffusion surfacique et volumique.

TAB. 7.1 – Données E-SAR, glacier du Tacul, bande L : valeurs représentatives des paramètres POL–InSAR pour les deux classes recherchées.

Classe	**Entropie**	**Angle α**	**Anisotropie**	A_1	A_2
Roches	0.35	19^0	0.26	0.25	0.50
Glace	0.71	36^0	0.21	0.40	0.75



(a)



(b)

FIG. 7.13 – Données E-SAR, glacier du Tacul, bande L. Paramètres polarimétriques obtenus avec l'estimation IDAN-ML : espace H-α, décomposition de Freeman [Free-98] et décomposition canonique sphère/dihèdre/hélice [Guil-03]. (a) - région des roches correspondant aux bandes de Forbes. (b) - région de glace inter-bandes.

Par la suite, nous avons vérifié les hypothèses avancées dans le paragraphe précédant en mesurant les valeurs des paramètres H, α, A, A_1 et A_2 sur des échantillons représentatifs des deux classes recherchées (cf. Tab. 7.1). Tous les paramètres semblent confirmer cette hypothèse, à une exception : l'angle α. Plus précisément, la figure 7.13 présente la localisation de ces valeurs mesurées dans trois espaces d'analyse POLSAR. L'espace défini par les attributs $H - \alpha$

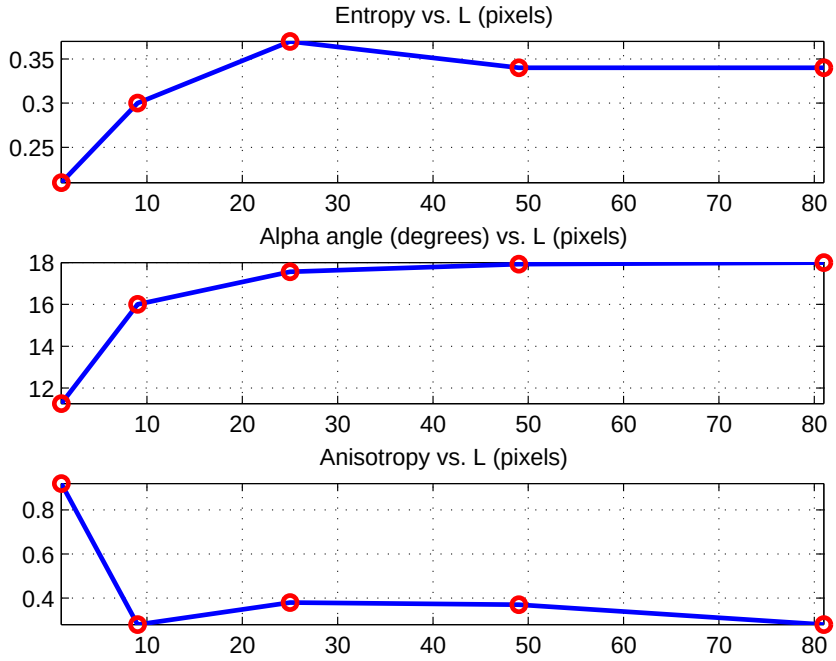
révèle une position atypique du centre de classe "glace" : à la frontière entre les sous-espaces correspondant aux mécanismes surfacique et volumique, mais assignée à une rétrodiffusion surfacique (cf. Fig. 7.13). La valeur de l'angle α semble sous-estimée par rapport à un mécanisme de rétrodiffusion volumique.

En s'inspirant des travaux récents de Lee et al. [Lee-06a], nous avons étudié l'influence du nombre d'échantillons L utilisés pour l'estimation de $[T_6]$, sur les valeurs du paramètre α représentatives pour les deux classes. La figure 7.14 présente l'évolution des trois paramètres polarimétrique $H-\alpha-A$ en fonction du nombre des pixels participant à l'estimation de $[T_6]$ par moyennage complexe multivues sur un voisinage carré BN (où $card\{BN\} \in \{1, 3^2, 5^2, 7^2, 9^2\}$), les échantillons étant eux mêmes issus d'un moyennage 4-vues. Si l'augmentation du nombre d'échantillons est bénéfique pour l'entropie et l'anisotropie, l'angle α devient sous-estimé pour la classe "glace" lorsqu'on dépasse 9 échantillons (ligne noire dans la figure 7.14). Ainsi, un voisinage d'estimation englobant plus de 9 pixels entraîne l'affectation de la classe "glace" au mécanisme simple rebond (rétrodiffusion surfacique) à la place d'un mécanisme de rétrodiffusion volumique.

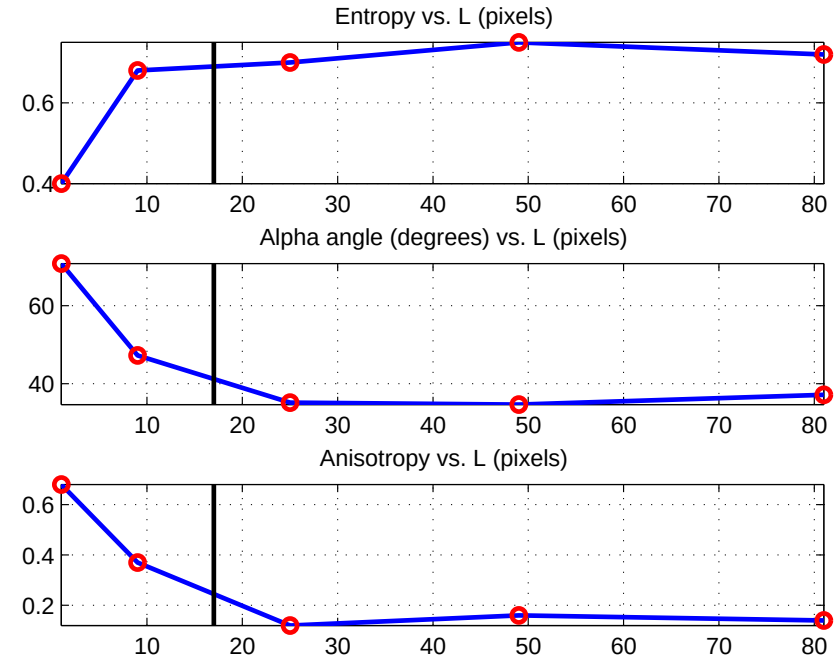
Les différents résultats de classification sont illustrés dans la figure 7.14. On peut observer que les bandes de Forbes sont généralement bien mises en évidence, à la fois par la classification basée sur la partition de l'espace des attributs POLSAR (H-α-A) et celle basée sur les attributs POL–InSAR (A_1-A_2). Ainsi, ces paramètres sont révélateurs des mécanismes de rétrodiffusion présents sur ces glaciers dans les images POL-InSAR en bande L. La classification statistique basée sur la distance de Wishart utilise l'information polarimétrique pour aboutir au résultat final illustré dans la figure 7.14-(c). Une évaluation visuelle par rapport à l'image optique présentée dans la figure 7.14-(d) révèle une bonne détection du glacier du Tacul qui se retrouve principalement dans deux classes (bleu-foncé et vert-foncé). Cependant, ces classes obtenues de façon automatique par clustering sur l'ensemble de la scène ne suivent pas parfaitement l'alternance des bandes de Forbes. Une classification supervisée, incluant l'information interférométrique, devrait permettre d'obtenir de meilleurs résultats. Dans les autres parties de l'image, l'interprétation directe des différentes classes issues du processus de classification non-supervisée semble également difficile.

7.3 Conclusions

Ce chapitre a présenté une première analyse des données POL-InSAR multibandes et multipolarisations acquises durant la campagne conjointe DLR/MEGATOR d'octobre 2006. Après avoir dépouillé les données, nous avons appliqué quelques étapes conventionnelles de la chaîne de traitement POLSAR/POL-InSAR (filtrage, extraction des paramètres et classification). L'analyse des résultats obtenus, en lien avec la connaissance du site et les mesures "in situ" acquises pendant la campagne, nous a permis d'identifier plusieurs applications POLSAR/POL-InSAR dans le contexte des glaciers alpins du massif de Mont-Blanc : la cartographie des champs de crevasses, la caractérisation du manteau neigeux à la surface des glaciers ou la détection des bandes de Forbes.

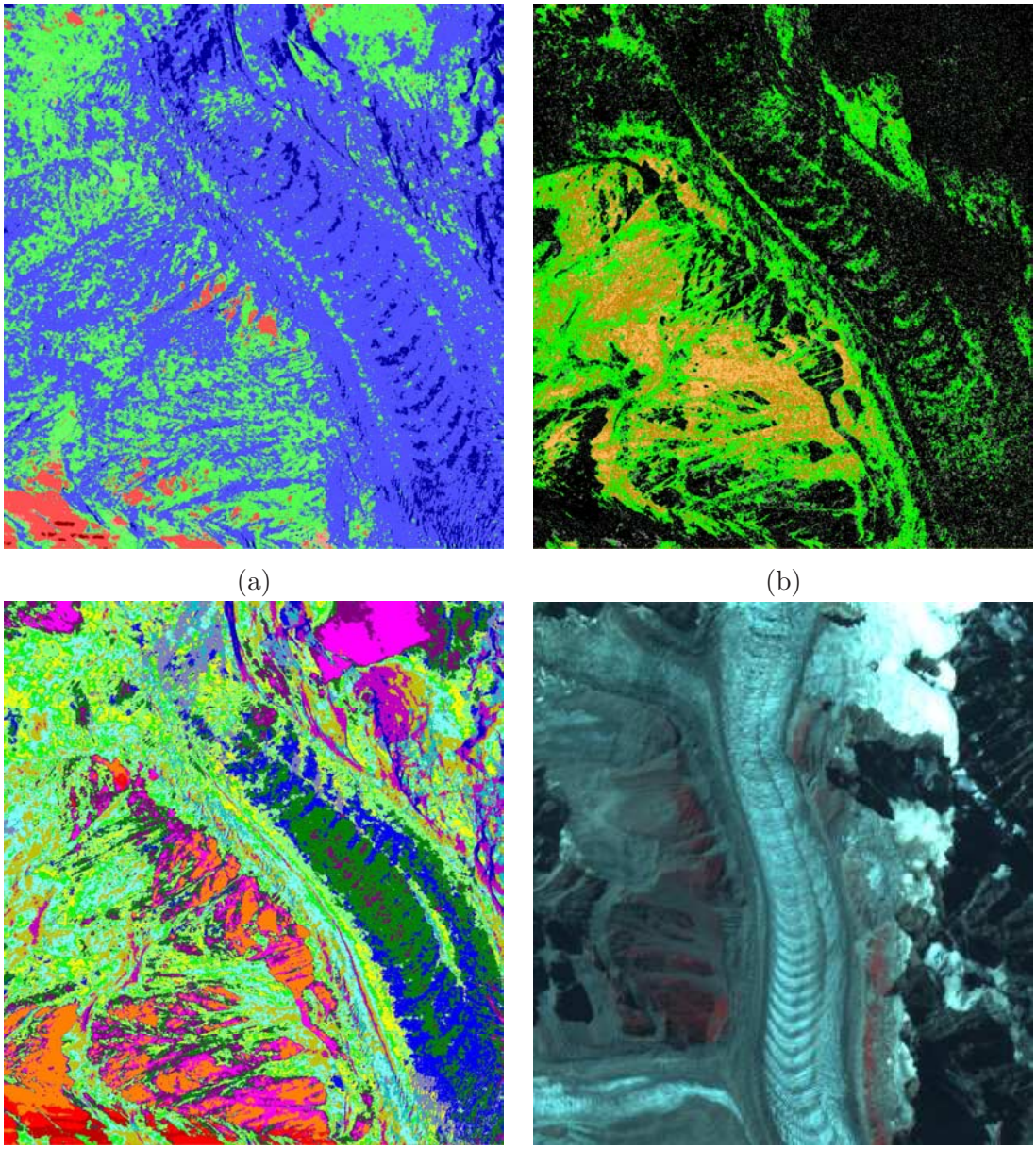


(a)



(b)

FIG. 7.14 – Données E-SAR, glacier du Tacul, bande L. Évolution de la valeur des paramètres H-α-A suivant le nombre d'échantillons utilisés pour l'estimation BN-ML de la matrice de cohérence : (a) région des roches correspondant aux bandes de Forbes, (b) région de glace inter-bandes (le changement de la classe volumique en surfacique est indiqué par la ligne noire).



(a) (b)

(c) (d)

FIG. 7.15 – Données E–SAR, glacier du Tacul, bande L : (a) classification H-α, (b) classification A_1-A_2, (c) classification statistique de Wishart, (d) image optique multi-spectrale SPOT–5 (août 2005).

Par la suite, ces résultats encourageant devront être évalués : à la fois quantitativement à travers des comparaisons avec les résultats des autres campagnes E-SAR, ainsi que qualitativement par une interprétation glaciologique complète.

Chapitre 8

Conclusions de la partie expérimentale

L'évolution des glaciers alpins du massif de Mont-Blanc fait l'objet de nombreuses études géophysiques. Hormis les enjeux économiques (gestion du risque, des ressource en eau ...) et géographiques (études des liens entre les glaciers et leur environnement), les recherches climatologiques leur donnent un nouveau rôle, celui d'indicateur local de l'évolution des conditions atmosphériques à l'échelle du massif. L'étude des glaciers alpins, souvent situés au coeur de zones montagneuses particulièrement difficiles d'accès, prend une nouvelle dimension grâce aux outils de télédétection.

La problématique traitée dans cette partie est l'application des méthodes proposées par l'imagerie SAR multicomposantes à l'observation des glaciers alpins. Nous avons analysé le potentiel et les limitations de ces méthodes pour la surveillance "tout temps" des glaciers du massif du Mont-Blanc. Quatre glaciers instrumentés, représentatifs pour la vallée de Chamonix, ont été choisis pour illustrer les diverses étapes des chaînes de traitement SAR : Argentière, Leschaux, Mer-de-glace et Tacul.

La première application illustrée dans ce contexte consiste à mesurer des champs de vitesse par interférométrie SAR différentielle. Les avancées méthodologiques proposées dans la première partie de cette thèse (filtrage adaptatif et estimation des fréquences locales) ont été intégrées à la chaîne de traitement D-InSAR et ont permis le calcul d'un premier champ de vitesse pendant la saison froide sur plusieurs glaciers des Alpes Françaises. Par la suite, différents couples interférométriques TANDEM ERS acquis entre juin 1995 et juin 1996, ont été analysés pour étudier la faisabilité au cours de l'année de la mesure de vitesse D-InSAR à 1 jour en bande C. Ainsi, la période propice aux mesures D-InSAR se limite à la saison froide, entre octobre et avril. Cette période correspond aux saisons où la surface glaciaire est couverte par la neige, ce qui rend impossible la mesure de vitesse par corrélation des images optiques satellitaires [Bert-05a]. La surveillance conjointe optique (en été) et SAR (en hiver) devrait permettre de mesurer tout au long de l'année des champs de vitesse sur les glaciers alpins.

En octobre 2006, une campagne d'acquisition d'images InSAR aéroportées multipolarisations

et multibandes, couplée avec des mesures "in situ", a été effectuée grâce à une collaboration entre le DLR et les équipes du projet MEGATOR [Land-07]. Cette thèse se termine avec les premiers résultats obtenus sur ces données en appliquant une chaîne de traitement POLSAR/POL–InSAR qui intègre nos méthodes du filtrage (POLSARpro version 3.0 Beta 2, mai 2007). L'analyse de ces résultats, les mesures terrain (disponibles via l'OSUG et celles acquises au cours du projet MEGATOR) ainsi que la connaissance du terrain, nous ont permis de mettre en évidence l'apport de l'imagerie SAR pour l'observation des glaciers alpins dans le massif de Mont-Blanc. Parmi les applications glaciologiques, on peut citer la cartographie des crevasses, la caractérisation du manteau neigeux à la surface des glaciers ou la détection des bandes de Forbes.

En conclusion, l'application des méthodes SAR multicomposantes proposées dans cette partie montre l'intérêt de la télédétection radar pour la surveillance des glaciers alpins. Ainsi, l'imagerie SAR représente une source de données complémentaire à l'imagerie optique. L'exploitation conjointe des deux sources d'information doit permettre d'obtenir de façon automatique un ensemble de mesures "tout temps" nécessaires à l'observation et la modélisation de l'évolution des glaciers alpins : les champs de vitesse en surface, les taux de déformation et les bilans de masse annuels.

Conclusions générales et perspectives

Les travaux présentés dans cette thèse ont été consacrés au traitement d'images SAR polarimétriques et interférométriques. Notre démarche méthodologique s'inscrit dans le cadre général du traitement de l'information issue de données multivariées. Nous avons formulé notre approche sous la forme d'une représentation unifiée de l'information POLSAR / InSAR / POL-InSAR par des matrices de cohérence et d'une chaîne de traitement composée de trois étapes : estimation des paramètres, fusion d'informations (classification/mesure) et géoréférencement.

Les avancées méthodologiques portent essentiellement sur l'estimation des paramètres dans les applications POLSAR / InSAR / POL-InSAR en télédétection. Plus précisément, nous avons étudié les opérateurs à voisinage adaptatif pour le filtrage cohérent du speckle dans les images complexes SAR multi-variées. Afin de mieux préserver la résolution spatiale en gardant la stationnarité locale, nous avons développé un nouvel algorithme qui s'appuie sur l'information d'intensité pour construire des voisinages étendus nécessaires à la réduction du biais et de la variance des paramètres estimés. Le principe de cette approche nommée IDAN (*Intensity Driven Adaptive Neighborhood*) est d'effecteur en chaque pixel une croissance de région avec un test d'agrégation qui combine les informations des composantes d'intensité disponibles. Ainsi, les voisinages adaptatifs IDAN fournissent une alternative fiable aux voisinages directionnels et boxcar, avec de meilleures performances en termes de nombre d'échantillons (taille variable) et de préservation de la stationnarité locale (forme souple adaptée au signal).

Dans le contexte InSAR haute résolution, nous avons proposé une méthode originale pour l'estimation des fréquences locales des interférogrammes topographiques. Afin d'être en mesure de compenser les composantes déterministes sur des voisinages adaptatifs, nous avons développé un nouvel algorithme d'estimation des fréquences locales basé sur l'estimation de la fonction d'auto-corrélation 2D du signal complexe de phase à partir des paires de pixels disponibles dans un voisinage quelconque. Ces fréquences locales sont utilisées à différents niveaux dans le traitement InSAR : filtrage de phase interférométrique, développement de phase et compensation des composantes déterministes dans l'estimation de la corrélation complexe InSAR.

En aval de l'étape d'estimation d'attributs extraits des images POLSAR, nous avons également proposé une nouvelle approche pour les fusionner par un système à base de règles floues. Cette approche développée au LISTIC dans le cadre de l'analyse des images sismiques [Vale-03] est interactive et permet d'introduire de la connaissance experte sur le comportement des attributs POLSAR et les classes thématiques recherchées.

Enfin, dans la partie amont de la chaîne de traitement, nous avons participé à l'expérimentation d'une méthode originale de synthèse SAR proposée par Jean-Marie Nicolas à TELECOM Paris [Nico-07]. Cette approche permet de générer directement des interférogrammes différentiels en géométrie sol en effectuant la synthèse d'images "pseudo SLC" par une formation de voies dans le domaine temporel.

Au cours de cette thèse, nous avons également exploré un domaine d'application de la télédétection radar : l'observation des glaciers tempérés. A travers le projet MEGATOR, nous avons expérimenté des chaînes de traitements InSAR et Pol(-In)SAR, auxquelles nous avons intégré nos méthodes, sur des données acquises sur le site test "Chamonix Mont-Blanc".

Tout d'abord, nous avons étudié les traitements nécessaires pour mesurer le déplacement de glaciers alpins par interférométrie différentielle et les problèmes méthodologiques posés par le relief de haute montagne. Les avancées méthodologiques proposées dans la première partie de cette thèse ont été intégrées à la chaîne de traitement D-InSAR et ont permis le calcul d'un premier champ de vitesse pendant la saison froide sur plusieurs glaciers des Alpes Françaises. Par la suite, différents couples interférométriques TANDEM ERS acquis entre juin 1995 et juin 1996, ont été analysés pour étudier la faisabilité au cours de l'année de la mesure de vitesse D-InSAR à 1 jour en bande C.

En fin de thèse, nous avons également pu traiter les données SAR aéroportées multibandes et multipolarisations acquises en octobre 2006 sur des glaciers du massif du Mont-Blanc. Une première analyse de ces résultats nous a permis de mettre en évidence l'apport de l'imagerie SAR multivariée pour la surveillance des glaciers tempérés.

Les principales perspectives de ces travaux peuvent être regroupées selon deux axes majeurs correspondant aux deux parties du manuscrit. Le premier concerne l'amélioration des techniques présentées dans le contexte méthodologique du traitement de l'information issue des données SAR multivariées :

1. Une première direction destinée à améliorer les performances des méthodes d'estimation dans les images SAR haute résolution fournies par les satellites nouvelle génération, consiste à rechercher des paramètres robustes pour la caractérisation des cibles étendues ou ponctuelles. Ces paramètres permettront à la fois de guider la croissance de région et de développer de nouveaux estimateurs adaptatifs. Dans le contexte général de la télédétection radar, les détecteurs classiques, fondés sur l'hypothèse de speckle pleinement développé, sont souvent mis en défaut dès lors que l'environnement devient non-homogène, voire impulsionnel, s'écartant très vite du modèle gaussien circulaire. Des modèles physiques de fouillis avec des modèles de bruit composé permettent de mieux représenter la réalité (variations spatiales de puissance et nature de fouillis, transitions ...). Une approche prometteuse basée sur une généralisation de la statistique gaussienne (processus aléatoires gaussiens composés) a été proposée dans [Pasc-06]. Ces processus, appelés processus SIRP (Spherically Invariant Random Processes), sont basés sur une modélisation multidimensionnelle Gaussienne (définie par une matrice de covariance) dont la variance est elle-même aléatoire, caractérisant de ce fait la statistique de texture.

2. Concernant l'estimation des fréquences locales des interférogrammes à haute résolution spatiale, une évolution possible est la prise en compte de l'information multi-échelle disponible dans les composantes LR et HR. Cette information devrait permettre la combinaison des deux méthodes d'estimation (VCM et fonction d'autocorrélation) dans un seul estimateur adaptatif généralisé.
3. La conception d'autres estimateurs, plus robustes que la moyenne statistique, à utiliser à l'intérieur des voisinages adaptatifs, devrait s'appuyer plus sur la l'aspect multivarié des données SAR. Par exemple, dans le cas du bruit gaussien indépendant, on sait que pour un nombre de composantes supérieur à deux, l'estimateur conventionnel au sens de moindres carrées n'est plus admissible car il est dominé par d'autres estimateurs spécifiques au cas multivarié tels que l'estimateur James-Stein [Maur-07]. L'application de ces principes au cas des images SAR multivariées permet une meilleure prise en compte de la stationnarité de la scène à travers les différents canaux SAR.
4. Dans la deuxième l'étape de la chaîne de traitement de l'information appliquée aux images SAR, l'apport de connaissances expertes sur le comportement des attributs POL(-In)SAR influence fortement la qualité des résultats de classification/mesure. Néanmoins, la grande majorité des approches présentées dans la littérature du domaine utilise cette information pour effectuer la classification de façon non-supervisée à travers des partitions nettes de l'espace engendré par ces attributs. Dans cette thèse, nous avons proposé une approche alternative interactive supervisée à base de règles floues. En perspective, on peut envisager la combinaison des deux approches et ainsi obtenir une méthode de classification non-supervisée qui prend en compte l'information "a priori" sur les classes thématiques recherchées. Parmi les outils méthodologiques proposés pour la fusion de ces informations hétérogènes, on peut citer la théorie de l'évidence de Dempster/Shafer [Shaf-76] et les méthodes de fusion floue basées sur l'intégrale de Choquet [Rong-06].

Le second axe concerne les perspectives de l'observation des glaciers alpins par télédétection SAR :

1. La mesure des champs de vitesses 3D nécessite des hypothèses spécifiques sur la direction d'écoulement des glaciers. La prise en compte des modèles de dynamique glaciaire permet la réduction de l'incertitude dans la mesure de vitesse par D-InSAR et ces hypothèses peuvent ainsi être relaxées. Déjà employées avec succès dans les applications géophysiques [Hure-05], les méthodes d'assimilation de données pour des modèles de dynamique glaciaire fournissent une piste possible pour l'amélioration de la précision des mesures D-InSAR. Un éventuel point de départ sont les travaux de Rignot et al. qui combinent avec succès la modélisation en éléments finis avec les mesures D-InSAR pour la surveillance des glaciers polaires [Schm-02].
2. L'arrivé des futurs satellites haute résolution conduira à l'augmentation du potentiel des techniques alternatives à l'interférométrie différentielle pour la surveillance des glaciers alpins. Nous avons déjà initié des travaux dans cette direction pour augmenter l'intervalle d'observation des glaciers du massif du Mont-Blanc [Vasi-07a]. Malheureusement, la résolution décamétrique des satellites ERS ne révèle aucune cible potentielle qui soit à la

fois stable et cohérente à la surface des glaciers situés sur le site test "Chamonix Mont-Blanc". Une analyse visuelle des images E-SAR acquises sur ces glaciers laisse penser que la résolution métrique est suffisante pour la détection de cibles proches de la surface des glaciers. Le suivi de ces cibles (blocs erratiques) donnera une information fiable sur la vitesse de points particuliers à la surface des glaciers alpins.

3. La première analyse qualitative des données aéroportées multibandes POL(-In)SAR, issues de la campagne E-SAR d'octobre 2006, montre un fort potentiel pour la caractérisation des glaciers alpins. L'application de techniques d'inversion devrait permettre de remonter depuis les observations SAR vers les grandeurs glaciologiques recherchées. Les techniques de modélisation de processus de diffusion des ondes électromagnétiques dans les milieux glaciaires (neige [Mart-05] ou glace [Shar-07]) offrent une approche quantitative qu'il sera intéressant de tester suite aux observations qualitatives présentées dans ce manuscrit.

Enfin, après avoir étudié des données POLSAR / InSAR / POL-InSAR dans différentes bandes de fréquence sur les glaciers de la vallée de Chamonix, on peut conclure sur les caractéristiques que devrait présenter un système satellitaire SAR optimisé pour la surveillance des glaciers alpins. Le système SAR idéal devrait opérer dans une bande de fréquence assez basse (L ou P) pour assurer une bonne pénétration dans la couche superficielle du glacier et offrir ainsi une plus grande stabilité du processus de diffusion des ondes électromagnétiques. Doté d'une résolution spatiale métrique, pour le suivi des cibles, et pleinement polarimétrique, pour l'inversion des paramètres géophysiques, ce système devrait aussi assurer une répétitivité des passes de quelques jours pour l'interférométrie, avec plusieurs angles d'incidence au sol afin d'avoir une bonne visibilité des glaciers et au moins deux projections du déplacement sur la ligne de visée.

Bibliographie

[Amel-00] F. Amelung, S. Jónsson, H. Zebker, et P. Segall, *Widespread uplift and 'trapdoor' faulting on Galapagos volcanoes observed with radar interferometry*, Nature, 407 (2000), pp. 993–996.

[Asto-90] J. Astola, P. Haavisto, et Y. Neuvo, *Vector median filters*, Proceedings of IEEE, 78 (1990), pp. 678–688.

[Beau-04] J. M. Beaulieu et R. Touzi, *Segmentation of textured polarimetric SAR scenes by likelihood approximation*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42 (2004), pp. 2063–2072.

[Bech-06] N. Bechor, *Extending interferometric synthetic aperture radar measurements from one to two dimensions*, Thèse de doctorat, Department of geophysics, Stanford University, Stanford, USA, 2006.

[Bert-05] E. Berthier, *Dynamique et bilan de masse des glaciers de montagne (Alpes, Islande, Hymalaya). Contribution de l'imagerie satellitaire*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, France, 2005.

[Bert-05a] E. Berthier, H. Vadon, D. Baratoux, Y. Arnaud, C. Vincent, K. L. Feigl, F. Rémy, et B. Legrésy, *Mountain glacier surface motion derived from satellite optical imagery*, Remote Sensing of Environment, 95 (2005), pp. 14–28.

[Bomb-06] L. Bombrun, G. Vasile, M. Gay, et E. Trouvé, *Analyse multi-dates d'interférogrammes ERS appliqués à l'observation des glaciers*, in Journées CArtographie des CHAngements Naturels par Télédétection, GdR ISIS, Paris, France, 2006.

[Borg-89] M. Borgeaud, S. V. Nghiem, R. T. Shin, et J. A. Kong, *Theoretical models for polarimetric microwave remote sensing of Earth terrain*, Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 3 (1989), pp. 61–81.

[Born-59] M. Born et E. Wolf, *Principles of optics : electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*, Pergamon Press, Elmsford, N.Y., 1959.

[Bous-04] L. Bousquet, M. Gay, B. Legresy, G. Vasile, et E. Trouvé, *Velocities field of mountain glacier obtained by synthetic aperture radar interferometry. Comparison of InSAR and surveyed velocities*, in IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, USA, vol. 2, 2004, pp. 1132–1135.

[Brai-02] R. J. Braithwaite, *Glacier mass balance : the first 50 years of international monitoring*, Prog. Phys. Geog., 26 (2002), pp. 76–95.

[Brun-97] J. Bruniquel et A. Lopes, *Multi-variate optimal speckle reduction in SAR imagery*, International Journal of Remote Sensing, 18 (1997), pp. 603–627.

[Bujo-04] F. Bujor, E. Trouvé, L. Valet, J. M. Nicolas, et J. P. Rudant, *Application of log-cumulants to the detection of spatiotemporal discontinuities in multitemporal SAR images*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42 (2004), pp. 2073–2084.

[Chaa-07] F. Chaabane, A. Avallone, F. Tupin, P. Briole, et H. Maître, *Multitemporal correction of tropospheric effects in differential SAR interferometry*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, à paraître, (2007).

[Chen-01] C. W. Chen et H. A. Zebker, *Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization*, Journal of the Optical Society of America A, 18 (2001), pp. 338–351.

[Chen-03] C. T. Chen, K. S. Chen, et J. S. Lee, *The use of fully polarimetric information for the fuzzy neural classification of SAR images*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41 (2003), pp. 2089–2100.

[Ciuc-00] M. Ciuc, R. M. Rangayyan, T. Zaharia, et V. Buzuloiu, *Filtering noise in color images using adaptive-neighborhood statistics*, Journal of Electronic Imaging, 9 (2000), pp. 484–494.

[Ciuc-01] M. Ciuc, P. Bolon, E. Trouvé, V. Buzuloiu, et J. P. Rudant, *Adaptive-neighborhood speckle removal in multitemporal synthetic aperture radar images*, Applied Optics, 40 (2001), pp. 5954–5966.

[Ciuc-98] M. Ciuc, R. M. Rangayyan, T. Zaharia, et V. Buzuloiu, *Adaptive neighborhood filters for color image filtering*, in Nonlinear Image Processing IX, SPIE, vol. 3304, 1998, pp. 277–286.

[Clou-86] S. R. Cloude, *Polarimetry : the characterization of polarimetric effects in EM scattering*, Thèse de doctorat, University of Birmingham, UK, 1986.

[Clou-96] S. R. Cloude et E. Pottier, *A review of target decomposition theorems in radar polarimetry*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34 (1996), pp. 498–518.

[Clou-97] ——, *An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35 (1997), pp. 68–78.

[Clou-98] S. R. Cloude et K. P. Papathanassiou, *Polarimetric SAR interferometry*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36 (1998), pp. 1551–1565.

[Coll-97] A. Collaro, G. Franceschetti, F. Palmieri, et M. S. Ferreiro, *Phase unwrapping by means of genetic algorithms*, Journal of Optical Society of America A, 15 (1997), pp. 407–418.

[Das-97] A. Das et R. M. Rangayyan, *Adaptive region-based filtering of multiplicative noise*, in SPIE, Nonlinear Image Processing VIII, E. R. Dougherty et J. T. Astola, eds, vol. 3026, 1997, pp. 338–348.

[Datc-98] M. Datcu, K. Seidel, et M. Walessa, *Spatial information retrieval from remote-sensing images. Part 1 : information theoretical perspective*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36 (1998), pp. 1431–1445.

[Davi-99] G. W. Davidson et R. Bamler, *Multiresolution phase unwrapping for SAR interferometry*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37 (1999), pp. 163–174.

[Dong-01] Y. Dong, A. K. Milne, et B. C. Forster, *Segmentation and classification of vegetated areas using polarimetric SAR image data*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39 (2001), pp. 321–329.

[Dyur-03] M. B. Dyurgerov, *Mountain and subpolar glaciers show an increase in sensitivity to climate warming and intensification of the water cycle*, Journal of Hydrology, 282 (2003), pp. 164–176.

[Fami-01] L. Ferro-Famil, E. Pottier, et J. S. Lee, *Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A/Alpha-Wishart classifier*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39 (2001), pp. 2332–2342.

[Fami-05] L. Ferro-Famil, E. Pottier, H. Skriver, P. Lumsdon, R. Moshammer, et K. P. Papathanassiou, *Forest mapping and classification using L-band POLINSAR data*, in POLinSAR 2005 Workshop, ESA, Franscati, Italy, 2005, pp. CD–ROM.

[Ferr-01] A. Ferretti, C. Prati, et F. Rocca, *Permanent scatterers in SAR interferometry*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39 (2001), pp. 8–20.

[Fors-03] R. R. Forster, K. C. Jezek, L. Koenig, et E. Deeb, *Measurement of glacier geophysical properties from InSAR wrapped phase*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41 (2003), pp. 2595–2604.

[Free-98] A. Freeman et S. L. Durden, *A three-component scattering model for polarimetric SAR data*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36 (1998), pp. 963–973.

[Fros-82] V. S. Frost, J. A. Stiles, K. S. Shanmugan, et J. C. Holtzman, *A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-4 (1982), pp. 157–166.

[Gabr-89] A. K. Gabriel, R. M. Goldstein, et H. A. Zebker, *Mapping small evaluation changes over large areas : differential radar interferometry*, Journal of Geophysical Research, 94 (1989), pp. 9183–9191.

[Gall-05] F. Galland, N. Bertaux, et P. Réfrégier, *Multicomponent image segmentation in homogenous regions by stochastic complexity minimization : application*

to speckle, Poisson and Bernoulli noise, Pattern Recognition, 38 (2005), pp. 1926–1936.

[Gela-05] G. Gelabert, *Étude du movement des glaciers à l'aide d'une chaine interférométrique radar à synthèse d'ouverture*, Master's thesis, ENST de Bretagne, France, 2005.

[Ghig-94] D. C. Ghiglia et L. A. Romero, *Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods*, Journal of Optical Society of America A, 11 (1994), pp. 107–117.

[Ghig-98] D. C. Ghiglia et M. D. Pritt, *Two-dimensional phase unwrapping, theory, algorithms and software*, Wiley Inter Science, 1998.

[Gold-87] R. M. Goldstein et H. A. Zebker, *Interferometric radar measurement of ocean surface currents*, Nature, 328 (1987), pp. 707–709.

[Gold-88] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, et C. L. Werner, *Satellite radar interferometry : Two-dimensional phase unwrapping*, Radio Science, 23 (1988), pp. 713–720.

[Gold-93] R. M. Goldstein, H. Engelhardt, B. Kamb, et R. M. Frolich, *Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion : application to an Antarctic ice stream*, Science, 262 (1993), pp. 1525–1530.

[Good-63] N. R. Goodman, *Statistical analysis based on a certain multivariate complex gaussian distribution (an introduction)*, The Annals of Mathematical Statistics, 34 (1963), pp. 152–177.

[Good-72] J. W. Goodman, *Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie*, Masson, 1972.

[Good-76] ——, *Some fundamental properties of speckle*, J. Opt. Soc. Amer., 53 (1976), pp. 1145–1149.

[Gord-84] R. Gordon et R. M. Rangayyan, *Feature enhancement of film mammograms using fixed and adaptive neighborhoods*, Applied Optics, 23 (1984), pp. 560–564.

[Goud-01] F. Goudail et P. Réfrégier, *Target detection and segmentation in coherent active polarimetric images*, in IEEE International Conference on Image Processing, vol. 3, 2001, pp. 632–635.

[Guar-97] A. M. Guarnieri et C. Prati, *SAR interferometry : a quick and dirty coherence estimator for data browsing*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35 (1997), pp. 660–669.

[Guil-03] S. Guillaso, *Complementarité polarimétrie / interferométrie pour la détection et la caractérisation de cibles*, Thèse de doctorat, Université de Rennes I, Rennes, France, 2003.

[Hagg-94] W. Hagg et M. Sties, *Efficient speckle filtering of SAR images*, in IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Pasadena, USA, vol. 4, 1994, pp. 2140–2142.

[Hans-99] R. Hanssen et R. Bamler, *Evaluation of interpolation kernels for SAR interferometry*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37 (1999), pp. 318–321.

[Hant-81] D. Hantz, *Dynamique et hydrologie du glacier d'Argère*, Thèse de doctorat, CNRS, Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement, April 1981.

[Hoop-06] A. J. Hooper, *Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation*, Thèse de doctorat, Department of geophysics, Stanford University, Stanford, USA, 2006.

[Hure-05] M. Huret, *Techniques d'assimilation des données satellitales de couleur de l'eau pour la détermination de la production primaire pélagique dans un système dynamique côtier*, Thèse de doctorat, Université Paul-Sabatier, France, 2005.

[Huyn-65] J. R. Huynen, *Measurement of the target scattering matrix*, Proc. IEEE, 53 (1965), pp. 936–946.

[IPCC-01] IPCC, *Climate change 2001 : the scientific basis.* http ://www.grida.no/climate/ipcc, 2001.

[Jone-41] R. C. Jones, *A new calculus for the treatment of optical systems : description and discussion of the calculus*, Journal of the Optical Society of America, 31 (1941), pp. 488–493.

[Jone-47] ——, *A new calculus for the treatment of optical systems : a more general formulation and description of another calculus*, Journal of the Optical Society of America, 37 (1947), pp. 107–110.

[Joug-98] I. Joughin, R. Kwok, et M. A. Fahnestock, *Interferometric estimation of three-dimensional ice-flow using ascending and descending passes*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36 (1998), pp. 25–37.

[Jule-06] A. Julea, G. Vasile, I. Petillot, E. Trouvé, J. M. Nicolas, M. Gay, et P. Bolon, *Simulation of SAR images and radar coding of georeferenced information for temperate glacier monitoring*, in Optimization of Electrical and Electronic Equipments, Brasov, Romania, vol. 4, 2006, pp. 175–180.

[Kaab-05] A. Kääb, C. Huggel, L. Fischer, S. Guex, F. Paul, I. Roer, N. Salzmann, S. Schlaefli, K. Schmutz, D. Schneider, T. Strozzi, et Y. Weidmann, *Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains : an overview*, Natural Hazards and Earth System Science, 5 (2005), pp. 527–554.

[Kaab-05a] A. Kääb, *Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya*, Remote Sensing of Environment, 94 (2005), pp. 463–474.

[Kara-04] V. Karathanassi et M. Dabboor, *Land cover classification using E-SAR polarimetric data*, in ISPRS Congress, Istambul, Turkey, vol. 35, 2004, pp. 280–286.

[Karg-05] J. Kargel, M. Abrams, M. Bishop, A. Bush, G. Hamilton, H. Jiskoot, A. Kääb, H. Kieffer, E. Lee, F. Paul, F. Rau, B. Raup, J. Shroder, D. Soltesz, D. Stainforth, L. Stearns, et R. Wessels, *Multispectral imaging contributions to global land ice measurements from space*, Remote Sensing of Environment, 99 (2005), pp. 187–219.

[Kenn-51] E. M. Kennaugh, *Effect of the type of polarisation on echo characteristics*, Rapp. Tech. 389-9, Antenna Laboratory, Ohaio State University, Columbus, USA, 1951.

[Kers-05] P. R. Kersten, J. S. Lee, et T. L. Ainsworth, *Unsupervised classification of polarimetric synthetic aperture radar images using fuzzy clustering and EM clustering*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43 (2005), pp. 519–527.

[Koeh-06] M. Koehl, E. Trouvé, G. Vasile, M. Gay, P. Grussenmeyer, J. M. Nicolas, et T. Landes, *SIG pour la gestion cartographique des données du projet MEGATOR : SIG et e-learning*, in Conférence francophone ESRI SIG 2006, Issy-les-Moulineaux, France, 2006.

[Kost-86] A. B. Kostinski et W. M. Boerner, *On foundations of radar polarimetry*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 34 (1886), pp. 1395–1404.

[Kuan-85] F. T. Kuan, A. A. Sawchuk, T. C. Strand, et P. Chavel, *Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-7 (1985), pp. 165–177.

[Kwok-96] R. Kwok et M. A. Fahnestock, *Ice sheet motion and topography from radar interferometry*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34 (1996), pp. 189–200.

[Land-07] T. Landes, M. Gay, E. Trouvé, J. M. Nicolas, L. Bombrun, G. Vasile, et I. Hajnsek, *Monitoring temperate glaciers by high resolution Pol-InSAR data : first analysis of Argentière E-SAR acquisitions and in-situ measurements*, in IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Barcelona, Spain, 2007, p. à paraître.

[Lee-03] J. S. Lee, S. R. Cloude, K. Papathanassiou, M. R. Grunes, et I. H. Woodhouse, *Speckle filtering and coherence estimation of polarimetric SAR interferometry data for forest applications*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41 (2003), pp. 2254–2263.

[Lee-04] J. S. Lee, M. R. Grunes, E. Pottier, et L. Ferro-Famil, *Unsupervised terrain classification preserving polarimetric scattering characteristics*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42 (2004), pp. 722–731.

[Lee-04a] J. S. Lee, D. L. Schuler, et T. L. Ainsworth, *Scattering model based speckle filtering of polarimetric SAR data*, in 5th European Conference on SAR, Ulm, Germany, vol. V, 2004, pp. 203–207.

[Lee-05] J. S. Lee, M. R. Grunes, T. Ainsworth, I. Hajnsek, T. Mette, et K. P. Papathanassiou, *Forest classification based on L-band polarimetric and intefe-*

rometric SAR data, in POLinSAR 2005 Workshop, ESA, Franscati, Italy, 2005, pp. CD–ROM.

[Lee-06a] J. S. Lee, T. Ainsworth, M. Grunes, et C. Lopez-Martinez, *Monte Carlo evaluation of multi-look effect on entropy/alpha/anisotropy parameters of polarimetric target decomposition*, in IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Colorado, USA, 2006, pp. 52–55.

[Lee-80] J. S. Lee, *Digital image enhancement and noise filtering by use of locals statistics*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-2 (1980), pp. 165–168.

[Lee-81] ——, *Speckle analysis and smoothing of synthetic apperture radar images*, Computer Graphics and Image Processing, 17 (1981), pp. 24–32.

[Lee-83] ——, *Digital noise smoothing and the sigma filter*, Computer Vision, Graphics and Image Processing, 21 (1983), pp. 255–269.

[Lee-86] ——, *Speckle suppresion and analysis for synthetic apperture radar images*, Optical Engineering, 25 (1981), pp. 636–643.

[Lee-91] J. S. Lee, M. R. Grunes, et S. A. Mango, *Speckle reduction in multipolarization, multifrequency SAR imagery*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 29 (1991), pp. 535–544.

[Lee-94a] J. S. Lee, T. Jurkevich, P. Dewaele, P. Wambacq, et A. Oosterlinck, *Speckle filtering of Synthetic Aperture Radar images : a review*, Remote Sensing Reviews, 8 (1994), pp. 313–340.

[Lee-94d] J. S. Lee, K. W. Hoppel, et S. A. Mango, *Intensity and phase statistics of multilook polarimetric interferometric SAR imagery*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 32 (1994), pp. 1017–1028.

[Lee-98] J. S. Lee, K. P. Papathanassiou, T. L. Ainsworth, M. R. Grunes, et A. Reigber, *A new technique for noise filtering of SAR interferometric phase images*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36 (1998), pp. 1456–1465.

[Lee-99] J. S. Lee, M. R. Grunes, et G. deGrandi, *Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37 (1999), pp. 2363–2373.

[Lee-99b] J. S. Lee, M. R. Grunes, T. L. Ainsworth, D. Li-Jen, D. L. Schuler, et S. R. Cloude, *Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37 (1999), pp. 2249–2258.

[Llib-81] L. Lliboutry et L. Reynaud, *"Global dynamics" of a temperate valley glacier, Mer de Glace, and past velocities deduced from Forbes'bands*, Journal of Glaciology, 27 (1981), pp. 207–226.

[Lope-03] C. Lopez-Martinez et X. Fabregas, *Polarimetric SAR speckle noise model*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44 (2003), pp. 2232–2242.

[Lope-05] C. Lopez-Martinez, E. Pottier, et S. R. Cloude, *Statistical assessment of eigenvector-based target decomposition theorems in radar polarimetry*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43 (2005), pp. 2058–2074.

[Lope-05a] C. Lopez-Martinez, X. Fabregas, et E. Pottier, *Wavelet transform based interferometric SAR coherence estimator*, IEEE Transactions on Signal Processing, 12 (2005), pp. 831–834.

[Lope-07] C. Lopez-Martinez et E. Pottier, *On the extension of multidimensional speckle noise model from single-look to multi-look SAR imagery*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45 (2007), pp. 305–320.

[Lope-90] A. Lopes, R. Touzi, et E. Nezry, *Adaptive speckle filters and scene heterogeneity*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 28 (1990), pp. 992–1000.

[Lope-93] A. Lopes, E. Nezry, R. Touzi, et H. Laur, *Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images*, International Journal of Remote Sensing, 14 (1993), pp. 1735–1758.

[Lope-97] A. Lopes et F. Sery, *Optimal speckle reduction for the product model in multilook polarimetric SAR imagery and the Wishart distribution*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35 (1997), pp. 632–647.

[Lyub-99] I. Lyuboshenko et H. Maître, *Phase unwrapping for interferometric synthetic aperture radar by use of helmoltz equation eigenfunctions and the first Green's identity*, Journal of Optical Society of America A, 16 (1994), pp. 1–18.

[Mait-01] H. Maître, *Traitement des images de radar à synthèse d'ouverture*, HERMES Science Publications, 2001.

[Mart-05] A. Martini, *Télédétection d'un couvert neigeux en milieux alpins à partir de données SAR polarimétriques multi-fréquentielles et multi-temporelles*, Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, France, 2005.

[Mass-93a] D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl, et T. Rabaute, *The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry*, Nature, 364 (1993), pp. 183–142.

[Mass-94] D. Massonnet, F. Adragna, et M. Rossi, *CNES general-purpose SAR correlator*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 32 (1994), pp. 636–643.

[Mass-97] D. Massonnet, *Producing ground deformation maps automatically : the DIAPASON concept*, in IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Singapore, vol. III, 1997, pp. 1338–1340.

[Mass-98] D. Massonnet et K. Feigl, *RADAR interferometry and its application to changes in the Earth's surface*, Reviews of Geophysics, 36 (1998), pp. 441–500.

[Matt-98] K. E. Mattar, P. W. Vachon, D. Geudtner, A. L. Gray, I. G. Cumming, et M. Brugman, *Validation of alpine glacier velocity measurements using ERS tandem-mission SAR data*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36 (1998), pp. 974–984.

[Maur-07] Y. Maruyama, *Some notes on improving upon the James-Stein estimator*, http ://www.citebase.org/abstract ?id=oai :arXiv.org :math/0701206, (2007).

[Maxw-65] J. C. Maxwell, *A dynamical theory of the electromagnetic field*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 155 (1865), pp. 459–512.

[Mohr-03] J. J. Mohr, N. Reeh, et S. N. Madsen, *Accuracy of three-dimensional glacier surface velocities derived from radar interferometry and ice-sounding radar measurements*, Journal of Glaciology, 49 (2003), pp. 210–222.

[More-00] L. Moreau et R. Vivian, *Dans le secret des glaciers du Mont-Blanc*, Glénat, 2000.

[Naga-79] M. Nagao et T. Matsuyama, *Edge preserving smoothing*, Computer Graphics and Image Processing, 9 (1979), pp. 394–407.

[Neum-05] M. Neumann, A. Reigber, S. Guillaso, M. Jager, et O. Hellwich, *PolInSAR data processing with RAT (Radar Tools)*, in POLinSAR 2005 Workshop, ESA, Franscati, Italy, 2005, pp. CD–ROM.

[Nico-01] J. M. Nicolas, F. Tupin, et H. Maître, *Smoothing speckled SAR images by using maximum homogeneous region filters : An improved approach*, in IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Sydney, Australia, vol. 3, 2001, pp. 1503–1505.

[Nico-02] J. M. Nicolas, *Introduction aux statistiques de deuxième espèce : applications des log-moments et des log-cumulants à l'analyse des lois d'image radar*, Traitement du signal, 19 (2002), pp. 139–167.

[Nico-04] ——, *Synthèse RSO*, Ecole d'été en imagerie et information, Les Houches (74), France, 2004.

[Nico-07] J. M. Nicolas, G. Vasile, M. Gay, F. Tupin, et E. Trouvé, *SAR processing in the temporal domain : application to direct interferogram generation and mountain glacier monitoring*, Canadian Journal of Remote Sensing, 33 (2007), pp. 1–8.

[Papa-99] K. P. Papathanassiou, *Polarimetric SAR interferometry*, Thèse de doctorat, DLR, Oberpfaffenhofen, Germany, 1999.

[Paqu-98] S. Paquerault, *Restitution du relief à partir d'images radar par radarclinométrie*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Superieure de Telecommunications, Paris, France, 1998.

[Para-94] R. B. Paranjape, T. F. Rabie, et R. M. Rangayyan, *Image restoration by adaptive-neighborhood noise substraction*, Applied Optics, 33 (1994), pp. 1861–1869.

[Pasc-06] F. Pascal, *Détection et estimation en environnement non gaussien*, Thèse de doctorat, Université de Nanterre, France, 2006.

[Pott-07] E. Pottier, L. Ferro-Famil, S. Allain, S. Cloude, I. Hajnsek, K. Papathanassiou, A. Moreira, M. Williams, T. Pearson, et Y. Desnos, *An*

overview of the PolSARpro v2.0 software. The educational toolbox for polarimetric and interferometric polarimetric SAR data processing, in POLinSAR 2007 Workshop, ESA, Franscati, Italy, 2007, pp. CD–ROM.

[Pott-92] E. Pottier et J. Saillard, *Fondements mathematiques de la polarimetrie et son application au domaine du radar*, Annales des télécommunications, 47 (1992), pp. 314–336.

[Prat-07] P. Prats, K. A. C. deMacedo, A. Reigber, R. Scheiber, et J. J. Mallorqui, *Comparison of topography- and aperture-dependent motion compensation algorithms for airborne SAR*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, à paraître, (2007).

[Queg-01] S. Quegan et J. J. Yu, *Filtering of multichannel SAR images*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39 (2001), pp. 2373–2379.

[RGD-7374] *Régie de gestion des données des pays de savoie.* http ://www.rgd73-74.fr.

[Rabu-00] B. T. Rabus et D. R. Fatland, *Comparison of SAR-interferometric and surveyed velocities on a mountain glacier : Black Rapids Glacier*, Journal of Glaciology, 152 (2000), pp. 119–128.

[Rang-98] R. M. Rangayyan, M. Ciuc, et F. Faghih, *Adaptive-neighborhood filtering of images corrupted by signal-dependent noise*, Applied Optics, 37 (1998), pp. 4477–4487.

[Reeh-03] N. Reeh, J. J. Mohr, S. N. Madsen, H. Oerter, et N. S. Gundestrup, *Three-dimensional surface velocities of Storstrommen glacier, Greenland, derived from radar interferometry and ice-sounding radar measurements*, Journal of Glaciology, 49 (2003), pp. 201–209.

[Reeh-99] N. Reeh, S. N. Madsen, et J. J. Mohr, *Combining SAR interferometry and the equation of continuity to estimate the three-dimensional glacier surface-velocity vector*, Journal of Glaciology, 45 (1999), pp. 533–538.

[Reig-07] A. Reigber, M. Jager, M. Neumann, et L. Ferro-Famil, *Polarimetric fuzzy k-means classification with consideration of spatial context*, in POLinSAR 2007 Workshop, ESA, Franscati, Italy, 2007, pp. CD–ROM.

[Reig-07RAT] A. Reigber, *Tutorial "Polarimetric Classification"*, Berlin University of Technology, http ://www.cv.tu-berlin.de/rat, V1 ed., 2007.

[Rich-00] S. Richardson et J. Reynolds, *An overview of glacial hazards in the Hymalayas*, Quaternary International, 65/66 (2000), pp. 31–47.

[Rign-96] E. Rignot, R. Forster, et B. Isacks, *Interferometric radar observations of Glacier San Rafael, Chile*, Journal of Glaciology, 42 (1996), pp. 279–291.

[Rodr-92] E. Rodriguez et J. M. Martin, *Theory and design of interferometric synthetic aperture radars*, IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing), 139 (1992), pp. 147–159.

[Rong-06] Y. Rong, W. Zhenyuan, P. A. Heng, et K. S. Leung, *Real-valued Choquet integrals with fuzzy-valued integrand*, Fuzzy sets and systems, Elsevier, 157 (2006), pp. 256–269.

[Rose-00] P. A. Rosen, S. Hensley, I. R. Joughin, F. K. Li, S. N. Madsen, E. Rodriguez, et R. M. Goldstein, *Synthetic aperture radar interferometry*, Proceedings of the IEEE, 88 (2000), pp. 333–382.

[Rose-04] P. A. Rosen, S. Hensley, G. Peltzer, et M. Simons, *Updated repeat orbit interferometry package released*, The Earth Observation System, Transactions, American Geophysical Union, Electronic Supplement, http ://www.agu.org, 85 (2004).

[Schm-02] M. Schmeltz, E. Rignot, T. K. Dupont, et D. R. Macayeal, *Sensitivity of Pine Island Glacier, West Antarctica, to changes in ice-shelf and basal conditions : a model study*, Journal of Glaciology, 49 (2002), pp. 552–558.

[Scho-01] J. Schou et H. Skriver, *Restoration of polarimetric SAR images using simulated annealing*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39 (2001), pp. 2005–2016.

[Schr-98] M. Schroder, K. Seidel, et M. Datcu, *Spatial information retrieval from remote-sensing images. Part 2 : Gibbs-Markov random fields*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36 (1998), pp. 1446–1455.

[Seym-94] M. Seymour et I. Cumming, *Maximum likelihood estimation for SAR interferometry*, in IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Pasadena, USA, vol. 2, 1994, pp. 2272–2274.

[Shaf-76] G. Shafer, *A mathematical theory of evidence*, Princeton University Press, 1976.

[Shar-07] J. J. Sharma, I. Hajnsek, et K. P. Papathanassiou, *Multi-frequency POLinSAR signatures of a subpolar glacier*, in POLinSAR 2007 Workshop, ESA, Franscati, Italy, 2007, pp. CD–ROM.

[Sinc-48] G. Sinclair, *Modification of the radar range equation for arbitrary targets and arbitrary polarisations*, Rapp. Tech. 302-19, Antenna Laboratory, Ohaio State University, Columbus, USA, 1948.

[Sinc-50] ——, *Transmission and reception of ellipticaly polarized waves*, Proceedings of IRE, 38 (1950), pp. 148–151.

[Spag-95] U. Spagnolini, *2-D phase unwrapping and instantaneous frequency estimation*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40 (1995), pp. 579–589.

[Steb-05] O. Stebler, A. Schwerzmann, M. Luthi, E. Meier, et D. Nuesch, *Pol-InSAR observations from an Alpine glacier in the cold infiltration zone at L- and P-band*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2 (2005), pp. 557–361.

[Ster-03] P. Sterzai, F. Mancini, C. Corazzato, C. D. Agata, et G. Diolaiuti, *Contribution of SAR interferometry (InSAR) to the study of alpine glaciers. the example of Forni glacier (central Alps, Italy) : preliminary results*, in EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Nice, France, 6-11 April 2003, p. (abstract No.12784).

[Stro-02] T. Strozzi, G. H. Gudmundsson, et U. Wegmuller, *Estimation of the surface displacement of Swiss alpine glaciers using satellite radar interferometry*, in 3rd Workshop on Remote Sensing of Land, Ice and Snow, Bern, Switzerland, 11-13 March 2002, p. (abstract).

[Tara-96] H. Tarayre, *Extraction de modèles numériques de terrain par interférometrie radar satellitaire : algorithmie et artéfacts atmosphériques*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1996.

[Touz-02] R. Touzi, *A review of speckle filtering in the context of estimation theory*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40 (2002), pp. 2392–2404.

[Touz-02a] R. Touzi et F. Charbonneau, *Characterization of target symmetric scattering using polarimetric SARs*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40 (2002), pp. 2507–2516.

[Touz-04] R. Touzi, F. Charbonneau, R. Hawkins, et P. Vachon, *Ship detection and characterization using polarimetric SAR*, Canadian Journal of Remote Sensing, 30 (2004), pp. 552–559.

[Touz-04a] R. Touzi, W. M. Boerner, J. S. Lee, et E. Lueneburg, *A review of polarimetry in the context of synthetic aperture radar : concepts and information extraction*, Canadian Journal of Remote Sensing, 30 (2004), pp. 380–407.

[Touz-07] R. Touzi, *Target scattering decomposition in terms of roll-invariant target parameters*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45 (2007), pp. 73–84.

[Touz-07a] ——, *Speckle effect on polarimetric target scattering decomposition of sar imagery*, Canadian Journal of Remote Sensing, 33 (2007), pp. 60–68.

[Touz-88] R. Touzi, A. Lopes, et P. Bousquet, *A statistical and geometrical edge detector for SAR images*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 26 (1988), pp. 764–773.

[Touz-99] R. Touzi, A. Lopes, J. Bruniquel, et P. Vachon, *Coherence estimation for SAR imagery*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36 (1999), pp. 135–149.

[Trou-03] E. Trouvé, Y. Chambenoit, N. Classeau, et P. Bolon, *Statistical and operational performance assessment of multitemporal SAR image filtering*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44 (2003), pp. 2519–2530.

[Trou-05] E. Trouvé, G. Vasile, M. Gay, P. Grussenmeyer, J. M. Nicolas, T. Landes, M. Koehl, J. Chanussot, et A. Julea, *Combining optical and SAR data to monitor temperate glaciers*, in IEEE Geoscience and Remote Sensing, Seoul, Korea, vol. 4, 2005, pp. 2637–2640.

[Trou-06a] E. Trouvé, *Filtrage, extraction et fusion d'informations en imagerie radar multi-composantes*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Savoie, Annecy, France, 2006.

[Trou-07] E. Trouvé, G. Vasile, M. Gay, L. Bombrun, P. Grussenmeyer, T. Landes, J. M. Nicolas, P. Bolon, I. Petillot, A. Julea, L. Valet, J. Chanussot, et M. Koehl, *Combining airborne photographs and spaceborne SAR data to monitor temperate glaciers. Potentials and limits*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45 (2007), pp. 905–924.

[Trou-96] E. Trouvé, H. Caramma, et H. Maitre, *Fringe detection in noisy complex interferograms*, Applied Optics, 35 (1996), pp. 3799–3806.

[Trou-96a] E. Trouvé, *Imagerie interferentielle en radar a visee laterale*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Superieure de Telecommunications, Paris, France, 1996.

[Trou-98] E. Trouvé, J. M. Nicolas, et H. Maître, *Improving phase unwrapping techniques by the use of local frequency*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36 (1998), pp. 1963–1972.

[Tupi-96] F. Tupin, E. Trouvé, X. Descombes, J. M. Nicolas, et H. Maître, *Improving IFSAR phase unwrapping by early detection of non-interferometric features*, in SPIE/EUROPTO Satellite Remote Sensing III, Taormina, Italy, vol. 2958, 1996, pp. 250–261.

[Tur-82] M. Tur, C. Chin, et J. W. Goodman, *When is speckle noise multiplicative ?*, Applied Optics, 21 (1982), pp. 1157–1165.

[Ulab-90] F. T. Ulaby et C. Elachi, *Radar polarimetry for geoscience applications*, Artech House, 1990.

[Vale-03] L. Valet, G. Mauris, P. Bolon, et N. Keskes, *A fuzzy linguistic-based software tool for seismic image interpretation*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 52 (2003), pp. 675–680.

[Vasi-04] G. Vasile, E. Trouvé, M. Ciuc, et V. Buzuloiu, *General adaptive neighborhood technique for improving SAR interferometric coherence and phase estimation*, Journal of Optical Society of America A, 21 (2004), pp. 1455–1464.

[Vasi-04a] G. Vasile, E. Trouvé, M. Ciuc, P. Bolon, et V. Buzuloiu, *Improving coherence estimation for high resolution polarimetric SAR interferometry*, in IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, USA, vol. 3, 2004, pp. 1796–1799.

[Vasi-05] ——, *Intensity-Driven-Adaptive-Neighborhood technique for POLSAR parameters estimation*, in IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, vol. 8, 2005, pp. 5509–5512.

[Vasi-05a] G. Vasile, E. Trouvé, M. Gay, et J. M. Nicolas, *Amplitude-Driven-Adaptive-Neighbourhood filtering of high-resolution POL-InSAR information*, in POLinSAR 2005 Workshop, ESA, Franscati, Italy, 2005, pp. CD–ROM.

[Vasi-05b] G. Vasile, E. Trouvé, L. Valet, J. M. Nicolas, M. Gay, L. Bombrun, et P. Bolon, *SAR polarimetric and interferometric feature estimation : performance assessment of adaptive neighborhood techniques*, in Advanced SAR 2005 Workshop, CSA, Quebec, Canada, 2005.

[Vasi-06] G. Vasile, E. Trouvé, J. S. Lee, et V. Buzuloiu, *Intensity-Driven-Adaptive-Neighborhood Technique for polarimetric and interferometric SAR parameters estimation*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44 (2006), pp. 1609–1621.

[Vasi-06a] G. Vasile, I. Petillot, A. Julea, E. Trouvé, P. Bolon, L. Bombrun, M. Gay, T. Landes, P. Grussenmeyer, et J. M. Nicolas, *High resolution*

SAR interferometry : influence of local topography in the context of glacier monitoring, in IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Denver, USA, 2006, pp. 4008–4011.

[Vasi-07] G. Vasile, E. Trouvé, L. Valet, J. M. Nicolas, M. Gay, L. Bombrun, et P. Bolon, *Feature detection in POL-InSAR images by an interactive fuzzy fusion approach. Application to glacier monitoring*, in POLinSAR 2007 Workshop, ESA, Franscati, Italy, 2007, pp. CD–ROM.

[Vasi-07a] G. Vasile, E. Trouvé, L. Valet, J. M. Nicolas, L. Bombrun, M. Gay, I. Petillot, P. Bolon, et V. Buzuloiu, *Coherent-stable scatterers detection in SAR multi-interferograms : feature fuzzy fusion in Alpine glacier geophysical context*, in IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Barcelona, Spain, 2007, p. à paraître.

[Vinc-02] C. Vincent, *Influence of climate change over the 20th century on four French glacier mass balances*, Journal of Geophysical Research, 107 (2002), pp. 43–75.

[Vinc-04] C. Vincent, G. Kappenberger, F. Valla, A. Bauder, M. Funk, et E. L. Meur, *Ice ablation as evidence of climate change in the Alps over the 20th century*, Journal of Geophysical Research, 109 (2004).

[Wu-92] Y. Wu et H. Maître, *Smoothing speckled synthetic aperture radar images by using maximum homogeneous region filters*, Optical Engineering, 31 (1992), pp. 1785–1792.

[Zebk-05] H. A. Zebker et K. Chen, *Accurate estimation of correlation in InSAR observations*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2 (2005), pp. 124–127.

[Zebk-86] H. A. Zebker et R. M. Goldstein, *Topographic mapping from interferometer synthetic aperture radar observations*, Journal of Geophysical Research, 91 (1986), pp. 4993–5000.

[Zebk-87] H. A. Zebker, J. J. van Zyl, et D. N. Held, *Imaging radar polarimetry from wave synthesis*, Journal of Geophysical Research, 92 (1987), pp. 683–701.

[Zyl-89] J. J. vanZyl, *Unsupervised classification of scattering mechanisms using radar polarimetry data*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35 (1989), pp. 36–45.

Troisième partie

Annexe

Liste des publications

Articles dans des Revues Internationales avec comité de lecture

1. **Vasile G., Trouvé E., Petillot I., Bolon Ph., Nicolas J.M., Gay M., Chanussot J., Landes T., Grussenmeyer P., Buzuloiu V., Hajnsek I., Andres C., Keller M., Horn R.,** *High resolution SAR interferometry: estimation of local frequencies in the context of Alpine glaciers*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (TGRS), à paraître
2. **Trouvé E., Vasile G., Gay M., Bombrun L., Grussenmeyer P., Landes T., Nicolas J.M., Bolon Ph., Petillot I., Julea A., Valet L., Chanussot J., Koehl M.,** *Combining airborne photographs and spaceborne SAR data to monitor temperate glaciers. Potentials and limits*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 45, No. 4, 2007, pp. 905-924.
3. **Nicolas J. -M., Vasile G., Gay M., Tupin F., Trouvé E.,** *SAR processing in the temporal domain: application to direct interferogram generation and mountain glacier monitoring*, Canadian Journal of Remote Sensing (CJRS), Vol. 33, No. 1, 2007, pp. 1-8.
4. **Vasile G., Trouvé E., Lee J. -S., Buzuloiu V.,** *Intensity-Driven-Adaptive-Neighborhood Technique for Polarimetric and Interferometric SAR Parameters Estimation*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 44, No. 5, 2006, pp. 1609-1621.
5. **Vasile G., Trouvé E., Ciuc M., Buzuloiu V.,** *General Adaptive Neighborhood Technique for Improving SAR Interferometric Coherence Estimation*, Journal of Optical Society of America (JOSA-A), Vol. 21, No. 8, 2004, pp. 1455-1464.

Communications dans des Colloques Internationaux avec actes

1. **Vasile G., Trouvé E., Valet L., Nicolas J.M., Bombrun L., Gay M., Petillot I., Bolon Ph., Buzuloiu V.,** *Coherent-stable scatterers detection in SAR multi-interferograms: feature fuzzy fusion in Alpine glacier geophysical context*, IEEE Geoscience And Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007, à paraître
2. **Landes T., Gay M., Trouvé E., Nicolas J.M., Bombrun L., Vasile G., Hajnsek I.,** *Monitoring temperate glaciers by high resolution Pol-InSAR data: first analysis of Argentière E-SAR acquisitions and in-situ measurements*, IEEE Geoscience And Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007, à paraître
3. **Vasile G., Petillot I., Julea A., Trouvé E., Bolon Ph., Bombrun L., Gay M., Landes T., Grussenmeyer P., Nicolas J.-M.,** *High Resolution SAR Interferometry: influence of local topography in the context of glacier monitoring*, IEEE Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS'06), Denver, USA, July 2006, (to appear)
4. **Vasile G., Trouvé E., Valet L., Nicolas J.M., Gay M., Bombrun L., Bolon Ph.,** *Feature detection in POLinSAR images by an interactive fuzzy fusion approach. Application to glacier monitoring*, POLinSAR 2007, European Space Agency, CD-ROM , Franscati, Italy, January 2007, 8 pages.
5. **Vasile G., Petillot I., Julea A., Trouvé E., Bolon Ph., Bombrun L., Gay M., Landes T., Grussenmeyer P., Nicolas J.-M.,** *High Resolution SAR Interferometry: influence of local topography in the context of glacier monitoring*, IEEE Geoscience And Remote Sensing Symposium, Denver, USA, July 2006, pp. 4008-4011.
6. **Julea A., Vasile G., Petillot I., Trouvé E., Gay M., Nicolas J.M., Bolon Ph.,** *Simulation of SAR Images and Radar Coding of Georeferenced Information for Temperate Glacier Monitoring*, International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, vol. IV, Brasov, Romania, May 2006, pp. 175-180.
7. **Vasile G., Trouvé E., Ciuc M., Bolon Ph., Buzuloiu V.,** *Intensity-Driven-Adaptive-Neighborhood Technique for POLSAR Parameters Estimation*, IEEE Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS'05), Vol. VIII, Seoul, Korea, July 2005, pp. 5509-5512.
8. **Trouvé E., Vasile G., Gay M., Grussenmeyer P., Nicolas J.M., Landes T., Koehl M., Chanussot J., Julea A.,** *Combining Optical and SAR Data to Monitor Temperate Glaciers*, IEEE Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS'05), Vol. IV, Seoul, Korea, July 2005, pp. 2637-2640.
9. **Vasile G., Trouvé E., Gay M., Nicolas J.,** *Amplitude-Driven-Adaptive-Neighbourhood Filtering of High-Resolution Pol-InSAR Information*, POLinSAR 2005, European Space Agency, CD-ROM , Franscati, Italy, January 2005, 6 pages.
10. **Vasile G., Trouvé E., Ciuc M., Bolon Ph., Buzuloiu V.,** *Improving Coherence Estimation for High-resolution Polarimetric SAR Interferometry*, IEEE Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS'04), Vol. III, Anchorage, USA, September 2004, pp. 1796-1799.

11. **Bousquet L., Gay M., Legresy B., Vasile G., Trouvé E.,** *Velocities Field of Mountain Glacier Obtained by Synthetic Aperture Radar Interferometry*, IEEE Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS'04), Vol. II, Anchorage, USA, September 2004, pp. 1132-1135
12. **Vasile G., Lepadatu C., Schiopu P., Moldovan C.,** *Chemical Absorption Processes in Polymeric Films for Optical Gas Sensors*, IEEE International Semiconductor Conference, Vol. 1, Sinaia, Romania, October 2002, pp. 59-62.
13. **Vasile G., Moldovan C., Modreanu M.,** *Simulation of Adsorption Processes in Thin Polymeric Films for Resonant Gas Sensors*, 13-rd Micromechanics Europe Workshop, Vol. 1, Sinaia, Romania, October 2002, pp. 161-164.
14. **Vasile G., Lepadatu C., Moldovan C., Nedelcu O.,** *Simulation and design of a resonant polysilicon microbridge*, IEEE International Semiconductor Conference, Vol. 2, Sinaia, Romania, October 2001, pp. 573-576.

Communications dans des Ateliers sans acte

1. **Vasile G., Trouvé E., Petillot I., Bolon Ph., Nicolas J.-M., Gay M., Chanussot J., Landes T., Grussenmeyer P.,** *High Resolution SAR Interferometry: estimation of local frequencies in the context of Alpine glaciers*, Information Extraction and Scene Understanding for Meter Resolution Images, DLR-CNES Workshop, Oberpfaffenhofen, Germany, 2007.
2. **Bombrun L., Vasile G., Gay M., Trouvé E.,** *Analyse multi-dates d'interférogrammes ERS appliqués à l'observation des glaciers*, Journées «CArtographie des CHAngements Naturels par Télédétection», GdR ISIS, Paris, France, novembre 2006.
3. **Trouvé E., Nicolas J.M., Gay M., Landes T., Vasile G., Hanjsek I.,** *Mesure de l'Evolution des Glaciers Alpins par Télédétection Optique et Radar*, Journées PaRI-STIC (Panorama des Recherches Incitatives en STIC), Nancy, France, novembre 2006.
4. **M. Koehl, Trouvé E., Vasile G., Gay M., Grussenmeyer P., Nicolas J.-M., Landes T.,** *SIG pour la gestion cartographique des données du projet MEGATOR : SIG et e-learning*, Conférence francophone ESRI SIG 2006, Issy-les-Moulineaux, France, 2006.
5. **Nicolas J.-M., Datcu M., Tupin F., Trouvé E., Bolon Ph., Vasile G., Landes T., Grussenmeyer P., Gay M., Chanussot J**., *Monitoring temperate glacier activity by X band polarimetric SAR interferometry*, TerraSAR-X Second Science Team Meeting, Oberpfaffenhofen, Germany, 2005
6. **Trouvé E., Gay M., Bolon Ph., Vasile G., Nicolas J.M., Chanussot J., Grussenmeyer P., Landes T.,** *MEGATOR : premiers résultats en photogrammétrie et interférométrie RSO*, Journées PaRI-STIC (Panorama des Recherches Incitatives en STIC), Bordeaux, France, 2005
7. **Vasile G., Trouvé E., Ciuc M., Bolon Ph., Nicolas J.M., Buzuloiu V.,** *SAR polarimetric and interferometric feature estimation: performance assessment of adaptive neighborhood techniques*, Advanced SAR Workshop, Canadian Space Agency, Montreal, Canada, november 2005
8. **Nicolas J.M., Trouvé E., Tupin F., Vasile G.,** *SAR processing in the temporal domain: application to direct interferogram generation and mountain glacier monitoring*, Advanced SAR Workshop, Canadian Space Agency, Montreal, Canada, november 2005
9. **Bujor F., Vasile G., Valet L., Trouvé E.,** *Intégration de connaissance experte dans des systèmes de fusion d'informations*, ORFEO Volet Méthodologique, CNES Workshop, Paris, 2005
10. **Bujor F., Vasile G., Trouvé E., Bolon Ph., Buzuloiu V.,** *Change detection and feature extraction in SAR and PolInSAR images*, Information Extraction and Scene Understanding for Meter Resolution Images, DLR-CNES Workshop, Oberpfaffenhofen, Germany, 2004
11. **Bolon Ph., Nicolas J., Gay M., Vasile G., Trouvé E.,** *Optical and SAR monitoring of glacier evolution: high resolution data issues*, Information Extraction and Scene Understanding for Meter Resolution Images, DLR-CNES Workshop, Oberpfaffenhofen, Germany, 2004
12. **Vasile G., Trouvé E., Ciuc M., Bolon Ph.,** *Estimation de la cohérence interférométrique en imagerie RSO polarimétrique*, Journées «Imagerie polarimétrique» , GdR ISIS / Ondes, Paris, France, 2004
13. **Trouvé E., Vasile G., Gay M., Nicolas J.,** *Mesure de déformations par interférométrie radar satellitaire : application au suivi des glaciers de la Mer de Glace et d'Argentière*, Séminaire Glaciers- BQR Glacier, Université de Savoie, Chambéry, France, 2004
14. **Vasile G., Trouvé E., Ciuc M., Bolon Ph., Buzuloiu V.,** *Estimation de la cohérence interférométrique en imagerie RSO polarimétrique*, école thématique 'Imagerie et Information', organisée par la Société Française d'Optique (S.F.O.), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), GDR ISIS et Ondes, l'Ecole Doctorale « Physique et Sciences de la Matière » (Universités d'Aix Marseille), Les Houches (74), France, 2004
15. **Vasile G., Trouvé E., Ciuc M.,** *Improving HR SAR interferometric coherence and phase estimation*, Information Extraction and Scene Understanding for Meter Resolution Images, DLR-CNES Workshop, Oberpfaffenhofen, Germany, 2003

General adaptive-neighborhood technique for improving synthetic aperture radar interferometric coherence estimation

Gabriel Vasile

Laboratoire d'Informatique, Système, Traitement de l'Information et de la Connaissance, Ecole Supérieure d'Ingénieurs d'Annecy Université de Savoie, B.P. 806, 74016 Annecy Cedex, France, and Department of Applied Electronics and Information Engineering, Politehnica University of Bucharest, Boulevard Iuliu Maniu 1-3, Sector 1, Bucharest, Romania

Emmanuel Trouvé

Laboratoire d'Informatique, Système, Traitement de l'Information et de la Connaissance, Ecole Supérieure d'Ingénieurs d'Annecy Université de Savoie, B.P. 806, 74016 Annecy Cedex, France

Mihai Ciuc and Vasile Buzuloiu

Department of Applied Electronics and Information Engineering, Politehnica University of Bucharest, Boulevard Iuliu Maniu 1-3, Sector 6, Bucharest, Romania

Received August 19, 2003; revised manuscript received March 24, 2004; accepted March 29, 2004

A new method for filtering the coherence map issued from synthetic aperture radar (SAR) interferometric data is presented. For each pixel of the interferogram, an adaptive neighborhood is determined by a region-growing technique driven by the information provided by the amplitude images. Then pixels in the derived adaptive neighborhood are complex averaged to yield the filtered value of the coherence, after a phase-compensation step is performed. An extension of the algorithm is proposed for polarimetric interferometric SAR images. The proposed method has been applied to both European Remote Sensing (ERS) satellite SAR images and airborne high-resolution polarimetric interferometric SAR images. Both subjective and objective performance analysis, including coherence edge detection, shows that the proposed method provides better results than the standard phase-compensated fixed multilook filter and the Lee adaptive coherence filter.
© 2004 Optical Society of America
OCIS codes: 100.2650, 030.6140, 280.6730.

1. INTRODUCTION

Recent radar remote-sensing technology makes it possible to monitor natural and artificial environmental changes from a point of view different from that of optical, multispectral, or thermal sensors.[1,2] The synthetic aperture radar (SAR), mounted on both airplanes and satellites, provides day and night mapping of the scattering properties of target surfaces.

The system measures both amplitude and phase of the backscattered signal, and the result is one complex image for each recording. The principle of SAR interferometry (InSAR) relies on the acquisition of two such complex images under slightly different viewing angles. After the two initial images are coregistered, the normalized complex cross correlation is computed. Its magnitude, called coherence, and its phase are the most commonly known measures in SAR interferometry. The coherence is usually used for describing the temporal stability of the acquired signal. The phase includes a geometrical component directly linked to the distance between the target and the sensor, providing information about the altitude of the target.

Polarimetric SAR interferometry (Pol-InSAR) is an extension of this: Each one of the two sensors is able to emit and receive two polarizations, usually horizontal (H) and vertical (V). Thus four polarization configurations, usually denoted by HH, VV, HV, and VH (according to the emitted and received polarizations), are simultaneously available. Usually the HV and VH modes are fused, and the resulting configuration is denoted by XX. Polarimetric acquisitions are characterized by the 3×3 polarimetric covariance matrix. Interferometry in polarimetric SAR performs two acquisitions (spatially separated by the baseline) of the scattering matrix for each resolution cell. Three interferometric couples can be obtained between the channels of the same polarizations.

For estimation of the coherence, the ensemble averages required by its definition are replaced by spatial averages: A number of L neighboring pixels are averaged to yield an estimate of the coherence and phase image (an operation called complex multilooking). However, despite this initial estimation, both coherence and phase images are highly corrupted by noise. Hence a filtering step is very often required to finally obtain reliable estimates.

Different filtering strategies have been proposed over the past few years. The most commonly used interfero-

metric filter is the fixed multilook filter (FMF), implemented, for instance, in DIAPASON software developed by the Centre National d'Etudes Spatiales.[3] It computes the normalized complex cross correlation for each pixel in a fixed-size centered neighborhood. This filter is used as a reference for comparing the results of newer filtering algorithms in many papers.[4–6] However, the FMF has the drawback (common to all the nonadaptive filtering methods) of not being able to determine the difference between noise and useful signal, and it induces a blurring effect that increases with the achieved noise reduction. A version of the FMF has been obtained by using a weighted average with fixed weights,[4] but this approach cannot improve the results significantly.

Adaptive filtering was seen as a possible solution to improve the filtering performances. The method proposed by Frankot[4] consists of a family of multiple-scale adaptive filters. First, several linear filters with predefined widths are computed. The final result is a weighted combination of these linearly filtered interferograms by use of a criterion function that depends on the signal itself. In theory, this function is a nonlinear function of the interferogram magnitude, or coherence, and its purpose is to increase the influence of the filter optimizing it. One can observe that the complexity of the algorithm is drastically increased, although the results are far from being perfect in all possible cases.

In the framework of Pol-InSAR imagery, Lee *et al.* proposed a spatially adaptive filtering method for improving the accuracy of the coherence estimation.[6] The proposed filter is an extension to the interferometric data of the filter developed by Lee for gray-level images.[7] The basic idea of the filter is to preserve edges and to better filter noise in their vicinity. A set of eight directional subwindows are defined so as to locate the most homogeneous area inside the considered neighborhood. The subwindow selection procedure is driven by the average of the six available span images of the interferometric pair. Only pixels in the selected subwindow are used in computing the filtered value of the coherence, which is derived from the locally linear minimum mean-squared-error estimator of the 6×6 covariance matrix defined in Eq. (6) below:

$$\tilde{C}_{\mathrm{pol}} = \bar{C}_{\mathrm{pol}} + b(C_{\mathrm{pol}} - \bar{C}_{\mathrm{pol}}). \tag{1}$$

In Eq. (1), $\bar{C}_{\mathrm{pol}}$ stands for the average value of the Pol-InSAR covariance matrix computed in the given subwindow, and $b \in [0, 1]$ is a locally computed weight that measures the local data stationarity. The authors have validated the results of the method on L-band experimental SAR polarimetric interferometric data. However, the same filtering procedure can be applied to simple InSARs without any extensions or simplifications.

This paper presents a new, to our knowledge, spatially adaptive filtering algorithm for estimating the coherence of both InSAR and Pol-InSAR data. It takes into account the information contained in the amplitude images of the complex data. Around each pixel, an adaptive neighborhood (AN) is formed with a region-growing technique. Owing to the fact that both the coherence and the phase images are very noisy, the region-growing algorithm is driven by the two amplitude images (or six, for Pol-InSAR data) obtained from the original complex data. Pixels belonging to an adaptive amplitude-driven region are more likely to respect the local stationarity hypothesis than pixels belonging to a squared fixed-size window. The use of adaptive neighborhoods (ANs) ensures that stationarity is met. Also, to ensure phase stationarity, a phase-slope compensation is performed on the basis of the estimation of the local frequencies.[8] Finally, the algorithm recomputes the coherence by averaging the complex values of pixels retained inside this adaptive region, where the signal respects the stationarity requirement. The remainder of this paper is organized as follows. In Section 2 the principles of InSAR and Pol-InSAR are reviewed in more detail. Section 3 is dedicated to the presentation of the proposed AN filtering method. In Section 4 the results obtained with the proposed filter are presented and compared with those given by two other filtering methods, both objectively and subjectively. Finally, in Section 5, some conclusions and perspectives are presented.

2. SAR AND POLARIMETRIC SAR INTERFEROMETRY

A. Interferometric SAR Images

InSAR extracts surface physical properties from the complex correlation coefficient of two SAR signals having the same resolution cells and viewed from slightly different positions. The normalized complex cross-correlation coefficient C of the two SAR observations, u_1 and u_2, is defined as

$$C = \frac{E\{u_1 u_2^*\}}{(E\{|u_1|^2\}E\{|u_2|^2\})^{1/2}}. \tag{2}$$

Under the hypothesis of stationarity, the statistical expectation in Eq. (2) is replaced by the spatial average of a number of L neighboring pixels in the correlation formula to estimate the cross correlation. Its magnitude, given by

$$c = \frac{\left|\sum_{i=1}^{L} u_1 u_2^*\right|}{\left(\sum_{i=1}^{L} |u_1|^2 \sum_{i=1}^{L} |u_2|^2\right)^{1/2}}, \tag{3}$$

is called the coherence image.

The interferometric phase is defined as the phase of the cross correlation,

$$\phi = \arg\left(\sum_{i=1}^{L} u_1 u_2^*\right), \tag{4}$$

and its two-dimensional map is called an interferogram.

An interferogram contains interferometric phase fringes due to the acquisition geometry and fringes due to the topography (or possible surface displacement). Several techniques for interferometric phase fringe extraction from coherent block displacement of the surface have been developed, such as differential SAR interferometry. The coherence itself gives valuable information about surface temporal stability (InSAR coherence imagery).[9] In

all cases, the level of coherence can be a measure of the quality of the interferogram.

Yet several problems affecting the coherence image have been observed. The first is that the initial coherence estimated by Eq. (2) is highly noisy because of the small number of pixels L used in its computation. The use of an increased value of L is restricted, first, by the induced loss of resolution, and, second, by the fact that the local stationarity hypothesis would no longer hold true. The second effect is that the estimated coherence is overestimated with respect to its real value. As shown by Touzi *et al.*,[10] who computed the first-order statistics of the coherence, this effect is all the more important as the coherence decreases toward zero; i.e., the image areas the most affected will be noncoherent areas, such as water.

B. Polarimetric SAR Imaging

Terrain classification and extraction of geophysical parameters from SAR images are very much suited to radar polarimetry. The conventional approaches are the statistical analysis of the polarimetric information and the use of scattering models that provide an understanding of the scattering process. More recently, a new approach has been elaborated to deduce the terrain slopes and elevations from a single polarimetric data set, making it possible to extract topographic information.[11] More information is available by applying the interferometry principles in polarimetry. For example, the accuracy of interferometric coherence is critical in the estimation of forest parameters such as the height of the trees.[12]

The Pol-InSAR data are obtained by two parallel passes separated by a baseline for interferometry. It is most commonly collected in an antenna scattering matrix form, for the pass $i \in \{1, 2\}$:

$$s_i = \begin{pmatrix} S_{\mathrm{HH}_i} \\ \sqrt{2} S_{\mathrm{XX}_i} \\ S_{\mathrm{VV}_i} \end{pmatrix}. \tag{5}$$

The usual complete representation of the data is the 6 $\times$ 6 covariance matrix:

$$C_{\mathrm{pol}} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} (s_1^{*T} \quad s_2^{*T}) = \begin{bmatrix} V_{11} & K_{12} \\ K_{12}^{*T} & V_{22} \end{bmatrix}, \tag{6}$$

where V_{11} and V_{22} are 3×3 polarimetric covariance matrices from each pass and K_{12} is the interferogram matrix between the polarized acquisitions.[6]

The coherence between polarizations is defined as follows:

$$C_{xx/yy} = \frac{|E\{S_{xx} S_{yy}^*\}|}{(E\{|S_{xx}|^2\} E\{|S_{yy}|^2\})^{1/2}}, \tag{7}$$

for $xx, yy \in \{\mathrm{HH}, \mathrm{VV}, \mathrm{XX}\}$. This quantity is a statistical average; hence it requires averaging as many samples as possible belonging to the same distribution. In practice, the coherence is also estimated by a spatial average,

$$c_{xx/yy} = \frac{\left| \sum_{i=1}^{L} S_{xx} S_{yy}^* \right|}{\left(\sum_{i=1}^{L} |S_{xx}|^2 \sum_{i=1}^{L} |S_{yy}|^2 \right)^{1/2}}, \tag{8}$$

together with the polarimetric interferometric phase:

$$\phi_{xx/yy} = \arg\left(\sum_{i=1}^{L} S_{xx} S_{yy}^* \right). \tag{9}$$

Finally, on one interferometric acquisition three strongly correlated interferometric couples (one corresponding to each polarization configuration) and three coherence-phase pairs are available. They correspond to the three diagonal terms of the matrix K_{12}.

3. ADAPTIVE-NEIGHBORHOOD FILTERING

A. Initial Complex Multilooking

The interferometric phase difference can be computed right away at the single-look-complex (SLC) full resolution by use of Eq. (4) with $L = 1$. The single-look phase estimate is extremely noisy, and the coherence cannot be estimated without spatial averaging. Accordingly, the complex averaging from Eq. (3) is performed (assuming local stationarity) to obtain the initial phase and coherence estimates. This initial averaging, also called complex multilooking, regroups the L SLC pixels of the averaging window to form one pixel in the resulting phase and coherence images. For instance, in the case of European Remote Sensing (ERS) satellite SLC images, approximately square pixels are obtained by averaging every five lines of each column. The coherence and phase estimated by this initial complex multilooking are still very noisy, especially in low-coherence areas (see Fig. 1 below).

This spatial averaging is usually applied to the squared magnitudes of each SLC image to derive amplitude images at the same resolution as phase and coherence initial estimates (see Fig. 1 below). These amplitude images benefit from a speckle reduction similar to the one of an L-look image that would be formed by conventional multilook SAR processing.

B. Adaptive Neighborhoods

The concept of ANs for image processing has been introduced by Gordon and Rangayyan[13] in the framework of an application in medical imagery. In each pixel (called seed when processed), a neighborhood of variable shape and dimensions is built by a classical region-growing algorithm, containing only connected pixels that, ideally, belong to the same statistical population as the seed. Then only the values of pixels aggregated in the AN participate in the computation of the final value of the seed. The method is meant to overcome the limitations implied by the use of fixed-size neighborhoods, where, in general, an insufficient number of samples is available, which, in addition, may not respect the requirement of stationarity. The AN paradigm has been used for filtering of gray-level[14,15] and color images.[16] A three-dimensional extension has also been proposed for AN filtering of multitemporal SAR images.[17]

The present paper extends this approach to the filtering of the InSAR data. Without losing the stationarity of the averaged signal, an AN makes it possible to reach the number of pixels necessary for reliable coherence estimation. The details of the implementation are presented in the following subsections.

1. Application to InSAR

Several information sources can drive the region-growing algorithm: amplitude, coherence, and phase. In the proposed method, only the amplitude information is used to decide on the pixel membership to the AN. The reasons for this choice are the following:

- The initial coherence image is very noisy (see Section 2).
- The wrapped phase image is too complex owing to the noise and the discontinuities at both ends of the $[0,2\pi]$ interval.
- The small homogeneous regions within the two (or six for Pol-InSAR data) amplitude images correspond to ground areas with a homogeneous cover that should respect the stationarity hypothesis.

So the two amplitudes A_1 and A_2, obtained after initial complex multilooking, are considered a bivariate image:

$$a(m, n) = [A_1(m, n), A_2(m, n)]^T. \tag{10}$$

The proposed AN determination relies on the image $a(m, n)$ and involves processing the vectorial image (as in the case of color images) mixed with the multiplicative noise model (speckle noise is present in all SAR amplitude images). The algorithm consists of the following steps[18]:

1. *Rough estimation of the seed value*. To have an estimation more robust than the initial value of the current pixel $a(m, n)$, the marginal median in the 3×3 centered neighborhood is used as the seed value $\hat{a}(m, n)$.

2. *Region growing*. All the eight direct neighbors $a(m', n')$ of the seed are accepted inside the AN provided that they meet the following condition:

$$\frac{\|a(m', n') - \hat{a}(m, n)\|}{\|\hat{a}(m, n)\|} \leqslant T_1, \qquad T_1 = \sigma_n/\mu_n. \tag{11}$$

The threshold T_1 is set according to the speckle mean μ_n and standard deviation σ_n, which are constants *a priori* known, as both of them depend on the initial number of looks L and are identical for both amplitude images.[17] The inclusion criterion in expression (11) allows the retention in the AN of pixels whose values differ from that of the seed by no more than the noise standard deviation. This choice will be explained in more detail further.

Then the same procedure is applied to all the neighbors of the newly included pixels and so on. The region growing iterates in this manner until either the number of the pixels already included in the AN exceeds a predefined upper limit $N_{\max}$ or none of the neighbors verify the test condition (11). The pixels that have already been tested but not accepted inside the AN (called background pixels in the sequel) are stored in a separate list.

3. *Refined estimation of the seed value*. A more reliable estimator of the unspeckled seed value is now obtained by averaging the pixels included in the AN from the previous step $\bar{a}(m, n)$:

4. *Reinspection of the background pixels*. The background pixels $a(o, p)$ of the list created in step 2 are tested again and aggregated in the AN provided that

$$\frac{\|a(o, p) - \bar{a}(m, n)\|}{\|\bar{a}(m, n)\|} \leqslant T_2, \qquad T_2 = 2T_1. \tag{12}$$

Thus the AN is updated with the pixels meeting the criterion in expression (12). The test is less restrictive, as the inclusion threshold is twice as large as the one used in the first step of region growing.

Expressions (11) and (12) propose an extension of the model presented in Ref. 16 for color images. The idea, based on Lee's sigma filter,[19] is to retain in the AN pixels the values of which differ from that of the seed by an amount that cannot exceed twice the noise standard deviation. This comes from the observation that, for a Gaussian population with parameters m and σ, 95% of the samples lie in the interval $[m - 2\sigma, m + 2\sigma]$. The $\pm 2\sigma$ interval ensures the population retained in the AN is statistically significant. However, it is not desirable to use a single-step region-growing algorithm with threshold $2\sigma_{\text{noise}}$ (especially when the noise is strong, which is the case in the SAR imagery) owing to the risk that the region grows over boundaries, in contradiction with the very principle of the algorithm. This is why a two-step region-growing procedure is used. The first step, carried out with threshold σ_{noise}, allows the region to grow (for a Gaussian population, the percentage of samples lying at $\pm\sigma$ from the mean is 57%) even though it will contain many holes, i.e., pixels that were not retained owing to the fact that they were affected by an instance of noise that exceeds a standard deviation from the mean. However, these pixels belong to the same statistical population and should be retained in the AN. This is achieved in the second step, in which only pixels that were rejected in the first step are reinspected with a less restrictive threshold ($2\sigma_{\text{noise}}$). The advantage of reinspecting only previously inspected pixels is that most of them are located inside the convex hull of the AN determined in step one because they neighbor at least one of the pixels retained in the AN (otherwise, they would not have been checked in step one). Thus the risk of having the AN grow over boundaries is practically eliminated.

Moreover, owing to the multiplicative noise model from the SAR amplitude images, the noise standard deviation is replaced by the variation coefficient (normalized standard deviation).[17]

However, in some particular cases, the size of the AN may be too small to improve coherence estimation. In such a case, a different procedure is used to obtain an AN of the minimum size. If the size of the AN obtained by the region-growing procedure is smaller than nine pixels (the dimension of the classical 3×3 square neighborhood), a set of directional windows is explored to select the window that is the most homogeneous in the ampli-

tude images A_1 and A_2. This directional window selection is similar to the well-known Nagao–Matsuyama filter approach.[20]

In each pixel (m, n) requiring this alternate procedure, the mean $\mu_{i_k}(m, n)$ and the variance $\sigma^2_{i_k}(m, n)$ are computed for each of the eight directional subwindows $\mathcal{W}_i$ defined in Ref. 20 in every amplitude image A_k. Then the window minimizing the sum of the variation coefficients (normalized variances) is selected:

$$\mathcal{W} = \mathcal{W}_j,$$

with

$$j = \arg\min_{i=1\ldots8}\left[\sum_{k=1}^{2}\frac{\sigma^2_{i_k}(m, n)}{\mu^2_{i_k}(m, n)}\right]. \quad (13)$$

In the following, $\mathcal{W}$ denotes the resulting neighborhood obtained either by region growing or by directional window selection.

2. Application to Pol-InSAR

As described in Section 2, in Pol-InSAR two acquisitions with three different polarization configurations are available. So the target surface is characterized by six SLC images.

An extension of the algorithm presented in Subsection 3.B.1 is proposed for improving the phase and coherence images of the three couples formed by two acquisitions having the same polarization. However, in recomputing the normalized complex correlation, the information contained in all six available images is combined to construct the most precise AN possible. The region growing is driven by all six amplitude images:

$$p(m, n) = \begin{pmatrix} p_{\mathrm{HH}}(m, n) \\ p_{\mathrm{VV}}(m, n) \\ p_{\mathrm{XX}}(m, n) \end{pmatrix}^T = \begin{bmatrix} A_1^{\mathrm{HH}}(m, n) & A_2^{\mathrm{HH}}(m, n) \\ A_1^{\mathrm{VV}}(m, n) & A_2^{\mathrm{VV}}(m, n) \\ A_1^{\mathrm{XX}}(m, n) & A_2^{\mathrm{XX}}(m, n) \end{bmatrix}^T. \quad (14)$$

The same steps are performed as follows:

1. *Rough estimation of the seed value*. As in the previous case, the marginal median provides the seed value $p(\widehat{m, n})$, but this time the dimension of p is 3×2.

2. *Region growing*. Because three couples are now available, expression (11) can be written for each pair of amplitude images. The three distances are merged in a simple aggregation test given by

$$\frac{\|p_{\mathrm{HH}}(k, l) - p_{\widehat{\mathrm{HH}}}(m, n)\|}{\|p_{\widehat{\mathrm{HH}}}(m, n)\|} + \frac{\|p_{\mathrm{VV}}(k, l) - p_{\widehat{\mathrm{VV}}}(m, n)\|}{\|p_{\widehat{\mathrm{VV}}}(m, n)\|} + \frac{\|p_{\mathrm{XX}}(k, l) - p_{\widehat{\mathrm{XX}}}(m, n)\|}{\|p_{\widehat{\mathrm{XX}}}(m, n)\|} \leqslant T_1, \quad T_1 = 3(\sigma_n/\mu_n). \quad (15)$$

3. *Refined estimation of the seed value*. As in Section 1, the mean $\bar{p}(m, n)$ is computed on this strict neighborhood.

4. *Reinspection of the background pixels*. The test to accept the newly inspected pixels is

$$\frac{\|p_{\mathrm{HH}}(o, p) - \overline{p_{\mathrm{HH}}}(m, n)\|}{\|\overline{p_{\mathrm{HH}}}(m, n)\|} + \frac{\|p_{\mathrm{VV}}(o, p) - \overline{p_{\mathrm{VV}}}(m, n)\|}{\|\overline{p_{\mathrm{VV}}}(m, n)\|} + \frac{\|p_{\mathrm{XX}}(o, p) - \overline{p_{\mathrm{XX}}}(m, n)\|}{\|p_{\mathrm{XX}}(m, n)\|} \leqslant T_2, \quad T_2 = 2T_1. \quad (16)$$

If the size of the resulting AN is smaller than nine pixels, then the AN is replaced by a directional window selected according to Eq. (13) with the sum of the variation coefficients σ_i^2/μ_i^2 performed over the six available amplitude images A_k.

The window resulting from the six-amplitude-driven region-growing technique (or the directional window selection) is expected to better preserve the edges of the spatial features which may have different coherence levels.

C. Final Filtering

When one computes the interferometric coherence, the deterministic geometrical phase component must be compensated to preserve the signal stationarity. On the initial phase image, a modified version of the MUSIC algorithm is applied to measure the local frequency (f_x, f_y) of a fringe pattern corresponding to a two-dimensional sine-wave model.[8] This method requires no prior information about the acquisition geometry (baseline or altitude of the SAR system) and relies on available SAR data only. For each pixel (m, n), an estimate of the two-dimensional local frequency $[\hat{f}_x(m, n), \hat{f}_y(m, n)]$ is obtained. In the final filtering stage, by subtraction of the local phase variations, the complex multilooking is adapted to the local fringe pattern. In every point (k, l) of the current filtering window $\mathcal{W}(m, n)$ corresponding to the pixel (m, n), the flattened phase is given by

$$\psi(k, l) = \phi(k, l) - 2\pi[(k - m)\hat{f}_x + (l - n)\hat{f}_y] \pmod{2\pi}. \quad (17)$$

The local slope-compensated phase ψ is now a stationary signal, with only the differences between the exact fringe pattern and the first-order model influencing its variation.

The classical slope-compensated filtering method performs a complex averaging over a fixed-size sliding window $\mathcal{W}$, taking into account the amplitude, phase, and coherence images. In Ref. 8 the local estimate of the geometrical phase component is removed to ensure phase stationarity with the following approximate complex multilooking:

$$\tilde{c}(m, n)\exp[\jmath\tilde{\phi}(m, n)] = \frac{\sum_{(k,l)\in\mathcal{W}} A^2(k, l)c(k, l)\exp[\jmath\psi(k, l)]}{\sum_{(k,l)\in\mathcal{W}} A^2(k, l)}, \quad (18)$$

where $A^2(k, l) = [A_1^2(k, l) + A_2^2(k, l)]/2$, $\psi(k, l)$ is given by Eq. (17), and $\mathcal{W}$ is a fixed-size (typically 5×5) neighborhood. In this type of approach the number of pixels averaged may not be sufficient to reduce the estimation variance (especially for a low coherence level) and the stationarity hypothesis is not always respected.

The AN $\mathcal{W}$ constructed in Subsection 3.B solves these problems. Moreover, when images A_1 and A_2 are independently available, the filtering formula can be improved by

$$\tilde{c}(m, n)\exp[j\tilde{\phi}(m, n)] = \frac{\sum_{(k,l)\in\mathcal{W}(m, n)} A_1(k, l)A_2(k, l)c(k, l)\exp[j\psi(k, l)]}{\left[\sum_{(k,l)\in\mathcal{W}(m, n)} A_1^2(k, l) \sum_{(k, l)\in\mathcal{W}(m, n)} A_2^2(k, l)\right]^{1/2}}. \quad (19)$$

One can observe that Eq. (19) practically recomputes the phase-compensated complex averaging over the largest possible neighborhood (without losing stationarity). In the case of the Pol-InSAR data set, each interferometric couple (HH, VV, and XX) is filtered, according to Eq. (19), with the AN driven by the six amplitude images.

4. RESULTS AND DISCUSSION

To illustrate the performances of the AN filtering method presented in Section 3, we report results obtained with real interferograms and SLC images. Two data sets are used:

- Spaceborne InSAR images of the Cameroon River estuary, Cameroon.
- Airborne Pol-InSAR images of the Oberpfaffenhofen area, Wessling, Germany.

A. SAR Data Characteristics

The spaceborne data set was acquired in 1995 by ERS1–ERS2 Tandem. The ERS satellites are equipped with *C*-band sensors at 5.3-GHz working frequency. They operate in vertical polarization with the mean incidence angle of 23°. The target area is the region of the Cameroon River estuary, near Douala.

The airborne data set was acquired in 1999 by an airborne experimental SAR system.[21] It represents a repeated-pass interferometric fully polarimetric *L*-band (1.25-GHz) acquisition with a baseline of approximately 15 m. The available polarization configurations are HH, VV, and HV.

The target area is the Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) headquarters (Oberpfaffenhofen area) in Wessling, Germany. It includes a very large variety of zones, being one of the most used test Pol-InSAR images. It contains agricultural areas for change detection,[22] as well as forest regions available for vegetation structure extraction,[21] or small building areas, streets, and a highway for contour detection.[23]

B. Results of Filtering on InSAR

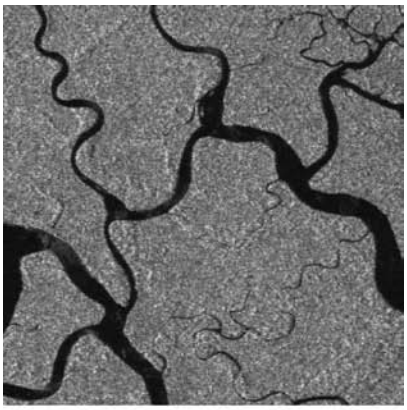
In this subsection the results obtained by the phase-compensated adaptive neighborhood filter (ANF) are presented, and comparisons with the 5×5 phase-compensated fixed multilook filter (FMF) and the Lee adaptive filter (LAF) are performed. The SAR data set used is the spaceborne interferometric couple over the Cameroon River estuary. The value of the $N_{\max}$ ANF parameter has been chosen to be 50 pixels in order to match the amount of filtering required to efficiently reduce the estimation bias and the variance due to the noise. σ_n has been chosen to be 0.3 (both for the ANF and for the LAF), since all the initial images (two amplitudes, coherence, and interferogram) are five-look data.

Both of the original SLC images of the Cameroon River estuary have 4900×25859 pixels. Figure 1 presents 410×410 pixel subimages resulting from the initial complex multilooking ($L = 5$) of the original data. The two (master and slave) amplitude images and the initial coherence map are shown. The amplitude images reveal some of the water areas by a very low backscattering coefficient due to the specular reflection. In spite of the presence of strong noise, the coherence image includes the spatial information on the water regions covered by high mangroves, which are also strongly decorrelated (volume backscattering). In the coherence image, the water channels are wider and more visible than in the amplitude images, where they are partially or even totally hidden in mangroves.

The histograms of the initial, FMF, LAF, and ANF coherence maps are presented in Fig. 2. If the initial coherence histogram has a single mode, the FMF coherence histogram already presents two modes, which correspond to two classes, namely, water (plus mangroves) areas and forest regions. The two modes are difficult to separate as they overlap to a significant extent. With the ANF, the separation between the two modes is clearer, which permits a better classification based on the coherence information. As can be easily observed, the LAF coherence estimation has not performed very well in separating the two modes owing to the fact that the bias is less reduced than by the other two filters (FMF and ANF).

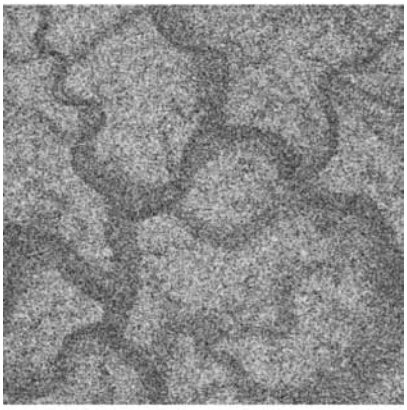
The proposed method is well suited for preserving isolated brilliant points corresponding to strong reflectors. This can be observed on the region-size map presented in Fig. 3.

All three filters improve considerably the coherence image (see Fig. 3), by efficiently reducing noise and compensating for the initial overestimation problem. However, the ANF ensures sharper contours, and the bias is also much more reduced, especially on lower-coherence areas, such as water regions. The bias reduction can be also observed from Table 1, which exhibits mean values computed over manually selected homogeneous regions (of approximately 100 pixels) with different coherence levels. An important decrease of the mean value after filtering is present over the low-coherence areas (areas 1 and 2), i.e., where the bias was important (see Section 2). At the same time, in the medium-coherence areas (area 3), where the bias was originally low, the reduction on the average value is less important. Also, the variance computed over all three regions is minimum for the ANF (see Table 2), showing that this filter performs the strongest noise reduction inside homogeneous regions. Between the LAF and the FMF, the latter better reduces both noise



(a)

(b)



(c)

Fig. 1. Spaceborne InSAR data over the Cameroon River estuary region after five-look averaging (410 × 410 pixel subimages): (a) master amplitude image, (b) slave amplitude image, (c) initial coherence map.

and bias. At first sight, this is a weird conclusion, given the difference between the complexities of the two filters: One would expect the LAF to perform better than the FMF. Still, this is not the case in terms of bias reduction. This can be explained by the fact that the operation performed by the LAF [Eq. (1)] is not exactly a complex averaging of a given number of samples but rather a weighted complex average between the initial value of the filtered pixel and the 28-sample complex averaging performed on the selected window. As soon as b is different from zero, the initial matrix influences the result and decreases the filtering performance, especially the bias reduction in low-coherence areas (whereas the FMF always performs a 25-sample complex averaging).

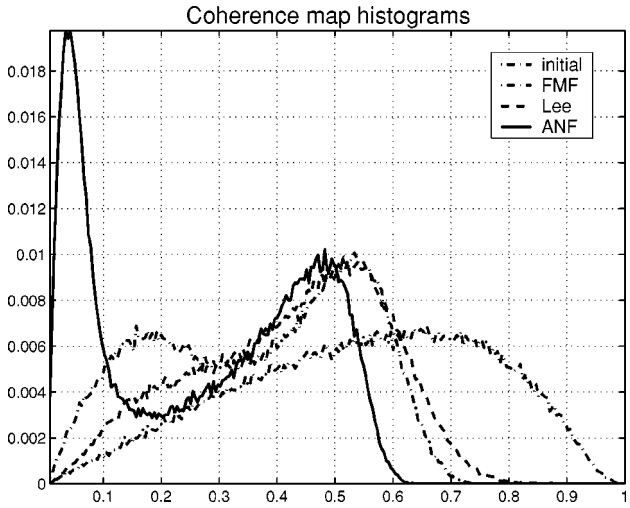
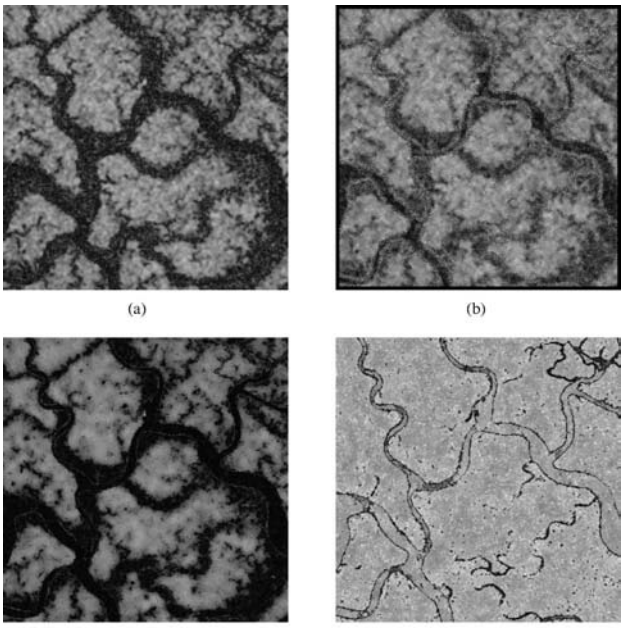


Fig. 2. Histograms of the coherence images over the Cameroon River estuary region from Fig. 3.



(a) (b) (c) (d)

Fig. 3. Results of coherence filtering on InSAR Cameroon River estuary region: (a) coherence after the 5 × 5 FMF, (b) coherence after the LAF, (c) coherence after the ANF, (d) map of the AN region size. Small sizes are mapped to dark tones, and large sizes are mapped to light tones.

Table 1. Coherence Mean over Homogeneous Areas on the Cameroon River Estuary Region

Area	Initial	FMF	LAF	ANF
1	0.3774	0.1213	0.1398	0.0402
2	0.4647	0.1353	0.1427	0.0466
3	0.6402	0.5729	0.5763	0.5335

Table 2. Coherence Standard Deviation over Homogeneous Areas on the Cameroon River Estuary Region

Area	Initial	FMF	LAF	ANF
1	0.0356	0.0026	0.0039	0.0003
2	0.0389	0.0047	0.0111	0.0003
3	0.0368	0.0008	0.0024	0.0004

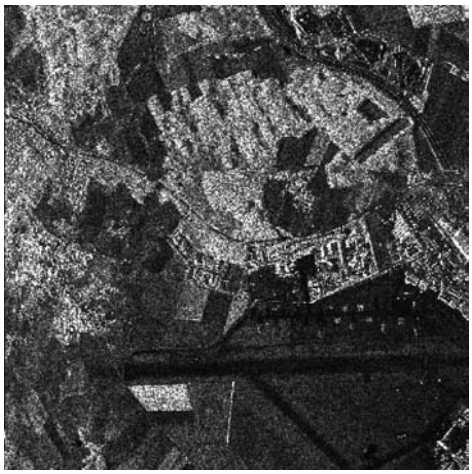


Fig. 4. One of the airborne Pol-InSAR two-look amplitude images of the DLR Oberpfaffenhofen area (1400 × 1400 pixels).

C. Results of Filtering on Pol-InSAR

Because in Pol-InSAR additional information is available in the different polarizations, the phase-compensated 6-amplitude-driven ANF (6-ADANF) is proposed for this type of image. In this subsection the results obtained by the 6-ADANF are presented and compared with those obtained by the previously discussed LAF and FMF. The parameters used in the implementation of the 6-ADANF are $N_{\max} = 50$ and $\sigma_n = 0.5$ (corresponding to two-look images).

The airborne SLC test images of the DLR Oberpfaffenhofen area have 1540 × 2815 pixels each. After the initial two-look complex multilooking, three interferograms and coherence maps with six amplitude images are produced. The master amplitude image corresponding to the HH polarization configuration is presented in Fig. 4.

The interferometric couple formed by the HH polarization configuration was chosen to illustrate the coherence filtering performances of the three filters (see Figs. 5 and 6). One can see that, here too, the 6-ADANF outperforms the two other filters from a visual point of view: Uniform areas are better smoothed, contours are better preserved, and bias is more reduced.

To objectively assess the performances of the three filters, we compute and further analyze the receiver operating characteristics (ROCs). First, a contour map is computed, starting from the coherence map by use of a classical edge detector (such as Sobel). For evaluation purposes, contours along the highway and airdrome are manually selected to form the detection regions. A false-alarm region is also selected on the homogeneous fields around. Zoomed images of FMF, LAF, and 6-ADANF coherence images are presented in Fig. 6. The resulting gradient of the 6-ADANF image and a part of the region-selection masks are shown in Fig. 7.

The normalized histogram of the gradient magnitude on the area defined by the contour mask provides an estimate of the detection probability density function $f_\delta(x)$. The histogram on the homogeneous region mask stands for an estimate of the false-alarm probability density function $f_\phi(x)$. For a certain decision threshold Θ, over the gradient module image, the detection P_d and the false-alarm P_{fa} probabilities are given by

$$P_d = \int_{\Theta}^{V_{\max}} f_\delta(x)\mathrm{d}x, \tag{20}$$

$$P_{\text{fa}} = \int_{\Theta}^{V_{\max}} f_\phi(y)\mathrm{d}y, \tag{21}$$

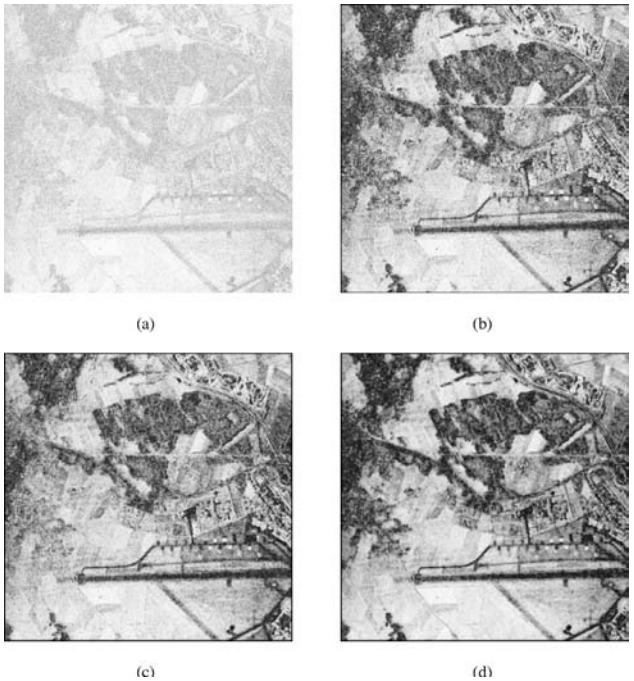


Fig. 5. Results of filtering Pol-InSAR data over the DLR headquarters: (a) initial two-look coherence map for the HH polarization configuration, (b) coherence filtered by the FMF, (c) coherence filtered by the LAF, (d) coherence filtered by the 6-ADANF.

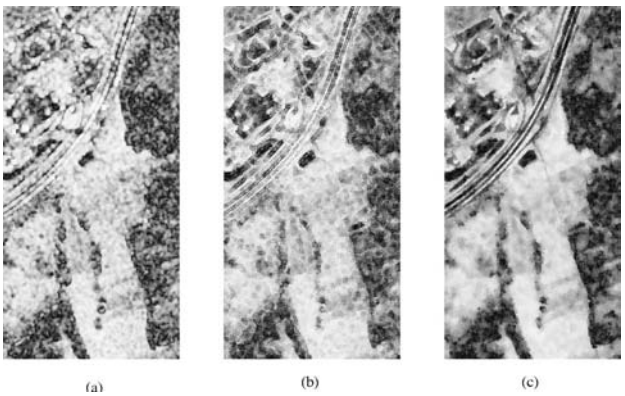
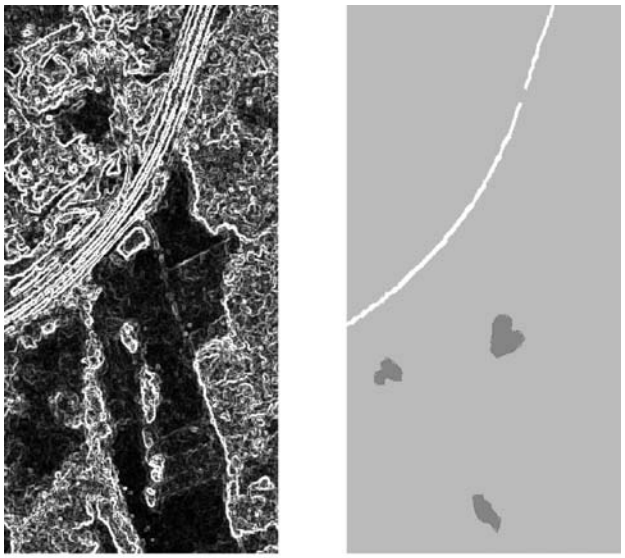


Fig. 6. Zoom on Pol-InSAR-filtered data over the DLR headquarters (500 × 260 pixel subimages): (a) after the FMF, (b) after the LAF, (c) after the 6-ADANF.



(a) (b)

Fig. 7. Pol-InSAR data over the DLR headquarters: (a) Sobel gradient module of the 6-ADANF coherence image, (b) mask used in the ROC analysis.

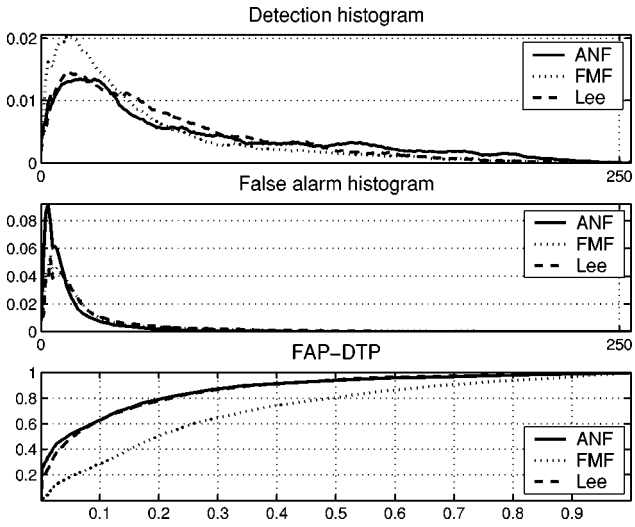


Fig. 8. Assessment of the edge-detection performance in the Pol-InSAR-filtered coherence images: detection histograms (corresponding to the contour regions), false-alarm histograms (corresponding to the homogeneous regions), and the resulting ROC (detection probability versus false-alarm probability).

where $V_{\max}$ is the maximum value of the gradient's magnitude. The ROCs of the edge detector are obtained when Θ varies in the interval $[0, V_{\max}]$ representing the detection probability versus the false-alarm probability.

Figure 8 represents the normalized histograms of the detection and false-alarm areas corresponding to the gradient on each of the filtered coherence images. Finally, the resulting three ROC curves can be analyzed. From the detection point of view, the LAF and the 6-ADANF have similar performances; both are better than the FMF. This is normal, since the first two are adaptive filters and are especially designed for edge preservation. The false-alarm histogram shows better performances for the 6-ADANF. This can be explained by the fact that, in terms of noise reduction in homogeneous areas, the proposed 6-ADANF is more efficient than the FMF and LAF. This can also be noted in Tables 3 and 4, which present the three filter-smoothing and bias-reduction performances on uniform areas, as in Subsection 4.B. Both the variance and the bias are reduced the most by use of the 6-ADANF.

The ROC analysis shows that the two adaptive filters LAF and 6-ADANF have almost the same performance in preserving the spatial features. However the proposed 6-ADANF behaves better in reducing the initial estimation bias and the local variance due to noise. This shows that the resulting 6-ADANF coherence map is more accurate, making this information very useful for segmentation and classification techniques or good-quality masking for phase-unwrapping algorithms.[24]

5. CONCLUSION

A new technique for filtering coherence images issued from an SAR interferometric pair has been presented. The proposed filter uses adaptive neighborhoods as spatial support, derived with respect to the amplitude information. All the available amplitude images of the interferometric couple are combined in the region-growing procedure to ensure the stationarity of the averaging region. The phase stationarity is provided by the phase-slope compensation based on the estimation of the local frequencies. The proposed filter recomputes the coherence map, by averaging over the largest possible neighborhood. An extension for Pol-InSAR images is also presented.

The experimental results have proved that the noise is greatly reduced and the coherence bias is reduced, while the contours and fine details are preserved and the blurring effect is avoided. The reliability of the obtained results is demonstrated by either subjective assessment or

Table 3. Coherence Mean over Homogeneous Regions for the Oberpfaffenhofen Area from the DLR

Area	Initial	FMF	LAF	6-ADANF
1	0.7355	0.2054	0.1839	0.1093
2	0.7871	0.2504	0.2489	0.1476
3	0.8272	0.5643	0.5535	0.5694
4	0.9186	0.8289	0.8290	0.8224
5	0.9855	0.9641	0.9657	0.9636

Table 4. Coherence Standard Deviation over Homogeneous Regions for the Oberpfaffenhofen Area from the DLR

Area	Initial	FMF	LAF	6-ADANF
1	0.0454	0.0093	0.0066	0.0036
2	0.0386	0.0135	0.0137	0.0055
3	0.0342	0.0135	0.0128	0.0049
4	0.0178	0.0026	0.0030	0.0008
5	0.0021	0.0003	0.0004	0.0001

conventional objective ROC analysis and bias-reduction tables. All these features make this adaptive filtering algorithm a powerful tool for interferometric data postprocessing.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the Institut Francilien des Géosciences, the European Space Agency for providing the ERS images under project ID 539 and the German Aerospace Center (DLR) in Wessling, Germany, for providing the high-resolution polarimetric experimental SAR images.

Emmanual Trouvé, the corresponding author, may be reached by phone, 334-50-09-65-48; fax, 334-50-09-65-59; or e-mail, trouve@esia.univ-savoie.fr. Gabriel Vasile, Mihai Ciuc, and Vasile Buzuloiu may be reached by phone or fax, 4021-402-4821. Their e-mail addresses are {mciuc,buzuloiu,gvasile}@alpha.imag.pub.ro.

REFERENCES

1. J. Haarpainter, C. Kergomard, J. C. Gascard, and P. M. Haugen, "Sea ice dynamics observed by ERS-2 SAR imagery and ARGOS buoys in Storfjorden, Svalbard," in *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS '00) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2000), Vol. II, pp. 467–469.
2. S. Dellepiane, G. Bo, S. Monni, and C. Buck, "SAR images and interferometric coherence for flood monitoring," in *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS '00) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2000), Vol. VI, pp. 2608–2610.
3. D. Massonnet and F. Adragna, "Description of the DIAPASON software developed by CNES current and future applications," Tech. Rep. Space Image Quality and Processing Division, Centre National d'Etudes Spatiales, FRINGE '96 Workshop, Zurich, Switzerland, 1996.
4. R. T. Frankot, "Interferometric SAR adaptive filtering method for improved yield and detail," in *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS '98) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 1998), Vol. I, pp. 74–76.
5. C. Lopez, X. Fabregas, J. Mallorqui, O. Mora, and M. Chandra, "Noise filtering of SAR interferometric phase based on wavelet transform," in *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS '01) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2001), Vol. VI, pp. 2928–2930.
6. J. S. Lee, S. R. Cloude, K. Papathanassiou, M. R. Grunes, and I. H. Woodhouse, "Speckle filtering and coherence estimation of polarimetric SAR interferometry data for forest applications," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. **41**, 2254–2263 (2003).
7. J. S. Lee, "Refined filtering of image noise using local statistics," Comput. Graph. Image Process. **15**, 380–389 (1981).
8. E. Trouvé, M. Caramma, and H. Maître, "Fringe detection in noisy complex interferograms," Appl. Opt. **35**, 3799–3806 (1996).
9. H. Lee, "Interferometric synthetic aperture radar coherence imagery for land surface change detection," Ph.D. thesis (Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, London, 2001).
10. R. Touzi, A. Lopes, J. Bruniquel, and P. W. Vachon, "Coherence estimation for SAR imagery," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. **37**, 135–149 (1999).
11. S. R. Cloude and K. P. Papathanassiou, "Polarimetric SAR interferometry," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. **36**, 1551–1565 (1998).
12. R. N. Treuhaft and S. R. Cloude, "The structure of oriented vegetation from polarimetric interferometry," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. **37**, 2620–2624 (1999).
13. R. Gordon and R. M. Rangayyan, "Feature enhancement of film mammograms using fixed and adaptive neighborhoods," Appl. Opt. **23**, 560–564 (1984).
14. R. B. Paranjape, T. F. Rabie, and R. M. Rangayyan, "Image restoration by adaptive-neighborhood noise substraction," Appl. Opt. **33**, 2861–2869 (1994).
15. R. M. Rangayyan, M. Ciuc, and F. Faghih, "Adaptive-neighborhood filtering of images corrupted by signal-dependent noise," Appl. Opt. **37**, 4477–4487 (1998).
16. M. Ciuc, R. M. Rangayyan, T. Zaharia, and V. Buzuloiu, "Filtering noise in color images using adaptive-neighborhood statistics," J. Electron. Imaging **9**, 484–494 (2000).
17. M. Ciuc, Ph. Bolon, E. Trouvé, V. Buzuloiu, and J. P. Rudant, "Adaptive-neighborhood speckle removal in multitemporal synthetic aperture radar images," Appl. Opt. **40**, 5954–5966 (2001).
18. M. Ciuc, E. Trouvé, Ph. Bolon, and V. Buzuloiu, "Amplitude-driven coherence filtering in complex interferograms," in *Proceedings of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS '02) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2002), Vol. VI, pp. 3453–3455.
19. J. S. Lee, "Digital noise smoothing and the sigma filter," Comput. Vis. Graph. Image Process. **21**, 255–269 (1983).
20. M. Nagao and T. Matsuyama, "Edge preserving smoothing," Comput. Graph. Image Process. **9**, 394–407 (1979).
21. S. R. Cloude, K. P. Papathanassiou, A. Reigber, and W. M. Boerner, "Multi-frequency polarimetric SAR interferometry for vegetation structure extraction," in *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS '00) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2000), Vol. I, pp. 129–131.
22. K. Conradsen, A. A. Nielsen, J. Schou, and H. Skriver, "Change detection in polarimetric SAR data and the complex Wishart distribution," in *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS '01) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2001), Vol. VI, pp. 2628–2630.
23. D. Borghys, C. Perneel, and M. Acheroy, "Edge and line detection in polarimetric SAR images," in *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition* (International Association for Pattern Recognition, Surrey, UK, 2002), Vol. II, pp. 921–924.
24. D. C. Ghiglia and L. A. Romero, "Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods," J. Opt. Soc. Am. A **11**, 107–117 (1994).

Intensity-Driven Adaptive-Neighborhood Technique for Polarimetric and Interferometric SAR Parameters Estimation

Gabriel Vasile, *Student Member, IEEE*, Emmanuel Trouvé, *Member, IEEE*, Jong-Sen Lee, *Life Fellow, IEEE*, and Vasile Buzuloiu, *Senior Member, IEEE*

***Abstract*—In this paper, a new method to filter coherency matrices of polarimetric or interferometric data is presented. For each pixel, an adaptive neighborhood (AN) is determined by a region growing technique driven exclusively by the intensity image information. All the available intensity images of the polarimetric and interferometric terms are fused in the region growing process to ensure the validity of the stationarity assumption. Afterward, all the pixels within the obtained AN are used to yield the filtered values of the polarimetric and interferometric coherency matrices, which can be derived either by direct complex multilooking or from the locally linear minimum mean-squared error (LLMMSE) estimator. The entropy/alpha/anisotropy decomposition is then applied to the estimated polarimetric coherency matrices, and coherence optimization is performed on the estimated polarimetric and interferometric coherency matrices. Using this decomposition, unsupervised classification for land applications by an iterative algorithm based on a complex Wishart density function is also applied. The method has been tested on airborne high-resolution polarimetric interferometric synthetic aperture radar (POL-InSAR) images (Oberpfaffenhofen area—German Space Agency). For comparison purposes, the two estimation techniques (complex multilooking and LLMMSE) were tested using three different spatial supports: a fix-sized symmetric neighborhood (boxcar filter), directional nonsymmetric windows, and the proposed AN. Subjective and objective performance analysis, including coherence edge detection, receiver operating characteristics plots, and bias reduction tables, recommends the proposed algorithm as an effective POL-InSAR postprocessing technique.**

***Index Terms*—Coherency estimation, interferometry, multivariate region growing, polarimetric synthetic aperture radar.**

I. Introduction

A SYNTHETIC aperture radar (SAR) system measures both amplitude and phase of the backscattered signal, producing one complex image for each recording. The principle of SAR interferometry (InSAR) relies on the acquisition of two such complex images under slightly different viewing angles. After the two initial images are coregistered, the normalized complex cross-correlation is computed. The most commonly known measures in interferometry are its magnitude, namely the *coherence*, and its *phase*. The coherence is usually used to describe the temporal and spatial variations of the acquired signal. The phase includes a geometrical component directly linked to the distance between the target and the sensor positions, providing the height information of the target.

In order to estimate the coherence, the required ensemble averages are replaced by spatial averages: a number of L neighboring pixels are averaged to yield an estimate of the coherence and phase image (operation called "complex multilooking"). However, despite this initial estimation, both coherence and phase images are highly corrupted by speckle. Hence, the need to improve coherence estimation arises in order to reduce the estimation bias and variance [1], [2]. The use of larger window sizes with fixed shapes gives unsatisfactory results, since the stationarity assumption is often no longer valid and the final resolution decreases.

Polarimetric synthetic aperture radar (POLSAR) is an extension of the SAR imaging system, the sensors being able to emit and receive two polarizations. Monostatic polarimetric acquisitions are characterized by the 3×3 polarimetric coherency matrix. The POLSAR information allows the discrimination of different scattering mechanisms. The first characteristic decomposition of the coherency matrix for target scattering decomposition was proposed in [3]. The received signal can be split into a sum of three scattering contributions with orthogonal polarimetric signatures. The orthonormal eigenvectors of the Hermitian target coherency matrix are used for analyzing the eigenvector space. The dominant scattering mechanism is represented by the largest eigenvalue of the coherency matrix. In [4] and [5], Cloude and Pottier introduced the target entropy and the $H - \alpha$ model by assigning to each eigenvector the corresponding coherent single scattering mechanism. Based on this decomposition, unsupervised classification for land applications was performed by an iterative algorithm based on complex Wishart density function [6], [7].

Interferometry in POLSAR performs two acquisitions (spatially separated by the baseline) of the scattering matrix for each resolution cell. The advantages of interferometry (height and/or displacement information) are enhanced by the polarimetric decomposition techniques. In [8], Cloude and Papathanassiou applied the polarimetric basis transformations in the POL-InSAR

Manuscript received June 28, 2005; revised November 10, 2005.

G. Vasile is with the Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance, Université de Savoie-ESIA-BP, 806-74016 Annecy Cedex, France, and also with the Image Processing and Analysis Laboratory, "Politehnica" University of Bucharest, Bucharest 061071, Romania (e-mail: gabriel.vasile@univ-savoie.frl; gvasile@alpha.imag.pub.ro).

E. Trouvé is with the Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance, Université de Savoie-ESIA-BP, 806-74016 Annecy Cedex, France (e-mail: emmanuel.trouve@univ-savoie.fr).

J.-S. Lee is with the Remote Sensing Division, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375-5351 USA (e-mail: jong.lee@nrl.navy.mil).

V. Buzuloiu is with the Image Processing and Analysis Laboratory, "Politehnica" University of Bucharest, Bucharest 061071, Romania (e-mail: buzuloiu@alpha.imag.pub.ro).

Digital Object Identifier 10.1109/TGRS.2005.864142

0196-2892/$20.00 © 2006 IEEE

case and obtained interferograms between all possible linear combination of polarization states. As polarization and interferometric coherence are tightly related, an optimization algorithm based on the maximization of the interferometric coherence is proposed [8], [9].

A filtering step is very often required to finally obtain reliable estimates of the complex cross-correlation. Moreover, the high resolution of newly available SAR airborne images offers the opportunity to observe much thinner spatial features than the lower resolution of the up-to-now available SAR images. Being able to preserve such a high resolution in robust estimations of POL-InSAR coherency is an important issue to make this information useful.

Different speckle filtering strategies proposed over the last 20 years have been reviewed for one-channel SAR images in [10] and [11]. To handle the scene nonstationarity issue, two different models, namely the multiplicative speckle model and the product model, yield to two different filtering approaches. The first approach is based on the assumption of local stationarity and yields to different filters which search for local neighborhoods respecting this assumption and use adaptive estimators such as the local linear minimum mean square error (LLMMSE) [12], [13]. The second approach corresponds to nonstationary speckle models which require to introduce prior knowledge on the scene such as the distribution of the intensity mean in the gamma filter [14] or multilevel pdfs in multiply stochastic models [15], [16].

The review and the experimental results presented on intensity images in [11] encourage the use of the first approach with multiresolution techniques for optimal parameter estimation. Most techniques developed to extend estimation windows and respect signal local stationarity are based on tests and thresholds which allow windows to grow in different directions when spatial features are detected. The technique proposed by Wu and Maître [17] selects maximum homogeneous regions by testing the evolution of the standard deviation σ when the window size increases, after splitting in one of the eight possible directions if necessary. Three thresholds are empirically chosen to test four cases: point-target, close or on step edge, and homogeneous area. This filter has been improved by Nicolas *et al.* [18] with two modifications. First, the standard deviation σ is replaced by the equivalent number of look L which is linked to the coefficient of variation CV (normalized standard deviation) by $\sigma/\mu = 1/\sqrt{L}$ for intensity images. Secondly, the estimation of L is based on the low-order moments, second kind cumulant method which yields a low variance estimator with analytically known variance linked to the number of sample used in the estimation windows. This allows the authors to take the estimator variance into account when comparing L with the theoretical number of looks and analyzing the evolution of L between the current window and the increased size windows. A different strategy was proposed by Hagg and Sties [19] to test local stationarity on directional subwindows of decreasing size: starting from large window size such as 11×11, directional subwindows are tested and size is reduced by 2 until the local estimate of the CV is found to be lower than the corresponding global estimate of the coefficient of variation. These global estimates are obtained on the whole image for different window size by fitting χ^2 distributions with the beginning of the CV histograms. The multiresolution technique proposed in [11] combines these different techniques by including specific feature detectors (point targets, lines, edges) to test successively different kind of nonstationarity. The main characteristics of these techniques is the use of homogeneous/nonhomogeneous tests to select (sub)windows of larger size (pixels are not tested and aggregated individually). These "window tests" are based on CV local estimates and require to take into account the fact that CV estimated on small windows is lower than the theoretical CV.

In the framework of POL-InSAR imagery, a spatially adaptive filtering method for improving the accuracy of the coherency estimation was introduced in [20]. Eight directional subwindows are defined in order to locate the most homogeneous area inside the considered neighborhood. The subwindow selection procedure is driven by the average of the available span images of the interferometric pair. The pixels within the selected subwindow are used to yield the filtered covariance matrix, which is derived from the locally linear minimum mean-squared error (LLMMSE) estimator of the 6×6 covariance matrix

$$\widetilde{[C]}_6 = \overline{[C]}_6 + b([C]_6 - \overline{[C]}_6). \tag{1}$$

In (1), $\overline{[C]}_6$ stands for the average value of the POL-InSAR covariance matrix computed in the given subwindow, while $b \in [0, 1]$ is a locally computed weight that measures the local stationarity.

This paper presents a new spatially adaptive algorithm for coherency matrix estimation. Around each pixel, an adaptive neighborhood (AN) is formed using a region growing technique rather different from the previous "window growing" techniques: pixels are tested one by one and progressively aggregated if they belong to the same statistical population as the initial pixel. Moreover, the region growing algorithm is driven by all the available intensity images (the terms corresponding to the main diagonal of the roughly estimated coherency matrix). Pixels belonging to an adaptive "intensity-driven region" are more likely to respect the local stationarity hypothesis than pixels belonging to a squared fixed size window. Finally, the algorithm estimates the coherency matrix either by direct complex multilooking or from the LLMMSE estimator. The two estimation techniques were tested using three different spatial supports: a fix-sized symmetric neighborhood (boxcar filter), directional nonsymmetric windows, and the proposed AN. The effectiveness of this proposed method is demonstrated using L-band E-SAR polarimetric interferometric data.

The remainder of this paper is organized as follows. In Section II, the principles of polarimetric InSAR are reviewed in more detail. Section III is dedicated to the presentation of the proposed intensity-driven adaptive-neighborhood (IDAN) estimation and its application to LLMMSE filtering. In Section IV the results obtained using the proposed filter are presented and compared to those given by the boxcar and directional filtering methods. Results of entropy-alpha-anisotropy decomposition and coherence optimization, followed by a Wishart classification are also given. Eventually, in Section V, some conclusions and perspectives are presented.

II. Polarimetric SAR Images

The POL-InSAR data are obtained by two parallel passes separated by a baseline for interferometry. By using the Pauli basis marices [8], the obtained coherent scattering vectors $[k]_i$ are closer to the physical phenomena of wave scattering

$$[k]_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH_i} + S_{VV_i} \\ S_{HH_i} - S_{VV_i} \\ 2S_{XX_i} \end{bmatrix}. \tag{2}$$

One complete representation of the data is the 6×6 Hermitian positive semidefinite coherency matrix

$$[T]_6 = E\left\{ \begin{bmatrix} [k]_1 \\ [k]_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [k]_1^{*T} & [k]_2^{*T} \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} [T]_{11} & [\Omega]_{12} \\ [\Omega]_{12}^{*T} & [T]_{22} \end{bmatrix} \tag{3}$$

where $E\{\dots\}$ denotes the expectation value, $[T]_{ii}$ are the 3×3 polarimetric coherency positive semidefinite Hermitian matrices from each pass, $[\Omega]_{12}$ being the interferometric coherency matrix between the polarized acquisitions

$$[T]_{ii} = E\left\{ [k]_i [k]_i^{*T} \right\} \qquad [\Omega]_{12} = E\left\{ [k]_1 [k]_2^{*T} \right\}. \tag{4}$$

While the scatter vector, expressed either in lexicographic basis or in Pauli basis, is usually modeled by a multivariate complex Gaussian probability density function (pdf), the obtained coherency matrix $[T_6]$ defined in (3) follows a complex Wishart pdf [7], [21]. The diagonal elements of the coherency matrix have the same speckle statistics as conventional single channel SAR images.

A. H/α/A Decomposition

To extract useful information from POLSAR data, several polarimetric decompositions have been introduced: Huynen [22], Krogager [23], Cameron [24], Freeman-Durden [25], or TSVM [26]. In [5], Cloude and Pottier proposed a decomposition based on the projection of the coherency matrix $[T]$ onto its eigenvalues basis. The matrix $[T]$ is given by a weighted sum of three unitary matrices of rank one, each representing a pure scattering mechanism $[T^{(i)}]$

$$[T] = \sum_{i=1}^{3} \lambda_i [v]_i [v]_i^{*T} = \sum_{i=1}^{3} \lambda_i \left[T^{(i)} \right] \tag{5}$$

where $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ are the ordered eigenvalues and v_i its corresponding eigenvectors. The entropy H and anisotropy A have been defined as

$$H = \sum_{i=1}^{3} -P_i \log_3 P_i \tag{6}$$

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \tag{7}$$

where the pseudoprobabilities P_i are given by

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^{3} \lambda_j}. \tag{8}$$

Also, the α parameter is given as the weighted mean of the α_i parameters corresponding to the three scattering mechanisms [5]

$$\alpha = \sum_{i=1}^{3} P_i \alpha_i. \tag{9}$$

The extracted two meaningful roll-invariant parameters H and α indicate the random behavior of the global scattering and, respectively, the mean scattering mechanism from surface to double bounce scattering. They are strongly related to the geophysical properties of the ground target area providing reliable classification information. In [5], nine clustering zones are proposed in the H and α plane.

Being already implemented in POLSAR processing software as POLSARpro (European Space Agency) or RAdar Tools [27], the H/α/A decomposition has been chosen to illustrate the benefit of the proposed filtering methods.

B. Coherence Optimization

Due to the strong influence of the polarization upon the estimate of the interferometric coherence, Cloude and Papathanassiou proposed a method for finding the optimal linear combination of polarization states [8]. The optimum scattering mechanism corresponds to the projection of both master and slave target vectors on the eigenvectors $[w]_{1_{\text{opt}}}$ and $[w]_{2_{\text{opt}}}$ of the maximum eigenvalues. The highest coherence γ_{opt1} is obtained by forming the interferogram between the two optimized scalar complex images $\mu_{1\text{opt}}$ and $\mu_{2\text{opt}}$

$$\begin{aligned} \mu_{1\text{opt}} \mu_{2\text{opt}}^{*} &= \left([w]_{1\text{opt}}^{*T} [k]_1 \right) \left([w]_{2opt}^{*T} [k]_2 \right)^{*T} \\ &= [w]_{1\text{opt}}^{*T} [\Omega]_{12} [w]_{2\text{opt}}. \end{aligned} \tag{10}$$

Based on the three optimized coherences $\{\gamma_{\text{opt1}}, \gamma_{\text{opt2}}, \gamma_{\text{opt3}}\}$, two characteristic indicators of the coherence distribution in the different optimized channels, A_1 and A_2, are introduced in [28] and [29]

$$A_1 = \frac{|\gamma_{\text{opt1}}| - |\gamma_{\text{opt2}}|}{|\gamma_{\text{opt1}}|} \quad A_2 = \frac{|\gamma_{\text{opt1}}| - |\gamma_{\text{opt3}}|}{|\gamma_{\text{opt1}}|}. \tag{11}$$

III. Intensity-Driven AN Estimation

The AN concept in image processing has been introduced by Gordon and Rangayyan [30] in medical imagery. In each pixel (called *seed* when processed), a neighborhood of variable shape and dimensions is built by a region growing algorithm, containing only connected pixels that belong to the same statistical population as the seed. Only the values of pixels aggregated in the AN participate to the computation of the final value of the seed.

The main advantage of the method is to gather a significant number of samples in an estimation window where stationarity is preserved. ANs were also used for gray-level [31], [32] and color images [33], [34] filtering. In the context of SAR imaging, a multidimensional extension has also been proposed for adaptive-neighborhood filtering of multitemporal amplitude

data [35] and interferometric coherence and phase images [36], [37].

A. Intensity-Driven Region Growing

In the proposed method, only the intensity information is used to decide upon the pixel membership to the AN. Small homogenous regions within all six intensity images correspond to ground areas with an homogenous cover, which respect the stationarity hypothesis requirement for the estimation of the complex correlation in (3).

After initial complex multilooking a rough 6×6 noisy estimate of $[T]_6$ is available. All the available six intensity images simultaneously drive the region growing process. A 3×2 matrix is built containing only the elements of the main diagonal of $[T]_6$

$$[p](m,n) = \begin{bmatrix} [p]_1(m,n) \\ [p]_2(m,n) \\ [p]_3(m,n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T_{11}]_{11}(m,n) & [T_{22}]_{11}(m,n) \\ [T_{11}]_{22}(m,n) & [T_{22}]_{22}(m,n) \\ [T_{11}]_{33}(m,n) & [T_{22}]_{33}(m,n) \end{bmatrix} \quad (12)$$

where $\{[p]_1, [p]_2, [p]_3\}$ are the bivariate vectors corresponding to the three lines of the real matrix $[p]$. Only the diagonal elements of the $[T]_{ii}$ matrices have been chosen as, after the Pauli basis transformation, they are related to the physical backscattering properties of the target. In the case of POLSAR data, each bivariate component of the $[p]$ matrix becomes scalars. Both the proposed algorithm and the corresponding equations remain unchanged [38].

The idea, based on Lee's sigma filter [39], is to retain in the AN only pixels which differ from the seed with less than twice the noise variation coefficient. According to the multilook SAR intensity image multiplicative noise model, the corresponding random variable is gamma distributed [21], [40]. For a distribution with parameters μ and σ, 95% of the samples lie in the interval $[\mu - 2\sigma/\mu, \mu + 2\sigma/\mu]$. The $\pm 2\sigma/\mu$ ($\mathrm{IDAN}_9 5$ thresholds from Fig. 1) interval ensures the population retained in the AN is statistically significant, and the following aggregation criterion is proposed for all the available bivariate vectors $[p]_i(k,l)$:

$$\frac{\|[p]_i(k,l) - [s](m,n)\|}{\|[s](m,n)\|} \leq 2\frac{\sigma_n}{\mu_n} \quad (13)$$

where $[s](m,n)$ is the seed vector. The variation coefficient σ_n/μ_n is a standard parameter in SAR imagery, which is constant in homogenous areas and equal to $1/\sqrt{L_{\mathrm{eq}}}$ (L_{eq} is the equivalent number of looks resulting from the initial averaging).

However, it is not desirable to use a single-step region growing algorithm with threshold $2\sigma_n/\mu_n$ (especially when the noise is strong, which is the case in the SAR imagery) under the risk that the region grows over boundaries, in contradiction with the goal of the region growing algorithm [Fig. 2(c)]. This is why a two-step region growing procedure is used [Fig. 2(d)]. In the first step, the aggregation threshold is set in order to retain only 50% of the statistical population [Fig. 2(b)]. With a single gamma distribution, the corresponding interval is $[\mu - (2/3)\sigma/\mu, \mu + (2/3)\sigma/\mu]$ (see IDAN_{50} thresholds in Fig. 1). The first aggregation criterion for each of the three bivariate vectors p_i, which yields the correct estimation of the seed, is

$$\frac{\|[p]_i(k,l) - [s](m,n)\|}{\|[s](m,n)\|} \leq \frac{2}{3}\frac{\sigma_n}{\mu_n}. \quad (14)$$

Using the $(2/3)\sigma_n/\mu_n$ threshold on the sum of the three channels, the resulting AN may possibly contain many holes, i.e., pixels that were not retained because they are affected by

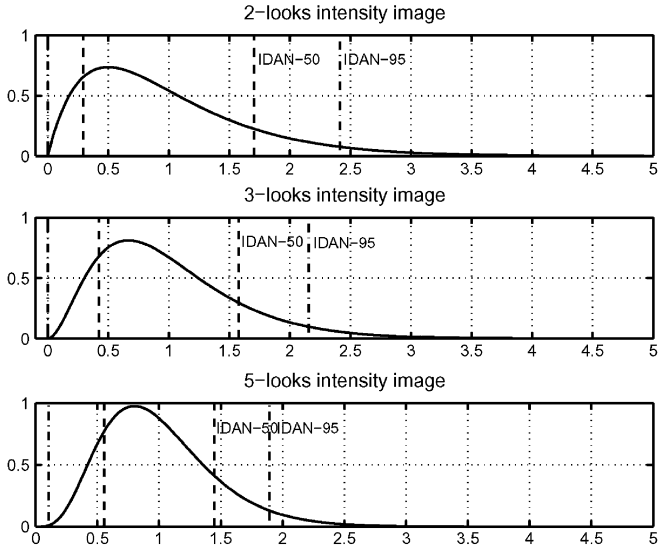


Fig. 1. Gamma pdf corresponding to multiplicative noise model for multilook SAR intensity images: $\mu = 1$ and $L = 2, 3, 5$. The aggregation thresholds IDAN_{50} (15) and IDAN_{95} (16) are set in order to retain only 50%, and 95% of the statistical population, respectively.

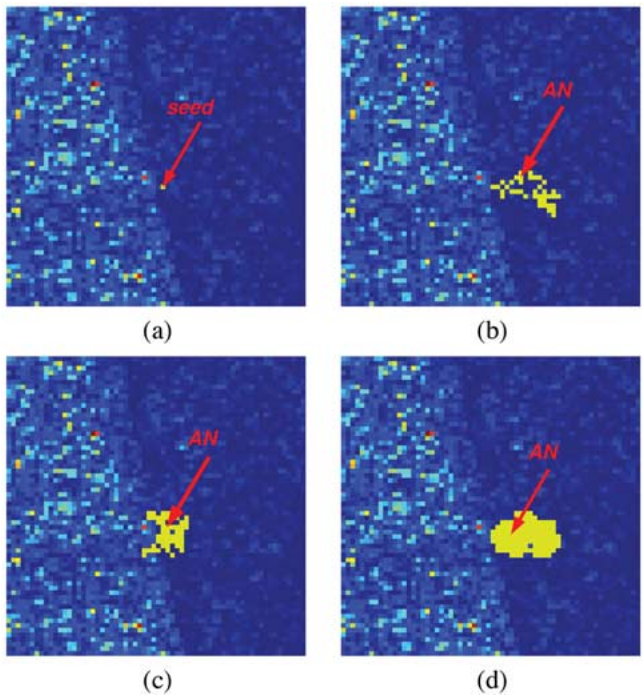


Fig. 2. Region growing process (64×64 pixels). (a) Two-look initial SAR intensity image. (b) One-step region growing with the IDAN_{50} threshold. (c) One-step region growing with the IDAN_{95} threshold. (d) Two-step region growing with the IDAN_{50} followed by the IDAN_{95} thresholds.

a "strong" instance of noise. However, these pixels belong to the same statistical population and should be retained in the AN. This is achieved in the second step (IDAN_{95} thresholds in Fig. 1), where *only pixels that were rejected in the first step* are reinspected with a less restrictive threshold $(2\sigma_n/\mu_n)$. The advantage of reinspecting only previously rejected pixels is that most of them are located *inside the convex hull of the AN determined in step one*, as they neighbor at least one of the pixels retained in the AN.

Based on this principle, the algorithm for constructing the AN consists of two steps.

Step I

1) *Rough estimation of the seed value*. Inside a 3×3 centered neighborhood, the median $\widehat{[p]}(m,n)$ is computed on each of the six component of the matrix, in order to yield a first estimate of the seed value. At this step, with a 3×3 neighborhood, the median is more appropriate than the mean (maximum likelihood estimator in homogenous areas), since the impulse response of the median filter is zero and a stepwise change in the input signal passes the median filter unaltered [41]. This property is very useful when data need to be smoothed, while blurring of the signal edges is not acceptable. At such an early stage of the region growing process, it is better to avoid any blurring effects around the edges in order to assure the signal stationarity in the next steps.
2) *Region growing*. All the eight direct neighbors $[p](k,l)$ of the seed are accepted inside the AN, provided they meet the following aggregation test, which merges the three distances corresponding to the three components of the multivariate vector $[p]_i$

$$\sum_{i=1}^{3} \frac{||[p]_i(k,l) - \widehat{[p]}_i(m,n)||}{||\widehat{[p]}_i(m,n)||} \leq 2\frac{\sigma_n}{\mu_n} \tag{15}$$

where μ_n and σ_n are the speckle mean and standard deviation. Then, the same procedure is applied for all of the neighbors of the newly included pixels and so on. The region growing iterates in this manner, until either the number of the pixels already included in the AN exceeds a predefined upper limit $N_{\max}$ or none of the neighbors verify the test condition given by (15). The pixels which have already been tested, but not accepted inside the AN (called *background pixels* in the sequel) are stored in a separate list.

Step II

1) *Refined estimation of the seed value*. A more reliable estimator $\overline{[p]}(m,n)$ of the selected seed value is obtained by averaging the pixels included in this "strict" AN obtained in Step I. The initial seed value $\widehat{[p]}(m,n)$ is now updated by $\overline{[p]}(m,n)$.
2) *Reinspection of the background pixels*. The background pixels $[p](o,p)$ of the list created in Step I are tested again and aggregated in the AN, provided that they meet the "enlarged" test condition

$$\sum_{i=1}^{3} \frac{||[p]_i(o,p) - \overline{[p]}_i(m,n)||}{||\overline{[p]}_i(m,n)||} \leq 6\frac{\sigma_n}{\mu_n}. \tag{16}$$

The test is less restrictive, as the inclusion threshold is larger than the one used in the first step of region growing.

It is important to notice that the intensity-driven region growing algorithm can be applied on one POLSAR acquisition, namely by employing only one polarimetric coherency matrix. The only difference is that the bivariate components $[p]_i$ $(i = 1, \ldots, 3)$ of the vector $[p](m,n)$ from (12) become scalars (diagonal elements of the available polarimetric coherency $[T]$)

$$[p](m,n) = \begin{bmatrix} [p]_1(m,n) \\ [p]_2(m,n) \\ [p]_3(m,n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T]_{11}(m,n) \\ [T]_{22}(m,n) \\ [T]_{33}(m,n) \end{bmatrix}. \tag{17}$$

The same two-step region growing algorithm is then applied [38].

In summary, the proposed AN determination involves processing the vectorial image (as in the case of color images) mixed with multiplicative noise model (speckle noise is present in all SAR intensity images). Around each pixel, an AN is formed using a two-step region growing technique. It takes into account the information contained in all the intensity images of the available complex data. The use of ANs provides a larger set of samples for further processing, which respect the stationarity hypothesis.

B. Pol-InSAR Parameter Estimation

The conventional filtering method performs a complex averaging over a fixed size sliding window estimating the master and slave coherency matrices and the interferometric coherency matrix from (3). In this type of approach the number of pixels averaged may not be sufficient to reduce the estimation variance and the stationarity hypothesis is not always respected. The AN previously constructed solves these problems, considering that the phase stationarity over the neighborhood was ensured either by a standard flat earth fringe removal procedure or by a local phase slope estimation (in the case of unknown baseline or strong topography) [42], [43].

The proposed method allows to recompute the complex averaging over the largest possible neighborhood without loosing stationarity. In the case of the POL-InSAR data set, the matrices $[\Omega]_{12}$ and $[T]_{ii}, i = 1, \ldots, 2$ from (4) are estimated by replacing the ensemble average required by their definition, with a spatial average within the intensity-driven AN (IDAN)

$$\widehat{[T]_{ii}^{\mathrm{IDAN}}}(m,n) = \sum_{(k,l)\in AN(m,n)} [k]_i(k,l)[k]_i^{*T}(k,l) \tag{18}$$

$$\widehat{[\Omega]_{12}^{\mathrm{IDAN}}}(m,n) = \sum_{(k,l)\in AN(m,n)} [k]_1(k,l)[k]_2^{*T}(k,l). \tag{19}$$

In the case of single POLSAR data, using the multivariate vector from (17), the IDAN estimation technique of the polarimetric coherency matrix is implemented using (18).

A recent study presented in [44] determines speckle noise effects over the retrieved physical information in POLSAR data by means of the $H/\alpha/A$ decomposition. As the sample eigenvalues consist of asymptotically nonbiased estimators of the true eigenvalues, the minimum number of looks in order to neglect biases must be determined. The optimization algorithm of the

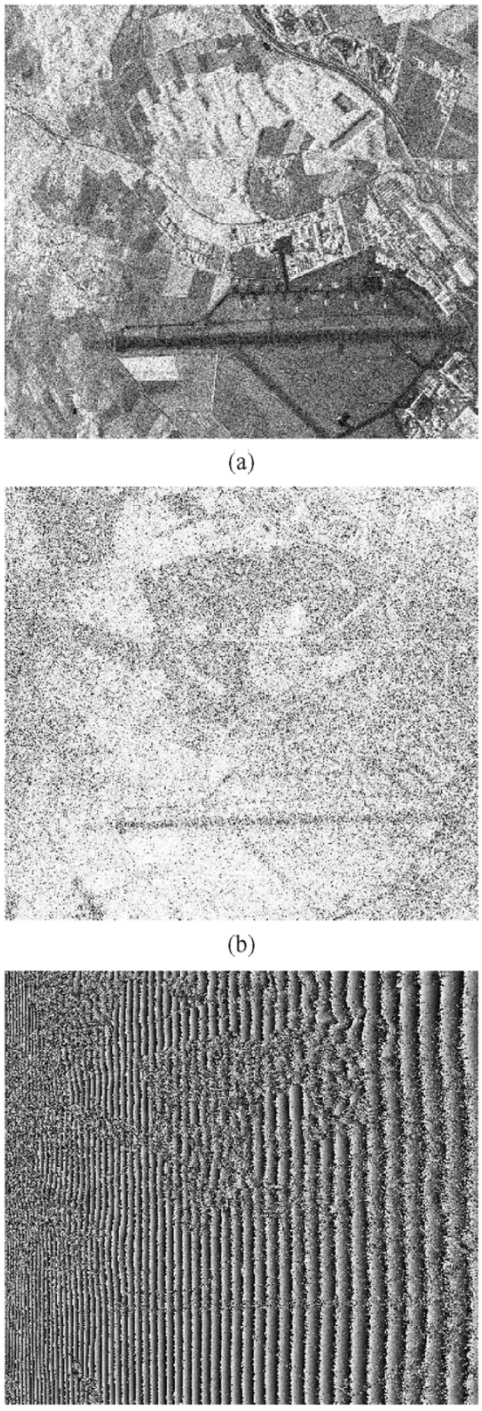


Fig. 3. POL-InSAR initial data (1540 × 1407 pixels). (a) Two-looks HH+VV master intensity (logarithmic scale). (b) Two-looks HH+VV initial coherence map. (c) Two-looks HH+VV initial interferogram.

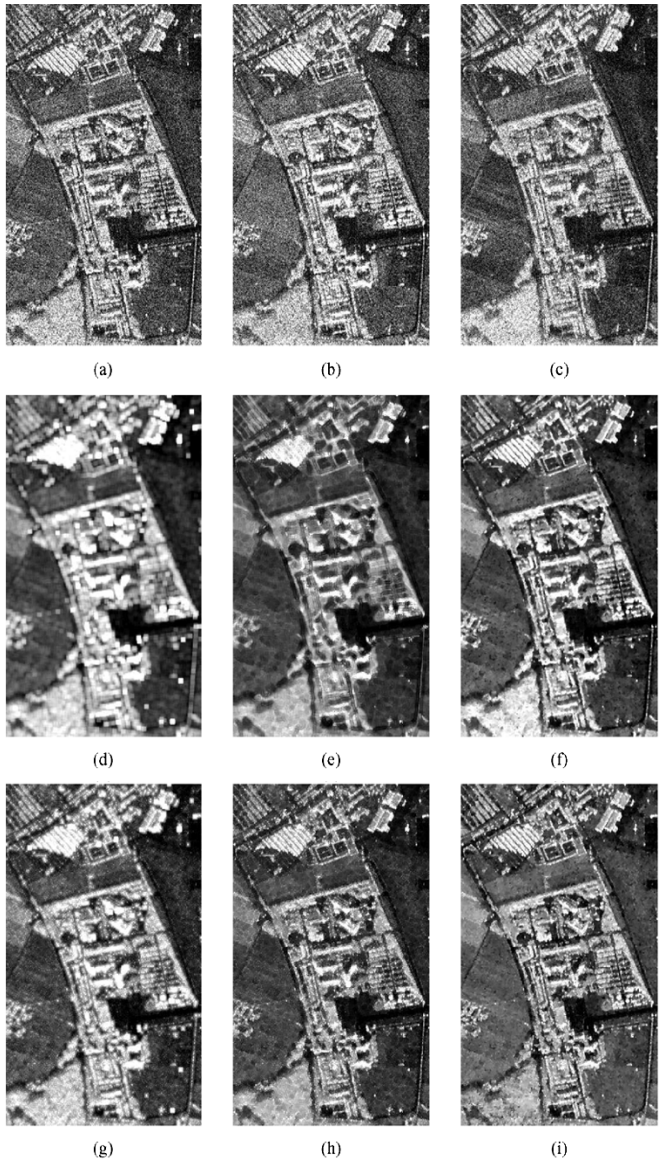


Fig. 4. Master intensity image filtering results (logarithmic scale) (526 × 310 pixels). (a)–(c) Original two-look intensity images (HH+VV, HH−VV and 2XX). (d)–(f) HH+VV boxcar, directional, and IDAN filters with complex multilooking. (g)–(i) HH+VV boxcar, directional, and IDAN filters with LLMMSE.

sample eigenvalues proposed in [44] does not succeed in correcting H with less than 81 looks and A values with less than 121 looks. The IDAN estimation provides such a high number of samples, while preserving stationarity and spatial resolution.

Depending on the desired POL-InSAR application, another refinement of the estimation method may be employed. For example in the case of forestry applications, the height of the trees is extracted from the interferometric coherency [45]. The strong multilooking induced by IDAN may affect the properties of the polarimetric scattering signatures of the targets (trees). In order to compensate these effects, a new technique which fuses the IDAN estimation and the LLMMSE from [20] is proposed (IDAN-LLMMSE). Instead of the directional windows, the previously constructed AN provides the necessary spatial support for the final LLMMSE estimation of the coherency matrix as

$$\widetilde{[T]}_6 = \widehat{[T]_6^{\mathrm{IDAN}}} + b\left([T]_6 - \widehat{[T]_6^{\mathrm{IDAN}}}\right). \tag{20}$$

$\widehat{[T]_6^{\mathrm{IDAN}}}$ represents the POL-InSAR coherency matrix computed in the obtained AN, while $b \in [0,1]$ is the filtering weight which is computed as in [20], except that, instead of using the average of the two span images from the interferometric couple, all the AN pixels of all the six available POLSAR span images are averaged.

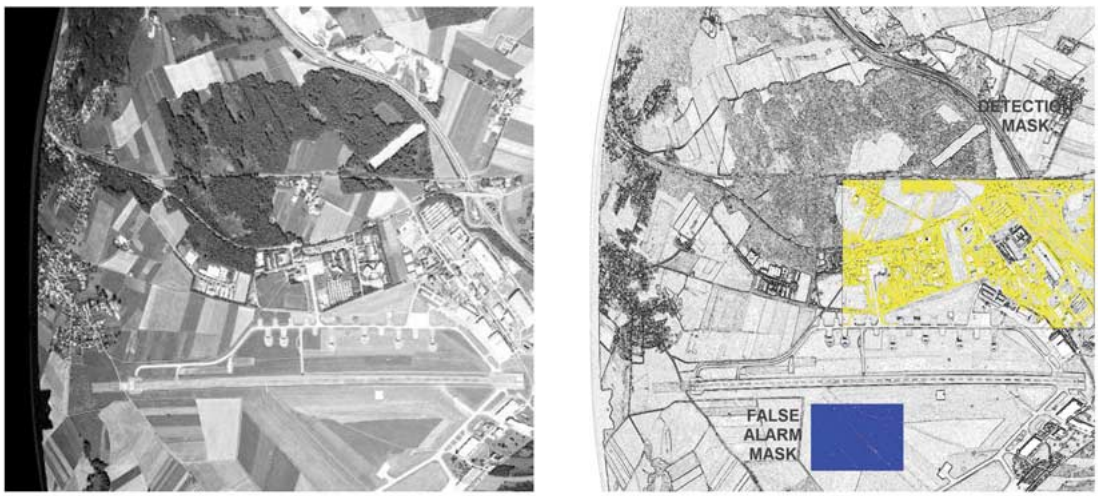


Fig. 5. Pol-InSAR data over the DLR headquarters (1540 × 1407 pixels). (a) Optical image resampled and registered on the available two-looks intensity images. (b) Sobel edge detection and thresholded reference areas used in the ROC analysis: blue for false alarm mask and yellow for detection mask.

IV. Results and Discussion

To illustrate the performances of the IDAN filtering method presented in Section III, results obtained with real airborne polarimetric interferometric SLC images are reported. The airborne data set was acquired in 1999 by an airborne experimental SAR system, E-SAR [46]. It represents a repeated pass, interferometric, fully polarimetric (monostatic mode) L-band (1.25 GHz) acquisition with a baseline of about 15 m. The spatial resolution is 1.5 m in range and azimuth. The target area is the Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt (DLR) headquarters (Oberpfaffenhofen area) from Wessling, Germany. It includes a large variety of zones, being one of the most used test POLSAR and POL-InSAR images [46], [47].

The SLC test images have 1540×2815 pixels each. After initial two-look complex multilooking, the initial estimate of the matrix $[T]_6$ is obtained (Fig. 3). On the master intensity image corresponding to the HH+VV polarization configuration the estimated equivalent number of looks is $L_{\text{est}} = 1.33$.

The results obtained by IDAN and IDAN-LLMMSE estimation algorithms are presented in Section IV-A–C. Several filters are also implemented for comparison purposes: boxcar filter and intensity driven directional neighborhood, with complex multilooking or with LLMMSE estimation. The implemented directional filter is similar to the one presented in [20], with the only difference that the window selection is driven on the sum of the six available span POL-InSAR images (all the diagonal terms of the $[T]_6$ matrix). The parameters used for POL-InSAR data IDAN filtering are: $N_{\max} = 50, (\sigma_n)/(\mu_n) = 0.87$. In order to assure the compatibility of the boxcar, directional filter and IDAN, in terms of filtering amount, the size of the chosen centered neighborhood of the boxcar was 7×7.

A. Speckle Reduction in POLSAR Span Images

In the case of nonadaptive filters, as the boxcar filter, the speckle reduction is always associated with strong edge-blurring effect [Fig. 4(d)]. The directional filter [Fig. 4(e)] is more satisfactory than the boxcar as the resulting edges are sharper. However, the fix size of the directional neighborhoods induces artifacts in the vicinity of thin details (smaller than the size of the neighborhoods). The boxcar LLMMSE [Fig. 4(g)] and directional LLMMSE [Fig. 4(h)] overcome these drawbacks, but the quality of achieved noise reduction is somewhat decreased. The IDAN filter [Fig. 4(f)] greatly reduces speckle over homogeneous areas, whereas structures are preserved. Thanks to the large number of homogeneous samples used in performing the multilooking, the achieved speckle reduction is more pronounced than other filters. A general remark for all the spatial filters is that the resulting filtered image has a "patchy" look, which is a known effect of purely spatial filtering. This effect is also observed for the IDAN. However, the IDAN-LLMMSE visually has less of this effect. The only drawback of the IDAN filter is in its high computational load.

In order to objectively assess the filtering performances, the receiver operating characteristics (ROC) are computed and further analyzed: first, a contour map is computed starting from the filtered HH+VV master POL-InSAR intensity image using conventional edge detectors. An optical image, previously resampled and registered on the initial master intensity image (Fig. 5), is used to obtain a contour map which provides the "ground truth" for the detection mask. A false alarm mask is also selected on the homogeneous fields around the runway.

Fig. 6 represents the three ROC curves for the edge detection on each of the filtered HH master intensity images. As it can be observed in Fig. 6(a), IDAN provides the best contour preservation. This can be explained by the fact that the IDAN detection is much higher for a given false alarm level. As expected, the directional filter (adaptive spatial filter) outperforms the boxcar (nonadaptive spatial filter). By introducing the LLMMSE method in the final filtering stage [Fig. 6(b)], directional LLMMSE and IDAN-LLMMSE provide much better performances than the boxcar LLMMSE with a higher detection probability.

B. Improved Estimation of the POL-InSAR Coherence Maps

The interferometric couple formed by the HH+VV component was chosen to illustrate the coherence filtering performances of

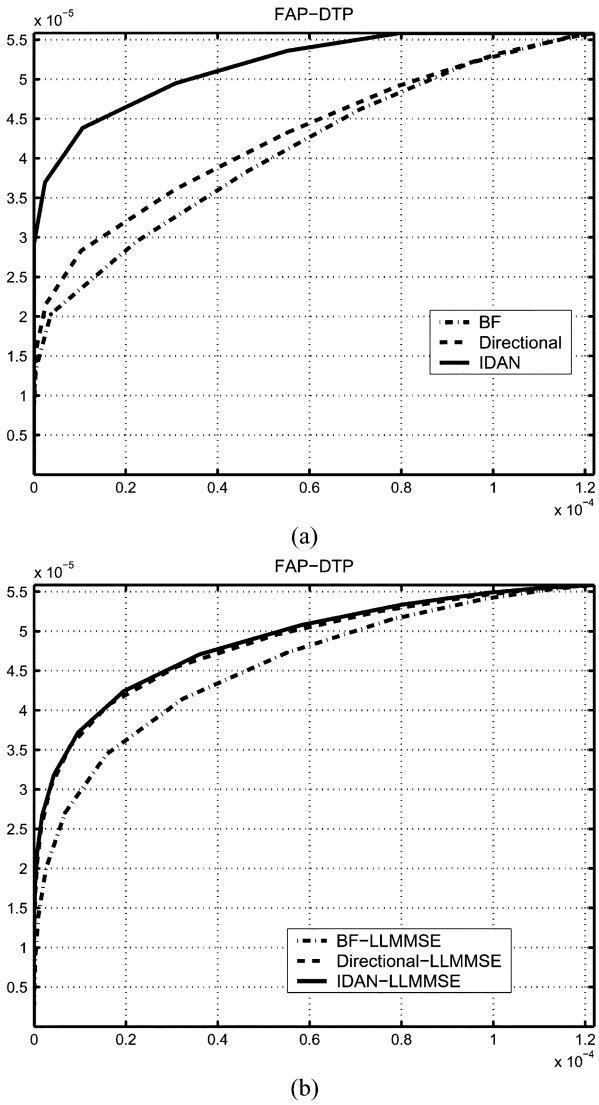


Fig. 6. Assessment of the edge detection performance in the Pol-InSAR filtered HH+VV master intensity images: receiver operating characteristics (detection probability versus false alarm probability). (a) Complex multilooking only. (b) LLMMSE estimation.

the six filters (see Fig. 7). One can observe that, also on this parameter, the IDAN [Fig. 7(c)] and IDAN-LLMMSE [Fig. 7(f)] outperform the other filters from a visual point of view: uniform areas are better smoothed, contours are better preserved and bias is more reduced. This can also be remarked in Tables I and II, which present the smoothing and bias reduction performances of the six filters computed over manually selected homogeneous regions of different coherence levels. An important decrease of the mean value after filtering is present over the low-coherence areas, i.e., where the bias was important, whereas in the high coherence region, the high level is preserved. Table II presents the standard deviation computed over all of the three regions. The minimum is obtained by IDAN, showing that this filter simultaneously performs the strongest bias and noise reductions inside homogeneous regions.

C. Pol-InSAR Parameter Extraction and Classification

The coherence optimization algorithm was also applied on the polarimetric interferometric coherency matrices filtered by

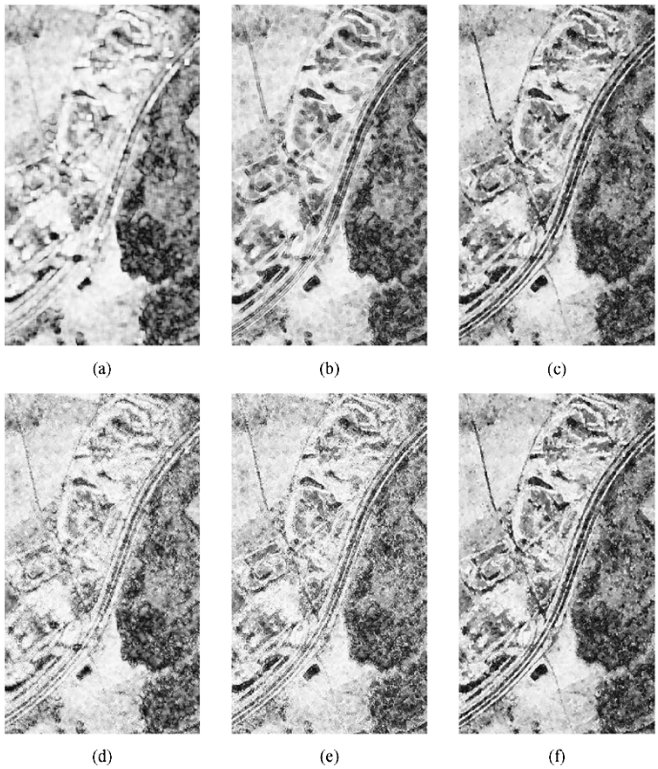


Fig. 7. HH+VV coherence map filtering results (526×310 pixels). (a)–(c) Boxcar, directional, and IDAN filters with complex multilooking. (d)–(f) Boxcar, directional, and IDAN filters with LLMMSE.

IDAN and IDAN-LLMMSE (Fig. 8). The additional information provided by the POL-InSAR parameters improves standard POLSAR classification results. As double bounce characterizes both building and vegetation, the A_1, A_2 decomposition reveals higher values over the stable building areas and lower values over the vegetation areas (high volume and temporal decorrelation) [29]. The IDAN-LLMSE filtered interferometric coherency provides the best results in terms of spatial resolution and discrimination between the two areas.

Physical parameters of the scatterers can directly be estimated from POLSAR data. In Fig. 9, $H-\alpha-A$ decomposition was performed on the master polarimetric coherency matrix filtered either by IDAN or IDAN-LLMMSE. Between the two filters, IDAN performs the best noise reduction, while IDAN-LLMMSE, ensures sharper edges, especially in the building areas. However, it is important to notice that this is the effect of the underestimation of the eigenvalues in the regions where the b parameter from (20) is close to one (no further multilooking is performed in the filtering stage). Hence, despite the high contrast, the estimated values of the POLSAR parameters are not reliable in the areas where the number of necessary samples is not reached.

Fig. 10 presents 2-D histograms of $H-\alpha$ parameters for the two proposed filters in three manually selected homogeneous areas. For comparison purposes, the mass center (MC) of the parameters estimated by a 15×30 boxcar complex multilooking is also plotted. An interesting effect can be observed, namely that as the value of entropy increases from Fig. 10(a)–(c), the bias reduction performed by IDAN becomes less important. This can be explained by the fact that high entropy values indicate strong

TABLE I
HH+VV COHERENCE MEAN OVER HOMOGENEOUS AREAS ON THE OBERPFAFFENHOFEN REGION

Region	Initial	Boxcar	Boxcar LLMMSE	Directional	Directional LLMMSE	IDAN	IDAN–LLMMSE
high	0.967	0.957	0.958	0.951	0.954	0.947	0.949
medium	0.854	0.703	0.707	0.663	0.688	0.638	0.648
low	0.794	0.301	0.366	0.305	0.376	0.257	0.278

TABLE II
HH+VV COHERENCE STANDARD DEVIATION OVER HOMOGENEOUS AREAS ON THE OBERPFAFFENHOFEN REGION

Region	Initial	Boxcar	Boxcar LLMMSE	Directional	Directional LLMMSE	IDAN	IDAN–LLMMSE
high	0.070	0.014	0.024	0.018	0.028	0.016	0.019
medium	0.178	0.105	0.134	0.115	0.147	0.081	0.096
low	0.201	0.157	0.194	0.160	0.208	0.086	0.117

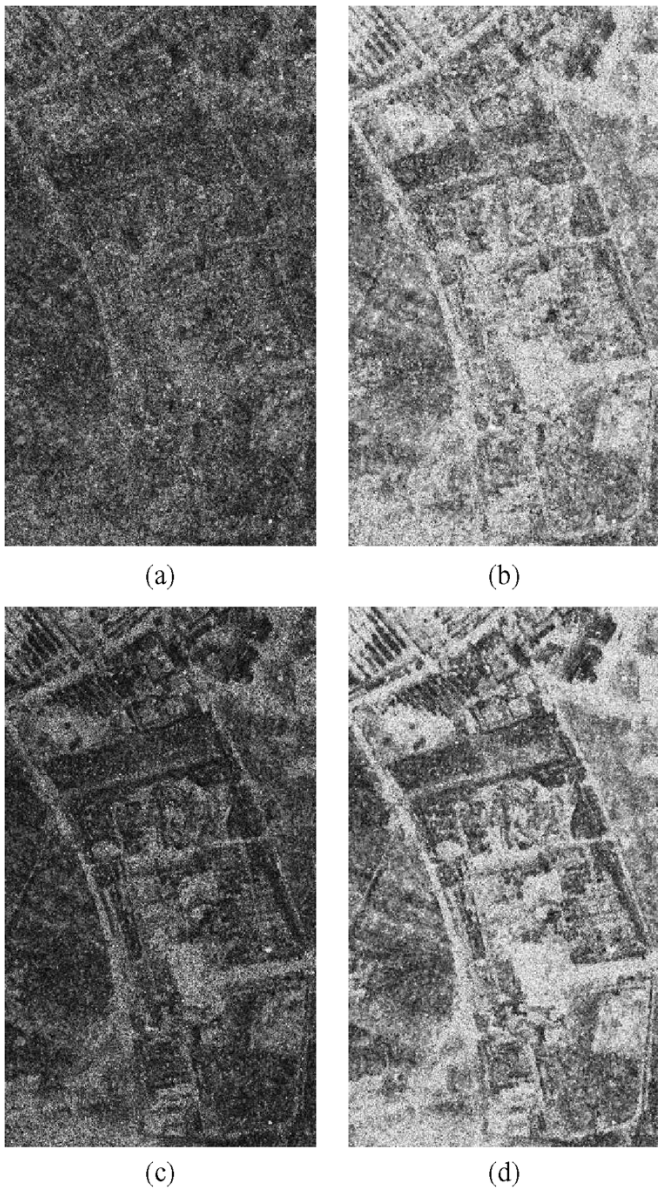


Fig. 8. A_1, A_2 decomposition of the interferometric coherency matrix (526×310 pixels). (a) A_1 and (b) A_2, parameters estimated from the IDAN filtered interferometric coherency matrix. (c) A_1 and (d) A_2, parameters estimated from the IDAN-LLMMSE filtered interferometric coherency matrix.

variation of the target scattering mechanisms inside the three-dimensional (3-D) (2-D spatial+1-D polarimetric) estimation

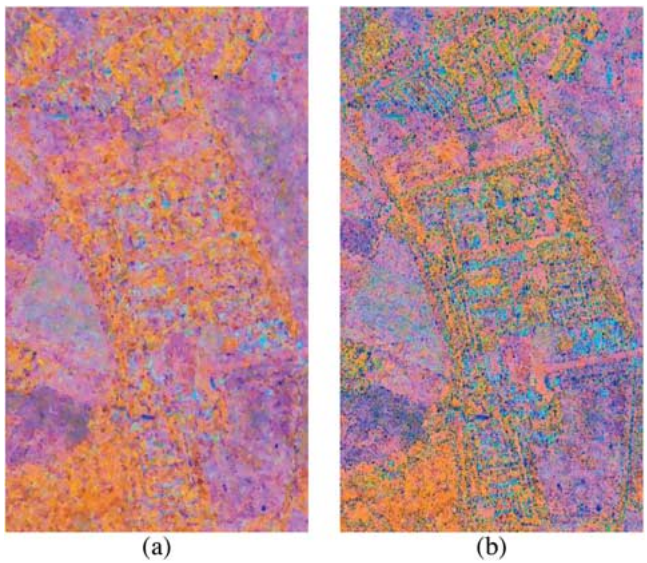


Fig. 9. $H - \alpha - A$ color RGB composition on the master polarimetric coherency matrix (526×310 pixels). (a) IDAN filtering. (b) IDAN-LLMMSE filtering.

window. In such areas, the AN has rather small dimensions, thus it cannot provide enough complex multilooking for an unbiased estimation of the α parameter. Despite the fact that the IDAN complex multilooking behaves much better than IDAN-LLMMSE in terms of reducing the noise variance, the latter [Fig. 10(d)–(f)] provides reliable bias reduction in all cases, even with high entropy values. Hence, in the classification applications where high entropy targets are investigated, the IDAN-LLMMSE parameter estimation technique provides better results than IDAN complex multilooking.

The behavior of the two filters can be observed in Fig. 11, which presents the results of the Wishart classification using as input images the master coherency filtered by either IDAN or IDAN-LLMMSE. As expected, due to the strongest noise and bias reduction on the homogenous area (fields, runway), the obtained results are much more regularized for the IDAN filtered coherency. The thin structures (buildings) are very well defined in both cases. Comparing the IDAN and IDAN-LLMMSE classification map with the optical image, the IDAN classification reveals much more spatial information than the IDAN-LLMSE classification. It is difficult to separate runway class from surrounding fields classes in Fig. 11(b), while with IDAN

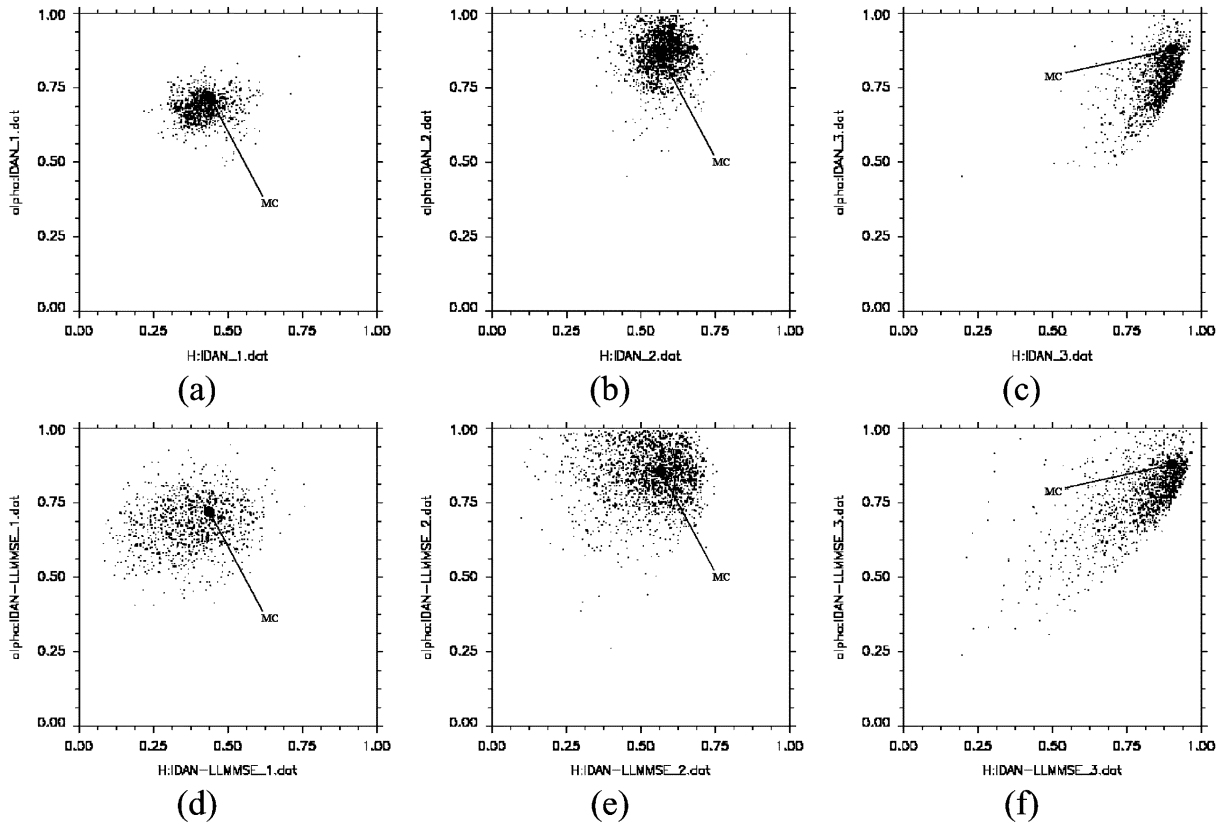


Fig. 10. $H - \alpha$ distribution on various homogeneous areas. (a)–(c) IDAN with complex multilooking. (d)–(f) IDAN with LLMMSE. MC is the boxcar MC of the selected region, estimated with a 15(range) × 30(azimuth) complex multilooking.

[Fig. 11(a)] the runway classification is better defined. Two forest areas clearly appear in the upper left region of Fig. 11(a). These classes are mixed in the IDAN-LLMMSE classification.

In summary, the overall performance of IDAN and IDAN-LLMMSE, POLSAR, and POL-InSAR filtering techniques has been evaluated at different stages. First, the ROC analysis and the bias reduction tables have been applied on low-level attributes (POL-InSAR intensities and coherence maps). Medium level physical parameters of the scatterers were computed and the influence of the proposed filtering method have been investigated (H, α, A, A_1, and A_2). A final high-level Wishart classification have been employed and the obtained results were discussed in correlation with the visual information of the available optical image.

As mentioned earlier, the critical point of this filtering procedure concerns the determination of the homogeneous area surrounding a pixel. One of the main advantages of the proposed IDAN technique relies on the fact that homogeneity is estimated using the three POLSAR or six POL-InSAR intensities, which are directly available with a very small number of looks. More complex statistical measures, based on the polarimetric or interferometric information [48] could be used, but they would require a much higher number of initial looks. In the POLSAR case, the criterion that merges the coherency matrix diagonal elements (17) allows to take an important part of the polarimetric information into account [49]. However, for POL-InSAR data sets, intensity variations may be, in some cases, unrelated to the coherence information. Over distributed media, like forest, it has been recently shown [29] that the average span image may be an unsuitable parameter, involving that the resulting estimated seeds may not contain pixels with homogeneous coherence. These areas correspond to high entropy values and, as observed in Fig. 10(c), the bias reduction is less important. In such cases, the IDAN-LLMMSE filter, by performing the local stationarity test twice within all the intensity images corresponding to the available polarization configurations, gives better results since less filtering is performed and the local backscattering mechanisms are better preserved.

V. Conclusion

A new method of filtering coherency matrices of polarimetric or interferometric data has been presented. The proposed filter uses ANs as spatial support, derived with respect to the intensity information. All the available intensity images of the POL-InSAR data are combined in the region growing procedure, to ensure the stationarity assumption. The proposed filter recomputes the polarimetric and interferometric coherency matrices, either by direct complex multilooking or from the LLMMSE estimator of the coherency matrix.

The experimental results have proved that the noise is greatly reduced, while the contours and fine details are preserved and the blurring effect is avoided. The reliability of the obtained results is demonstrated by either subjective assessment or by conventional objective analysis (ROC characteristics and bias reduction tables). Physical parameters of the scatterers were computed and the influence of the proposed filtering method

Fig. 11. Wishart $H-\alpha$ classification of master coherency matrix (500×500 pixels). (a) Classification result using IDAN filtered $[T]_{11}$. (b) Classification result using IDAN-LLMMSE filtered $[T]_{11}$. (c) Coregistered optical image showing different land covers, related to the obtained classes, for comparison purposes.

has been investigated for POLSAR (H, α, A) and POL-InSAR (A_1, A_2) parameters. A final Wishart classification has been employed and the obtained results were discussed and compared to the available optical image. All these features make the presented adaptive filtering algorithms an effective and powerful tool for noise or bias reduction for polarimetric or interferometric data processing.

The general conclusion is that the choice of the filtering algorithm to be used on a given POLSAR or POL-InSAR data set still remains application specific. The IDAN filter is a good compromise between variance or bias reduction and preservation of the spatial resolution, which makes it very useful for automatic unsupervised activities (edge detection, segmentation or automatic classification). However, in the case of supervised activity as direct visual interpretation or scattering signature assessment of pointwise targets, the IDAN-LLMMSE filter is more efficient.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the German Aerospace Center (DLR), Wessling, Germany, for providing the high-resolution polarimetric interferometric E-SAR images and the anonymous reviewers for helpful comments and suggestions.

REFERENCES

[1] R. Touzi, A. Lopes, J. Bruniquel, and P. W. Vachon, "Coherence estimation for SAR imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 37, no. 1, pp. 135–149, Jan. 1999.

[2] J. S. Lee, K. W. Hoppel, S. A. Mango, and A. R. Miller, "Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 32, no. 5, pp. 1017–1028, Sep. 1994.

[3] S. R. Cloude, "Group theory and polarization algebra," *OPTIK*, vol. 75, pp. 26–36, 1986.

[4] S. R. Cloude and E. Pottier, "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 34, no. 2, pp. 498–518, Mar. 1996.

[5] S. R. Cloude and E. Pottier, "An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 35, no. 1, pp. 68–78, Jan. 1997.

[6] J. S. Lee, M. R. Grunes, T. L. Ainsworth, D. Li-Jen, D. L. Schuler, and S. R. Cloude, "Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 37, no. 5, pp. 2249–2258, Sep. 1999.

[7] L. Ferro-Famil, E. Pottier, and J. S. Lee, "Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A/Alpha-Wishart classifier," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, no. 11, pp. 2332–2342, Nov. 2001.

[8] S. R. Cloude and K. P. Papathanassiou, "Polarimetric SAR interferometry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 5, pp. 1551–1565, Sep. 1998.

[9] K. P. Papathanassiou, A. Reigber, R. Scheiber, R. Horn, A. Moreira, and S. R. Cloude, "Airborne polarimetric SAR interferometry," in *Proc. Geosci. Remote Sens. Symp.*, vol. IV, Seattle, WA, 1998, pp. 1901–1903.

[10] J. S. Lee, I. Jurkevich, P. Dewaele, P. Wambacq, and A. Oosterlinck, "speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review," *Remote Sens. Rev.*, vol. 8, pp. 313–340, 1994.

[11] R. Touzi, "A review of speckle filtering in the context of estimation theory," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, no. 11, pp. 2392–2404, Nov. 2002.

[12] J.-S. Lee, "Refined filtering of image noise using local statistics," *Comput. Graph. Image Process.*, vol. 15, pp. 380–389, 1981.

[13] D. T. Kuan, A. A. Sawchuk, T. C. Strand, and P. Chavel, "Adaptive noise smoothing filter for images with signal dependent noise," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 7, no. 2, pp. 165–177, Mar. 1985.

[14] A. Lopés, E. Nezry, R. Touzi, and H. Laur, "Structure detection, and statistical adaptive filtering in SAR images," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 14, no. 9, pp. 1735–1758, 1993.

[15] M. Datcu, K. Seidel, and M. Walessa, "Spatial information retrieval from remote-sensing images—Part 1: Information theoretical perspective," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 5, pp. 1431–1445, Sep. 1998.
[16] M. Schroder, K. Seidel, and M. Datcu, "Spatial information retrieval from remote-sensing images, Part 2: Gibbs-markov random fields," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 5, pp. 1446–1455, Sep. 1998.
[17] Y. Wu and H. Maître, "Smoothing speckled synthetic aperture radar images by using maximum homogeneous region filters," *Opt. Eng.*, vol. 31, no. 8, pp. 1785–1792, Aug. 1992.
[18] J. M. Nicolas, F. Tupin, and H. Maître, "Smoothing speckled SAR images by using maximum homogeneous region filters: An improved approach," in *Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, vol. III, Sydney, NSW, Australia, Jul. 2001, pp. 1503–1505.
[19] W. Hagg and M. Sties, "Efficient speckle filtering of SAR images," in *Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, Pasadena, CA, 1994, pp. 2140–2142.
[20] J. S. Lee, S. R. Cloude, K. Papathanassiou, M. R. Grunes, and I. H. Woodhouse, "Speckle filtering and coherence estimation of polarimetric SAR interferometry data for forest applications," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 41, no. 10, pp. 2254–2263, Oct. 2003.
[21] J. W. Goodman, "Statistical analysis based on certain multivariate complex Gaussian distribution (An introduction)," *Ann. Math. Statist.*, pp. 152–176, 1963.
[22] J. R. Huynen, "Measurement of the target scattering matrix," *Proc. IEEE*, vol. 53, no. 8, pp. 936–946, Aug. 1965.
[23] E. Krogager, "New decomposition of the radar target scattering matrix," *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 18, pp. 1525–1527, 1990.
[24] W. L. Cameron and L. K. Leung, "Feature motivated polarization scattering matrix decomposition," in *Proc. IEEE Int. Radar Conf.*, Arlington, VA, USA, 1990, pp. 549–557.
[25] A. Freeman and S. L. Durden, "A three-component scattering model for polarimetric SAR data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 3, pp. 963–973, May 1998.
[26] R. Touzi, "Target scattering decomposition of one-look and multilook SAR data using a new coherent scattering model: The TSVM," in *Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, vol. IV, 2004, pp. 2491–2494.
[27] A. Reigber, M. Neumann, S. Guillaso, M. Jager, and O. Hellwich, "PolInSAR data processing with RAT (radar tools)," in *POLinSAR 2005 Workshop*, Franscati, Italy, 2005, CD-ROM, Paper no. 24.
[28] L. Ferro-Famil, E. Pottier, and J. S. Lee, *Unsupervised Classification of Natural Scene from Polarimetric Inteferometric SAR Data*, ed, C. H. Chen, Ed, Singapore: World Scientific, 2003.
[29] J. S. Lee, M. R. Grunes, T. Ainsworth, I. Hajnsek, T. Mette, and K. P. Papathanassiou, "Forest classification based on L-band polarimetric and inteferometric SAR data," in *POLinSAR 2005 Workshop*, Franscati, Italy, 2005, CD-ROM, Paper no. 43.
[30] R. Gordon and R. M. Rangayyan, "Feature enhancement of film mammograms using fixed and adaptive neighborhoods," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 4, pp. 560–564, Feb. 1984.
[31] R. B. Paranjape, T. F. Rabie, and R. M. Rangayyan, "Image restoration by adaptive-neighborhood noise substraction," *Appl. Opt.*, vol. 33, no. 14, pp. 1861–1869, 1994.
[32] R. M. Rangayyan, M. Ciuc, and F. Faghih, "Adaptive-neighborhood filtering of images corrupted by signal-dependent noise," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 20, pp. 4477–4487, May 1998.
[33] M. Ciuc, R. M. Rangayyan, T. Zaharia, and V. Buzuloiu, "Adaptive neighborhood filters for color image filtering," in *Proc. SPIE Nonlinear Image Process.*, vol. 3304, 1998, pp. 277–286.
[34] M. Ciuc, R. M. Rangayyan, T. Zaharia, and V. Buzuloiu, "Filtering noise in color images using adaptive-neighborhood statistics," *J. Electron. Imaging*, vol. 9, pp. 484–494, 2000.
[35] M. Ciuc, Ph. Bolon, E. Trouvé, V. Buzuloiu, and J. P. Rudant, "Adaptive-neighborhood speckle removal in multitemporal synthetic aperture radar images," *Appl. Opt.*, vol. 40, no. 6, pp. 5954–5966, 2001.
[36] G. Vasile, E. Trouvé, M. Ciuc, and V. Buzuloiu, "General adaptive neighborhood technique for improving SAR interferometric coherence and phase estimation," *J. Opt. Soc. Amer. A*, vol. 21, no. 8, pp. 1455–1464, Aug. 2004.
[37] G. Vasile, E. Trouvé, M. Ciuc, P. Bolon, and V. Buzuloiu, "Improving coherence estimation for high resolution polarimetric SAR interferometry," in *Proc. Geosci. Remote Sens. Symp.*, vol. III, Anchorage, AK, 2004, pp. 1796–1799.
[38] ——, "Intensity-driven-adaptive-neighborhood technique for POLSAR parameters estimation," in *Proc. Geosci. Remote Sens. Symp.*, vol. VIII, Seoul, Korea, 2005, pp. 5509–5512.
[39] J. S. Lee, "Digital noise smoothing and the sigma filter," *Comput. Vis., Graph. Image Process.*, vol. 21, pp. 255–269, 1983.
[40] J. W. Goodman, "Some fundamental properties of speckle," *J. Opt. Soc. Amer. A*, vol. 66, pp. 1145–1149, 1976.
[41] J. Astola, P. Haavisto, and Y. Neuvo, "Vector median filters," *Proc. IEEE*, vol. 78, no. 4, pp. 678–688, Apr. 1990.
[42] E. Trouvé, J. M. Nicolas, and H. Maitre, "Improving phase unwrapping techniques by the use of local frequency estimates," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 6, pp. 1963–1972, Dec. 1998.
[43] E. Trouvé, M. Caramma, and H. Maître, "Fringe detection in noisy complex interferograms," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 20, pp. 3799–3806, Jul. 1996.
[44] C. Lopez-Martinez, E. Pottier, and S. R. Cloude, "Statistical assessment of eigenvector-based target decomposition theorems in radar polarimetry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 43, no. 9, pp. 2058–2074, Sep. 2005.
[45] S. R. Cloude, K. P. Papathanassiou, and W. M. Boerner, "A fast method for vegetation correction in topographic mapping using polarimetric radar interferometry," in *Proc. EUSAR 2000*, Munich, Germany, May 2000, pp. 261–264.
[46] S. R. Cloude, K. P. Papathanassiou, A. Reigber, and W. M. Boerner, "Multi-frequency polarimetric SAR interferometry for vegetation structure extraction," in *Proc. Geosci. Remote Sens. Symp.*, vol. I, Honolulu, HI, 2000, pp. 129–131.
[47] D. Borghys, C. Perneel, and M. Acheroy, "Edge and line detection in polarimetric SAR images," in *Proc. Int. Conf. Pattern Recognit., Int. Assoc. Pattern Recognit.*, vol. II, Quebec, ON, Canada, 2002, pp. 921–924.
[48] J. Schou and H. Skriver, "Restoration of polarimetric SAR images using simulated annealing," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, no. 9, pp. 2005–2016, Sep. 2001.
[49] J. S. Lee, D. L. Schuler, and T. L. Ainsworth, "Scattering model based speckle filtering of polarimetric SAR data," in *Proc. 5th Eur. Conf. SAR*, vol. V, Ulm, Germany, 2004, pp. 203–207.

Gabriel Vasile (S'06) received the Engineer degree in electrical engineering and computer science and the M.S. degree in image, shapes, and artificial intelligence from the University Politehnica of Bucharest, Bucharest, Romania, in 2003 and 2004. Since 2004, he has been working on his Ph.D. dissertation on SAR multivariate signal processing with joint supervision from both Politehnica of Bucharest and University of Savoie, Annecy, France, in the framework of the French multilaboratory MEGATOR project.

His research interests are signal and image processing, polarimetric and interferometric SAR applications, and glacier monitoring.

Emmanuel Trouvé (M'00) received the Engineer degree in electrical engineering from the Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées, Paris, France, in 1990, and the Ph.D. degree in signal and image processing from Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France, in 1996.

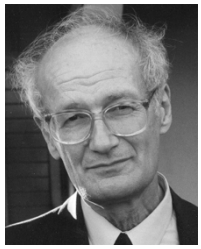
From 1996 to 1998, he worked with Thomson Marconi Sonar in Underwater Acoustic and Signal Processing. Since September 1998, he has been an Associate Professor of signal processing and computer vision at Ecole Supérieure d'Ingénieurs d'Annecy, University of Savoie, Annecy, France, and works in the Computer Science, System, Information and Knowledge Processing Laboratory (LISTIC). His research interests are SAR image processing and data fusion in remote sensing. He coordinates the French multilaboratory MEGATOR project (Monitoring the Evolution of Alpine Glaciers by Optical and Radar Remote Sensing).

Dr. Trouvé is a member of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Data Fusion Technical Committee.

Jong-Sen Lee (M'69–SM'91–F'97–LF'05) received the B.S. degree from the National Cheng-Kung University, Tainan, Taiwan, R.O.C., in 1963, and the M.A. and Ph.D. degrees from Harvard University, Cambridge, MA, in 1965 and 1969, respectively.

He is currently Head of the Image Science Section, Remote Sensing Division, Naval Research Laboratory, Washington, DC, where he is the Principal Investigator for several remote sensing programs on polarimetric SAR and interferometric SAR. He has developed several speckle filtering algorithms that have been implemented in many GIS, such as ERDAS, PCI, and ENVI, etc. His research covers a wide spectrum of areas, from control theory, operation research, and radiative transfer to SAR and polarimetric SAR image processing. He has investigated SAR image segmentation, inverse SAR, polarimetric SAR imagery statistics and speckle filtering, SAR polarimetry, and terrain/land-use classification and applications. His current research interests are in the area of SAR polarimetry, scattering signature modeling, polarimetric SAR calibration, polarimetric SAR interferometry, and unsupervised segmentation and classification using polarimetric and interferometric SAR data. He was granted a U.S. patent for the invention of a topography measurement technique using polarimetric SAR. He has published more than 60 papers in refereed journals and more than 150 papers in conference proceedings and has given tutorials at IGARSS'97 and IGARSS'98.

Dr. Lee was presented the Best Paper Award and the Best Poster Award at the Third and Fourth European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR2000 and EUSAR2002), respectively. He was made a Fellow of IEEE for his contribution toward information processing of SAR and polarimetric SAR imagery. He has chaired and organized many sessions in international conferences and is currently an Associate Editor of the IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING.



Vasile Buzuloiu (M'91–SM'05) received the M.S. and Ph.D. degrees in electronics from the University Politehnica Bucharest, Bucharest, Romania, in 1959 and 1980, respectively, and the M.S. degree in mathematics from "Universitatea Bucuresti" Bucharest, Romania, in 1971.

He is a professor with the Department of Applied Electronics and Information Engineering, University Politehnica Bucharest. He also heads the Image Processing and Analysis Laboratory and is a Research Associate with CERN, Geneva, Switzerland. His scientific interests cover mathematical modeling, statistical decisions, encryption, digital signal processing, image processing and analysis systems, and image processing applications. He also holds the title of Honorary Professor of the University Transilvania, Brasov, Romania (2001). Since 1994, he has held various positions of Invited Professor at French Universities (INSA de Lyon, ESIA-Université de Savoie, Université St. Etienne, Université Poitiers, INP Toulouse, etc.). Since 1995, he has been the Director of the Spring International School "Multidimensional Signal Processing and Analysis: Methods, Algorithms, Technologies, Applications" which is organized yearly at the University Politehnica Bucharest.

Dr. Buzuloiu received the "Traian Vuia" Award of the Romanian Academy (1985) for the first digital image analysis system developed in Romania. He is a Member of SPIE, Color Group (Great Britain), and the Romanian Society for Applied Mathematics.

Combining Airborne Photographs and Spaceborne SAR Data to Monitor Temperate Glaciers: Potentials and Limits

Emmanuel Trouvé, *Member, IEEE*, Gabriel Vasile, *Member, IEEE*, Michel Gay, Lionel Bombrun, *Student Member, IEEE*, Pierre Grussenmeyer, Tania Landes, Jean-Marie Nicolas, Philippe Bolon, *Member, IEEE*, Ivan Petillot, Andreea Julea, Lionel Valet, Jocelyn Chanussot, *Senior Member, IEEE*, and Mathieu Koehl

***Abstract*—Monitoring temperate glacier activity has become more and more necessary for economical and security reasons and as an indicator of the local effects of global climate change. Remote sensing data provide useful information on such complex geophysical objects, but they require specific processing techniques to cope with the difficult context of moving and changing features in high-relief areas. This paper presents the first results of a project involving four laboratories developing and combining specific methods to extract information from optical and synthetic aperture radar (SAR) data. Two different information sources are processed, namely: 1) airborne photography and 2) spaceborne C-band SAR interferometry. The difficulties and limitations of their processing in the context of Alpine glaciers are discussed and illustrated on two glaciers located in the Mont-Blanc area. The results obtained by aerial triangulation techniques provide digital terrain models with an accuracy that is better than 30 cm, which is compatible with the computation of volume balance and useful for precise georeferencing and slope measurement updating. The results obtained by SAR differential interferometry using European Remote Sensing Satellite images show that it is possible to measure temperate glacier surface velocity fields from October to April in one-day interferograms with approximately 20-m ground sampling. This allows to derive ice surface strain rate fields required to model the glacier flow. These different measurements are complementary to results obtained during the summer from satellite optical data and ground measurements that are available only in few accessible points.**

***Index Terms*—Airborne photogrammetry, digital terrain model (DTM), synthetic aperture radar (InSAR) interferometry, temperate glacier, velocity field.**

I. Introduction

In RECENT decades, a spectacular retreat has been observed on most of the monitored Alpine glaciers [1], [2]. If this evolution is confirmed in the coming years, it will have some important consequences in terms of water resources, economical development, and risk management in the surrounding areas [3], [4]. Up to now, only 1% of the existing world temperate glaciers have been monitored [5], mostly by ground measurements, which often provide information only once or twice a year at a few points. Because of the difficulty of reaching high-altitude glaciers in risky mountainous areas, acquisition and processing of remotely sensed data should provide more information to improve glacier monitoring [4], [6]. Satellite-based glacier monitoring programs such as Global Land Ice Measurements from Space (http://www.glims.org) have started to build a database of glaciers around the world [7]. In the Alps, in high mountain areas where the glacier activity has to be monitored, a large series of airborne photographs and spaceborne synthetic aperture radar (SAR) images is often available through local environmental agencies [8] and space agencies. However, gathering multisource data sets for a given area and extracting the desired measurements (surface velocity fields, surface and bottom topography, etc.) remain difficult tasks.

This paper presents the first results of a project that involves four laboratories specializing in optical and SAR image processing, and data fusion techniques. A global strategy illustrated in Fig. 1 is proposed to extract from the large number of remotely sensed images information that is useful in monitoring

Manuscript received July 5, 2006; revised November 15, 2006. This work was supported by the French Research Agency under the MEGATOR Project.

E. Trouvé and G. Vasile are with the Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance, Université de Savoie, Polytech'Savoie, F.74944 Annecy-le-Vieux Cedex, France, and also with the Grenoble Image Parole Signal et Automatique Laboratory, Institut National Polytechnique de Grenoble, Centre National de la Recherche Scientifique, 38402 Saint-Martin-d'Hères, France (e-mail: emmanuel.trouve@univ-savoie.fr; gabriel.vasile@univ-savoie.fr).

M. Gay, L. Bombrun, and J. Chanussot are with the Grenoble Image Parole Signal et Automatique Laboratory, Institut National Polytechnique de Grenoble, Centre National de la Recherche Scientifique, 38402 Saint-Martin-d'Hères, France (e-mail: michel.gay@lis.inpg.fr; lionel.bombrun@lis.inpg.fr; jocelyn.chanussot@lis.inpg.fr).

P. Grussenmeyer, T. Landes, and M. Koehl are with the Equipe Photogrammétrie et Géomatique, Modèles et Simulations Pour l'Architecture, l'Urbanisme et le Paysage-Photogrammetrie Architechturale et Geomatique UMR 694, Institut National des Sciences Appliquees de Strasbourg, 67084 Strasbourg, France (e-mail: pierre.grussenmeyer@insa-strasbourg.fr; tania.landes@insa-strasbourg.fr; mathieu.koehl@insa-strasbourg.fr).

J.-M. Nicolas is with the Département Traitement du Signal et des Images GET-Télécom Paris, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, 75013 Paris, France (e-mail: nicolas@tsi.enst.fr).

P. Bolon, I. Petillot, and L. Valet are with the Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance, Université de Savoie, Polytech'Savoie, F.74944 Annecy-le-Vieux Cedex, France (e-mail: philippe.bolon@univ-savoie.fr; ivan.petillot@univ-savoie.fr; lionel.valet@univ-savoie.fr).

A. Julea is with the Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance, Université de Savoie, Polytech'Savoie, 74016 Annecy, France, and also with Space Sciences Institute, 76900 Bucharest, Romania (e-mail: andreea.julea@univ-savoie.fr).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at http://ieeexplore.ieee.org.

Digital Object Identifier 10.1109/TGRS.2006.890554

0196-2892/$25.00 © 2007 IEEE

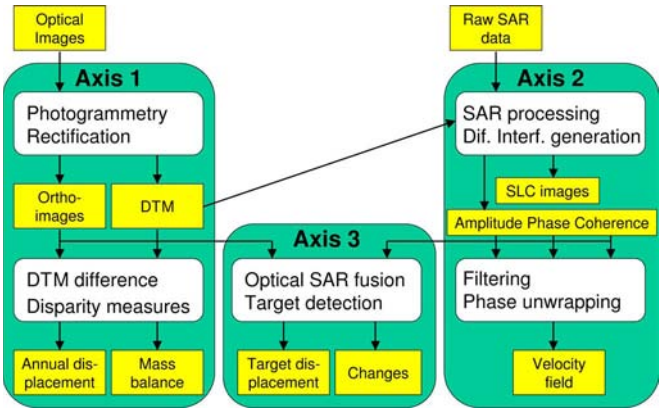


Fig. 1. Flowchart of the three main research axes proposed to extract information from optical and SAR data to monitor glacier activity; the main processing steps are in white, while the data are in yellow (light gray).

glacier evolution and evaluating the risk in the surrounding areas. The three main research axes are given as follows:

1) construction of digital terrain models (DTMs) and orthoimages from high-resolution optical images, and computation of differences after one or several years to detect changes such as volume variations, glacier retreat, lakes appearing/disappearing, etc.;
2) computation of differential C-band SAR interferograms by subtracting the topography provided by the previous results to obtain displacement fields over only a few days;
3) fusion of the feature detections and displacement measurements provided by the first two axes, in order to improve the confidence in the displacement/evolution measurements and to obtain higher level information such as change detection and risk maps.

In this paper, we focus on the first steps of the optical and SAR axes, which are given as follows:

- computation of DTMs by photogrammetry from airborne photographs;
- computation of velocity fields by SAR differential interferometry (D-InSAR) from satellite SAR images.

The principles of these two techniques are well established, but conventional processing is often difficult to apply in the context of Alpine glaciers.

In the field of photogrammetry, DTMs have been generated in similar studies dealing with monitoring high mountain terrain deformation. In [9], digital photogrammetry is applied to analyze changes in elevation and horizontal surface velocities. The goal of this paper was to determine surface topography and surface kinematics via high-altitude aerial photographs of two different years. Previously, Fox and Nuttall showed that photogrammetry can be used as a research tool by glaciologists [10]. Indeed, they produced photogrammetric compilations of two of the glaciers under study using 1990 aerial photographs. They examined the results and difficulties encountered in assessing the accuracy of the photogrammetric data. Photogrammetry was regarded primarily as a source of DTMs rather than as a cartographic tool. The derived digital model proved its efficiency for glaciological analysis [9], [11].

In the field of SAR interferometry, different approaches have been applied for studying glacier dynamics. The repeat-pass SAR acquisitions of the European Remote Sensing (ERS)-1/2 tandem mission provided a large database for glacier monitoring. One of the approaches used to study small movements over large areas is D-InSAR, which consists in differencing either two SAR interferograms or one interferogram and a topographical interferogram simulated by using a DTM over the same target area [12], [13]. In [14], nine ERS-1/2 tandem interferograms with useful scene coherence have been reported for measuring the surface flow of the Saskatchewan alpine glacier in the Canadian Rocky Mountains. With a mean velocity of about 15 cm/day, the obtained results agreed with the mean from surveying techniques. In addition, by using one interferogram formed by two acquisitions of the ERS-1 satellite at three-day intervals, the motion of the Black Rapids Glacier (AK) was assessed in [15]. The obtained accuracy was in the range of 5%–10% with a mean annual velocity of about 13 cm/day. Other geophysical properties can be extracted directly from the InSAR wrapped phase. In [16], the longitudinal strain rates of the Recovery Glacier (east Antarctica) have been estimated from RADARSAT-1 interferograms. Comparisons with the available ground data revealed a strain rate error of 17%, corresponding to a tensile strength error of 5.3%.

Although the D-InSAR processing chain is built from standard well-established InSAR algorithms as coregistration of interferograms, phase subtraction, and phase unwrapping, this procedure is often error prone because of complex glacier topography, phase noise at glacier boundaries, or atmospheric heterogeneities [17]. As the phase-unwrapping algorithm is the most sophisticated procedure in interferometric signal processing, a gradient approach (GINSAR) has been proposed by Sharov *et al.* [18] for differential processing of repeat-pass SAR interferograms in the context of glacier change detection and motion estimation. It has been validated on several tidewater glaciers from the Arctic regions. In order to separate ground displacement from atmospheric perturbations, a different approach based on the concept of permanent scatterers (PS) has been proposed [19] and successfully applied in urban areas. In the glacier areas where exposed rocks are visible, various backscatterers with a constant signature can be considered as potential PS, but results using this approach have not been reported. Beside the use of interferometric phase, a different approach based on intensity images has been proposed to measure displacement [20], [21]. In [22], the surface displacements are measured by correlating and tracking the image speckle pattern between two repeat-pass SAR acquisitions (speckle tracking). The advantages of the speckle tracking approach are less sensitivity to decorrelation and lack of need for the phase-unwrapping procedure [23]. However, the local amplitude variations (texture) should be high enough and the two speckle realizations should be quite dependent within the interferometric SAR image pair to ensure high correlation values.

Most of the published results are based on conventional SAR interferometry and obtained on glaciers located near polar regions [24], [25]. Fewer InSAR results have been published on temperate glaciers [14], [26], and up to now, only communications have reported results over Alpine glaciers [27], [28].

The context of temperate glaciers, especially with the climate in the Alps, is rather different from the context of polar and high-latitude glaciers.

- High-relief topography reduces the visibility of valley glaciers. They are rarely visible in both ascending and descending passes. When only one projection of the displacement on the SAR line of sight (LOS) is available, deriving 3-D velocity fields requires a stronger hypothesis (the flow direction) than when two projections are available [24]. Moreover, even when two projections are available, the high latitude increases the angle between ascending and descending tracks. Angles close to 90° are more suitable than the approximately 20° angle at the Alps' latitude.
- The small size of Alpine glaciers (typically about 10 km long and often just 1 or 2 km wide) has two main consequences for the processing: It reduces the size of possible filtering of the interferograms and the DTM, and increases the phase-unwrapping difficulty when glaciers are separated in several disconnected parts.
- The ice temperature of the low-altitude glaciers is very close to zero from the bedrock up to the surface. This strongly reduces the penetration length of electromagnetic waves [29]. The measurement of the ice-thickness distribution by low-frequency ground-penetrating radar or airborne ice-sounding radar is more difficult. This distribution is required to use the principle of mass conservation to convert InSAR velocity measurements to 3-D velocities as successfully performed over the Storströmmen glacier in northeast Greenland [30], [31].

Such differences have an impact on D-InSAR measurement feasibility, complementary data availability, and the processing chain: Different steps and hypotheses are strongly context dependent.

In order to apply photogrammetry and SAR interferometry in the context of Alpine glaciers, their potential and limitations have to be carefully investigated. The objective of this paper is to perform such investigations for airborne optical images and SAR D-InSAR using ERS C-band images. Airborne photography allows the computation of high-resolution DTMs on the glacier surface and the surrounding moraines, whereas spaceborne SAR interferometry provides the projection of the surface velocity field in the SAR LOS. The DTM information is necessary for the D-InSAR processing to remove topographic fringes, resample the results in ground geometry, and reconstruct the three components of the displacement vectors. Since the studied glaciers are visible only in descending passes, the three components are obtained using the surface-parallel flow (SPF) assumption and the maximum slope direction [15]. The result should be considered as "quasi-3-D" velocity vectors since pure velocity and ablation/accumulation effects are merged. The different steps of the processing chains and seasonal limitations are carefully analyzed with a series of ERS tandem interferograms over Alpine glaciers located in the Mont-Blanc area.

The remainder of this paper is organized as follows. The test site and the data set collected over the Mer de Glace and Argentière glaciers are presented in Section II. The processing of optical airborne images and high-resolution DTM obtained over Mer de Glace glacier are described in Section III. The different steps of the D-InSAR processing chain are presented and analyzed in Section IV. Section V presents the displacement field derived from the previous results and the comparisons with ground measurements.

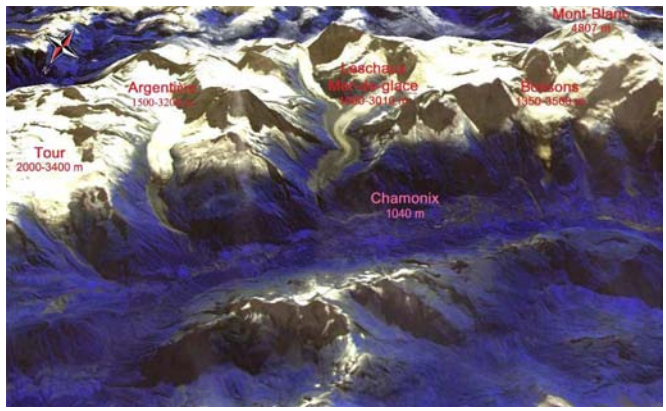


Fig. 2. Chamonix–Mont-Blanc test site. Main glaciers and geographical features. Shown is the 3-D model draped with a SPOT-2 multispectral image during the summer of 2000.

II. Test Area and Data Sets

The project test site is located in the Alps, near the borders between France, Italy, and Switzerland. It goes from the glacier of Le Grand Plateau (45° 50′ N, 6° 51′ E) about 4000 m above sea level (ASL) up to the Trient glacier (46° 59′ N, 7° 01′ E) about 2000 m ASL. It includes the Mont-Blanc (4810 m), the Chamonix valley (1000 m), and two well-known and instrumented glaciers, i.e., Mer de Glace and Argentière (Fig. 2).

This test site is suitable for investigating the potential of remotely sensed data to monitor glacier activity for several reasons, such as the following:

- *geophysical diversity of glaciers:* a large range of altitudes (1000–4800 m) and glacial velocities (0–30 cm/day over Mer de Glace and Argentière glaciers, and up to 3 m/day in the Géant icefall [32]), complex surface cover (mixture of snow, ice, and rocks), and the presence of water-collecting tunnels (Argentière), which enable subglacial point velocity measurements [33];
- *data availability:* the existence of various data sets from spaceborne or airborne sensors, which are acquired with different time intervals in different seasons, and ground measurements, which help in the data processing, information fusion, and validation of the final results [34].

A. Optical Data

For several decades, airborne photography has been an important source of information over a large number of glaciers in the Alps [8], [35]. In the French part, the main glaciers of three different regions have been covered by airborne photography every three years between 1975 and 1995 (Table I). More recent campaigns (1998, 2000, and 2004) have been performed over the whole "Haute-Savoie" (4598 km^2), where the studied glaciers are located [8]. The advantage of such data is the high

TABLE I
AIRBORNE PHOTOGRAPHY CAMPAIGNS OVER THREE DIFFERENT GLACIER REGIONS IN THE FRENCH ALPS ("X" DENOTES EXISTENCE OF A CAMPAIGN THAT YEAR). THE MONT-BLANC REGION HAS ALSO BEEN COVERED IN 1998, 2000, AND 2004 BY CAMPAIGNS PERFORMED OVER THE WHOLE "HAUTE SAVOIE"

	1975	1976	1978	1979	1981	1982	1983	1984
Mont-Blanc		×		×		×		
Savoie	×		×		×		×	
Oisans	×		×		×			×
	1985	1986	1988	1989	1990	1991	1992	1995
Mont-Blanc	×				×			×
Savoie		×		×			×	
Oisans			×			×		

resolution of digitized photos or digital image acquisitions. They allow the computation of high-resolution DTMs and orthoimages with accurate positioning obtained by using a few GPS control points (see Section III). Another advantage is the ability to reconstruct past glacier configurations. Indeed, data from 1990 and 1995 are available and will be of particular interest for interpretations over the last decades. However, the main disadvantage is the high cost of each campaign, which usually covers only a few glaciers, making such data rarely available for the scientific community.

Spaceborne optical images with their increasing resolution are a potential alternative. A detailed map of the summer ice velocity field for our study area has been obtained previously by cross-correlating SPOT5 optical images [36]. One of the advantages of such data is that a single image can cover the whole group of glaciers of a mountain area. Moreover, along-track stereo-pair acquisition capability and multispectral sensors allow satellites such as the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) to contribute to ice measurements by providing both elevation models and surface classification based on spectral signature [7]. This information can be used to identify specific features (e.g., emerging lakes, ice cracks, glacier tongues) for change detection and risk assessment. Hybrid DTMs produced by the merging of optical and SAR DTMs also seem to be promising [4], [6].

Nevertheless, the spatial resolution of these images compared to that of aerial photography remains a disadvantage. The achievable accuracy for elevation changes and horizontal displacements approximates the spatial resolution, i.e., 15 m for ASTER against less than 0.30 m for aerial photography [9]. In [9], a photogrammetrically derived DTM was compared with an ASTER DTM. The latter one provided an accuracy between ± 18 m rms (in moderately mountainous terrain) and ± 60 m rms (in rough high mountain topography). Thus, ASTER and SPOT image pairs provide DTMs but with a DTM accuracy not comparable to that reached by photogrammetric techniques. Satellite DTM can be used to derive elevation changes if the time separation is a few years [37]. The aerial DTM high accuracy should allow to compute annual elevation changes that are useful in deriving annual mass balance. Moreover, because of the weather conditions on mountainous areas and orbital constraints, existing data with a meter-scale resolution are still rare, and programmed acquisition of stereoscopic pairs remains uncertain.

B. SAR Data

Satellite SAR images are more and more used to observe glaciers particularly because of two great advantages: 1) The active SAR sensor acquires images regardless of weather conditions. 2) It measures both the amplitude and phase of the backscattered signal. With the resolution of the data that have been available up to now (about 20 m with ERS images), the amplitude is often difficult to use in extracting precise information on specific features. The next generation of SAR satellites should provide meter-resolution images and fully polarimetric data, which will be useful to detect different features and backscattering mechanisms [38]. With interferometric data, the geometric deterministic component of the phase offers the opportunity to measure the glacier displacement between the two acquisitions with a precision of a fraction of the wavelength (5.6 cm in C-band). The two main limitations of this technique are the temporal decorrelation of the signal over glaciers (see Section IV-B2) and the need to separate the topographical fringes from the displacement fringes. Among the different techniques that can be used [18], the safest one consists in using a DTM and the radar geometry to simulate the phase signal due to the topography and to compute the difference with the real interferogram.

In this paper, 16 raw SAR images from ERS 1 and ERS 2 have been selected to study the feasibility of SAR interferometry in order to extract the surface velocity fields of the studied glaciers. The data set presented in Table II includes different time intervals (one day with tandem couples, three days, and six days), different seasons, and ascending and descending passes.

C. Large-Scale DTM

A large-scale DTM is required for InSAR processing in order to remove the topographic fringes and to georeference the information obtained in radar geometry (unwrapped phase and complementary information such as amplitude and coherence). For topographic fringe removal, the DTM accuracy requirement increases with the baseline between the two SAR acquisitions, which makes interferograms more and more sensitive to the topography, especially in the high-relief areas of Alpine glaciers. In the georefencing step, the impact of low-resolution DTM or low planimetric accuracy can be important since in the last step, the displacement measured on the radar LOS is converted into velocity fields using the hypothesis of surface-parallel motion in the direction of maximum slope, as described in Section V. This last step requires only a low-resolution slope estimate, but registration of the SAR measurements and the topography is error prone, especially on the margins of the narrow Alpine glaciers.

Since the 1995 aerial photographs cover only the most important glaciers and a high-resolution DTM has been produced until now only on the Mer de Glace and the lower part of the Leschaux glacier, a large-scale DTM has been used for the SAR processing. Normally, the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DTM would be sufficient, even though only the Digital Terrain Elevation Data-1 resolution (about 90 m) is available in Europe. However, in the studied mountainous area, the SRTM DTM is not complete due to the forshortening and shadow

TABLE II
ERS SAR RAW DATA ACQUIRED OVER THE MONT-BLANC AREA [B: BASELINES (PARALLEL AND PERPENDICULAR TO THE RADAR LOS), e_a: ALTITUDE OF AMBIGUITY]

Dates	Δt	Satellite(s)	Orbites	Frame	Pass	$B_{\parallel}$ (m)	$B_{\perp}$ (m)	e_a (m)
91.08.17 / 91.08.20	3 days	ERS-1/1	00449 / 00492	2682	Des.	-44	-7	1202
91.08.29 / 91.09.04	6 days	ERS-1/1	00621 / 00707	2682	Des.	36	291	29
95.07.09 / 95.07.10	1 day	ERS-1/2	20830 / 01157	0909	Asc.	17	52	162
95.08.13 / 95.08.14	1 day	ERS-1/2	21331 / 01658	0909	Asc.	-37	-98	86
95.10.22 / 95.10.23	1 day	ERS-1/2	22326 / 02653	2673	Des.	-44	-107	87
95.12.31 / 96.01.01	1 day	ERS-1/2	23328 / 03655	2673	Des.	79	208	45
96.03.10 / 96.03.11	1 day	ERS-1/2	24330 / 04657	2673	Des.	26	9	935
96.04.14 / 96.04.15	1 day	ERS-1/2	24831 / 05158	2673	Des.	39	93	100

effects. For this paper, it has been completed using an 80-m-resolution DTM provided by the French National Geographic Institute (IGN), which was built from 1980 photos by photogrammetric restitution at 1/60 000 scale and from digitalized contour maps at 1/25 000 scale. With large altitude of ambiguity as in the March 1996 ERS pair (about 900 m), the impact of the resulting DTM uncertainty is still negligible in the fringe pattern. This DTM has been used for the georeferencing of the whole SAR image. In the last InSAR processing step, it was updated by the DTM computed by aerial triangulation (AT) from the 1995 photos (Section III).

III. HIGH-RESOLUTION DTM COMPUTATION

Several series of photos were selected over the Leschaux/Mer de Glace glacier. The 9 × 9 in (approximately 23 × 23 cm) negatives were scanned at a resolution of 15 μm, providing 15 360 × 15 360 pixels per image. They cover each glacier with about 80% overlap. On the 1995 acquisition over the Mer de Glace glacier (Fig. 3), the pixel size in the original photos corresponds to 36 cm at the bottom of the glacier (1000 m ASL) and 18 cm at its top (2800 m ASL). The plane was flying at an altitude of 4650 m ASL.

In the first step of the processing, the digital images are oriented using the bundle-block AT technique, which enables global restitution of a block of photos and reduction of ground control points (GCPs). This creates the possibility of working over terrain with poor geodetic point density. Bundle-block adjustment is an iterative method based on the use of photo coordinates as observations. Then, the application of the central projection method [39] enables the conversion of these observations into terrain coordinates in one step. This requires a block of photos with at least 60% overlap and 20% side-lap (often more). Moreover, a set of eight points located on both sides of the glacier and measured by GPS with an accuracy of 10 cm in X, Y, and Z is needed for the orientation process. Fig. 3 shows the location of the GCPs used in the AT process. It is obvious that the distribution and number of GCPs are not optimal, especially in the inaccessible parts of the glacier. Only a few targets fixed in the past on rocks along the glacier were visible on the 1995 images. Some additional points close to huts have been measured by GPS.

The input to AT calculations consists of picking both GCPs and tie points (used to join photos together along and between strips), and their quality affects the reliability of the overall model. Point measurement uncertainty is estimated from rms errors. Finally, the main advantage of processing by the bundle-block adjustment is to produce a global and homogeneous result over the whole area.

Fig. 3. Layout of the set of 13 photos that were taken over the Mer de Glace in 1995 and are entering in the AT processing. Circles represent the points measured by GPS.

On the Mer de Glace, approximately 3700 AT points were computed, including 2000 three-ray points (the same point measured in three overlapping images), 500 four-ray points, and about 200 five-ray points due to the high degree of overlap. Each correlated point is processed from at least three images, and this redundancy leads to high accuracy. The rms errors of the computed AT points are $\sigma_{X,Y} = \pm 20$ cm and $\sigma_Z = \pm 30$ cm.

These images are then used to compute about 5 million complementary points on a regular grid by photogrammetric matching techniques (using the KLT software package) based on the correlation of image patches in two or more successive images. Break lines and structure lines are defined by manual stereoscopic measurements. Break lines and structure lines are specific edges of topographic significance on the terrain. They define physical discontinuities in slope and are materialized by linear features. The aerial photos were acquired during the summer, so only a few areas were covered by snow in the upper part of the glacier. Matching was problematic when saturation of the optical images occurred, leading to failure of automatic correlation. Thus, manual stereoscopic measurement was necessary to supplement the terrain model. Specific problems also arise in matching ice cracks. Manual points have to be taken at the top and bottom of crevasses. The result is controlled by stereo-viewing (superimposing previously matched points and selected stereo pairs). The global result is obtained with 80% automatic or semiautomatic measurements, where semiautomatic processing entails guidance from the operator, who increases the density in weak areas by stereoscopic measurements. About 20% are completed manually in areas where steep slopes or poor contrast prevents reliable matching.

At this stage of the processing, a DTM can be computed with a resulting horizontal resolution ranging from 2 to 5 m depending on the slopes. Generally, a 5-m grid is used, except in very steep areas, where one point for every 2 m was necessary in order to guarantee the required altimetric accuracy. The accuracy of the final DTM, despite manual intervention, is assessed to lie in the accuracy interval announced previously ($\sigma_{X,Y} = \pm 20$ cm, $\sigma_Z = \pm 30$ cm) since an experienced operator reaches at least that measurement precision.

The resulting final DTM over Mer de Glace is shown in Fig. 4. By superimposing the orthoimages processed with the 1995 photos on the produced DTM, a 3-D model of the Mer de Glace is obtained (Fig. 5).

Fig. 4. Mer de Glace DTM processed by photogrammetric techniques.

IV. D-InSAR Processing

Despite many applications already using differential SAR interferometry, the processing of such data and the extraction of the sought-after information are still a difficult task. This is even more difficult in the context of the proposed test site with high-relief topography, large and irregular displacements, and snow and ice backscattering mechanisms, which are still under investigation [40]. In this section, results obtained by different processing chains are presented to evaluate the feasibility and the limitation of D-InSAR glacier monitoring with ERS data.

A. SAR Processors

In this paper, two standard D-InSAR processors have been used: Differential Interferometric Automated Process Applied to Survey Of Nature (DIAPASON) and Repeated Orbit Interferometry Package (ROI-PAC) software packages. The first results obtained with an original InSAR time-domain processor called the SYnthèse TEmporelle Radar (SYTER) are also presented.

1) Standard Processors: The standard DIAPASON processor provides a complete D-InSAR processing chain that allows scientists from different application fields (e.g., volcanology, seismology) to obtain meaningful results from the use of SAR interferometry to measure displacements [13]. This processing chain was developed at the Centre National d'Etudes Spatiales [41] in the beginning of the 1990s and provides better results when the processing starts with raw data instead of single-look complex (SLC) images. The focusing is performed in the frequency domain to reduce the computation load, which was a critical issue at that time. DIAPASON can be used without a DTM (using a flat earth with a constant elevation), which leads to reasonable measurements in the case of very large altitude of ambiguity. When DTMs are introduced at the interferogram generation stage, the registration step is improved, and the intensity, coherence, and phase images can be computed directly in the DTM geometry. However, generating interferograms in the radar geometry is more appropriate for further processing such as filtering or phase unwrapping.

Another D-InSAR processor that is widely used in the academic and research community is the ROI-PAC. From the initial experiments in spaceborne radar interferometry [42], ROI-PAC has been developed through the collaboration of many researchers at the Jet Propulsion Laboratory and Caltech [43]. It uses raw radar data, telemetry information, and DTMs for generating displacement maps [44]. In this processing chain, DTMs become necessary only after the interferogram

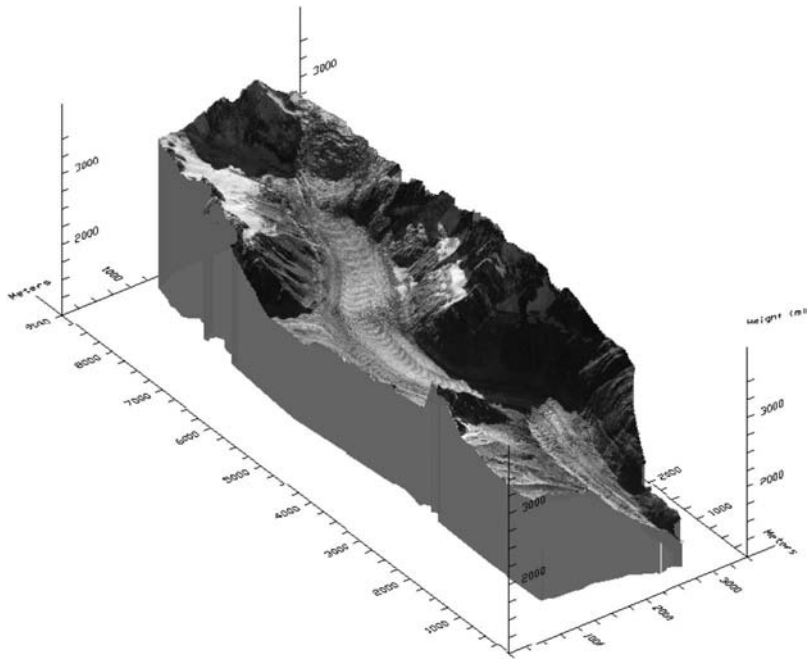


Fig. 5. Mer de Glace glacier 3-D model (orthophotos from 1995 that were draped on the computed DTM).

generation stage to enable topographic fringe removal and precise orbital phase corrections. It also allows resampling of the results in ground geometry.

It is important to notice that in both cases, the SAR focusing is performed with a mean altitude hypothesis, which is valid with ERS data and slow height variations. This hypothesis tends to introduce focusing errors in areas with strong topographic relief: Indeed, there is, for example, almost a 4000-m-height difference between Chamonix valley and the Mont-Blanc summit, corresponding to a foreshortening that can be compared to the ERS field of view (several kilometers). For high-resolution data, this effect is more severe, and a DTM is usually required for SAR synthesis.

2) Temporal-Domain Processor: To overcome the previous difficulty in specific areas, such as the studied glaciers, and to benefit from accurate DTM information earlier in the processing, an original approach is currently being developed at Télécom Paris [45]. It is based on the processing of raw data in the temporal domain. The main ideas of the proposed SAR processing consist of the following.

- Using local circular approximation of the satellite orbit and the Earth rotation to take into account the relative displacement of the imaged points. This allows us to search for the closest point approach (CPA), which is the time of the shortest distance between the Earth target point and the sensor. The CPA corresponds to a zero Doppler Centroïd value. All the relative positions of the Earth target point can be tabulated around this CPA. Actually, in this approach, nonzero Doppler Centroïd data correspond to a slight squint angle in the acquisitions.
- Performing in the time domain a coherent summation of the delayed complex raw data. Delays required for this beamforming are deduced from previous tabulated relative positions. Subaperture images can be obtained by selecting a reduced set of raw data.
- Choosing a ground range geometry for reconstructed pixels. In this way, the computation of interferograms does not require any coregistration as, by introducing the baseline in the SAR processing, the two SAR images are directly obtained in the same ground geometry. Moreover, in order to obtain two images with the same Doppler Centroïd, data are processed with squint angles corresponding to the same subaperture. This allows us to reduce the noise in the resulting interferogram.

Fig. 6 presents the results obtained with the three SAR processors previously described. The fringe pattern visible along the diagonal (from upper left-hand side to bottom right-hand side) corresponds to the Mer de Glace and Leschaux glaciers' displacement. The three fringe patterns on the bottom left-hand side also correspond to three small glaciers moving West toward the Chamonix valley. Global fringe patterns obtained by the different processors are similar. Differences in shape and orientation are due to different sampling geometries: The ROI-PAC and DIAPASON results are in radar geometry, whereas the temporal processor result is in the ground geometry. The reduced noise and apparently smoothed result of the temporal approach are due to the common band filtering resulting from the selection of the same subaperture.

At this stage, the SYTER experimental processor takes only a constant baseline and the distance to the geoid into account. The next development will introduce the precise orbits and the elevation provided by the DTM in the sensor-target distance computation. The results obtained by the ROI-PAC processor with the precise obits from Delft University, Delft, The Netherlands, are used in the following steps.

B. Interferogram Generation

1) Glacier Visibility: In order to assess the glacier visibility in ERS ascending and descending passes, several simulations

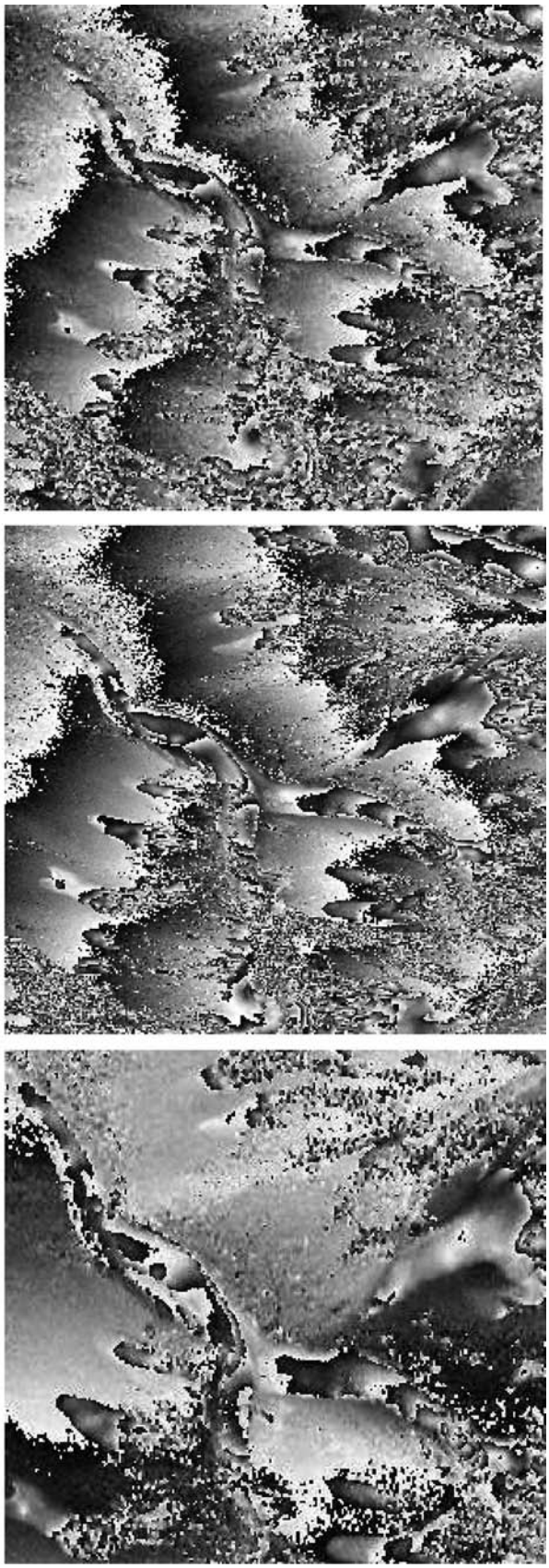


Fig. 6. ERS-1/2 March 1996 tandem interferometric phase after orbital fringe correction. (a) and (b) DIAPASON and ROI-PAC results in slant range geometry. (c) Temporal-domain processing result in ground range geometry.

have been performed with the DTM of Fig. 7(a). A SPOT 2 multispectral orthoimage where the main glaciers are clearly visible [Fig. 7(b)] is used to illustrate the results. The masks, which correspond to the nonvisible regions (layover, shadow), are shown in red over the SPOT optical image. The nonvisible areas for ERS ascending and descending acquisitions are presented in Fig. 7(c) and (d), respectively. Due to the orientation of the Argentière and Mer de Glace glaciers, the results show that approximately 85% of their surface is visible from ERS descending orbits. On the contrary, less than 20% of the two studied glacier surfaces can be investigated from ascending orbits. Accordingly, only the descending ERS-1/2 images may provide useful information for velocity assessment by means of D-InSAR processing.

2) Coherence Analysis: The descending ERS-1 three-day interval pair acquired during the summer of 1991 has been processed by the processors presented in Section IV-A to ensure that the results and the associated conclusions are not influenced by processing artifacts. The obtained interferograms have good overall quality, showing a high level of coherence on the nearby mountains and in the Chamonix valley. However, the coherence is low on the studied glaciers [Fig. 8(b)]. Despite the lack of glacier visibility, the same result can be observed with the ascending pairs during the summer of 1995 [Fig. 8(d)]. The loss of interferometric coherence can be explained by either a large change of the glacier surface state or a strong glacier displacement that would affect the global coregistration algorithm.

In order to investigate which assumption holds, controlled displacements were introduced in artificial interferograms computed by using twice the same acquisition (ROI-PAC SLC image from ERS1 1991-08-17). The displaced images were obtained by SLC resampling (four-point cubic convolution [46]) and then by shifting in the glacier flow direction by multiples of 0.25 pixels. Several interferograms were constructed between the original SLC image and the displaced SLC images. Fig. 9 shows the coherence mean and standard deviation computed on these artificial interferograms within a mask including only the Mer de Glace and Leschaux glaciers. The resulting plot shows that a satisfactory coherence level can be obtained even for displacements that are much larger than those expected for the studied glaciers within intervals of a few days: in the absence of any other decorrelation factor, the coherence level is above 0.6 for displacement up to 15 m.

With the real ERS August 1991 three-day interferogram, the displacement of the Mer de Glace and Leschaux glaciers is approximately only 1 m, whereas the coherence mean is equal to 0.2 [see Fig. 8(b)]. This loss of coherence in summer pairs can be interpreted only by glacier surface changes probably due to ice melting and variation in the number and position of elementary backscatters in the resolution cell. An empirical model derived from observed ablation confirms this interpretation: Each positive degree yields 6.6 mm of ablation per day [34]. With the summer positive temperature often encountered at daytime in the studied glaciers, the ablation is too important compared to the C-band 5.6-cm wavelength to preserve interferometric coherence. This conclusion is also consistent with the results reported by Fischer *et al.* [47] over Iceland glacier

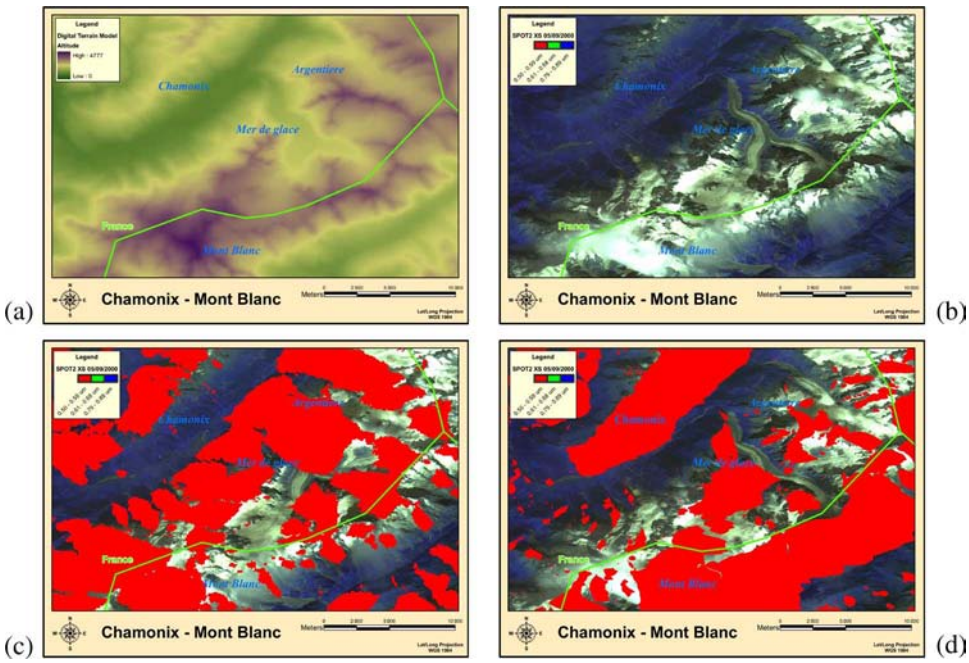


Fig. 7. ERS satellite visibility assessment. (a) Large-scale DTM. (b) Orthorectified SPOT-2 multispectral image. (c) Ascending ERS visibility (nonvisible parts masked in red). (d) Descending ERS visibility.

surges: they succeeded in measuring displacement that is often greater than 1 m/day (up to 7 m/day) mostly in ERS tandem winter interferograms, whereas changes of glacier surface due to precipitation, melt, and wind cause fast decorrelation of the phase signal.

So, the most likely explanation of the summer results is that on the Mer de Glace and Argentière glaciers that are below 3200 m, the interferometric coherence at three-day intervals is completely lost because they are below the 0 °C isotherm (snow line), which is often above 4000 m during the summer according to the Chamonix weather station and an assumed lapse rate of 6°/km. Note also that the coherence map seems to be a good parameter to automatically delimitate glaciarized areas: the surroundings have either an intermediate coherence level in forested areas or a good coherence level at higher altitudes, where rock and low vegetation do not create volume decorrelation.

To investigate the potential of ERS tandem SAR interferometry during the rest of the year, four descending InSAR pairs from October 1995 to April 1996 have been processed (cf. Table II). After the ROI-PAC orbital and topographic fringe removal, an adaptive neighborhood filter [48] has been applied to reestimate the phase and the coherence. Such filtering is required, especially for large baselines, to obtain a sufficient number of samples to reduce the phase noise and the coherence bias and noise. This approach prevents smoothing of edges such as glacier margins and strong backscatterers, which might be useful for further analysis [38].

Among the four interferograms illustrated in Fig. 10, the highest coherence can be observed in the March pair, which has the smallest perpendicular baseline and is still acquired in the cold season. The "new-year" pair has the lowest coherence due to the volume decorrelation caused by the large baseline. Over the Mer de Glace, Leschaux, and Argentière glaciers, the results show good preservation of coherence in the winter interferograms (December and March), whereas in the October and April interferograms, the coherence is well preserved only in the upper parts of the glaciers (south east).

Accordingly, we can conclude that in three-day intervals during the summer season, the variations of the glacier surface state in temperate alpine glaciers such as those of the Chamonix valley are stronger than C-band SAR interferometric tolerances for ERS data. By contrast, coherence is preserved in tandem pairs acquired in the winter season and allows the measurement of glacier displacement at this time of the year. The limitation in using InSAR in intermediate seasons depends on the meteorological conditions and the glacier's altitude. In the following, the most correlated interferogram (March 1996) will be used to illustrate the processing steps applied to obtain velocity fields over the studied glaciers.

3) Phase Analysis: Generally, the interferometric phase between two SAR images is assumed to contain independent contributions from orbit geometry, surface topography, surface motion, and atmospheric changes between the two acquisitions [17].

Due to the fact that the glacier surface is very small compared to a full satellite frame, only local (not regional) atmospheric changes can affect InSAR measurements over the studied glaciers. As radiowave velocity mainly depends on local water vapor pressure and temperature (Smith and Weintraub formula) [49] and as saturation water vapor pressure is rather small near 273 K (i.e., the surface glacier temperature), one-day variations should be minimal in winter.

This can be verified by comparing several different pairs collected during the same season. The similarity of the glacier fringe pattern from the four tandem interferograms presented in Fig. 10 can be visually observed in the high and medium coherence areas. This is confirmed by the wrapped phase

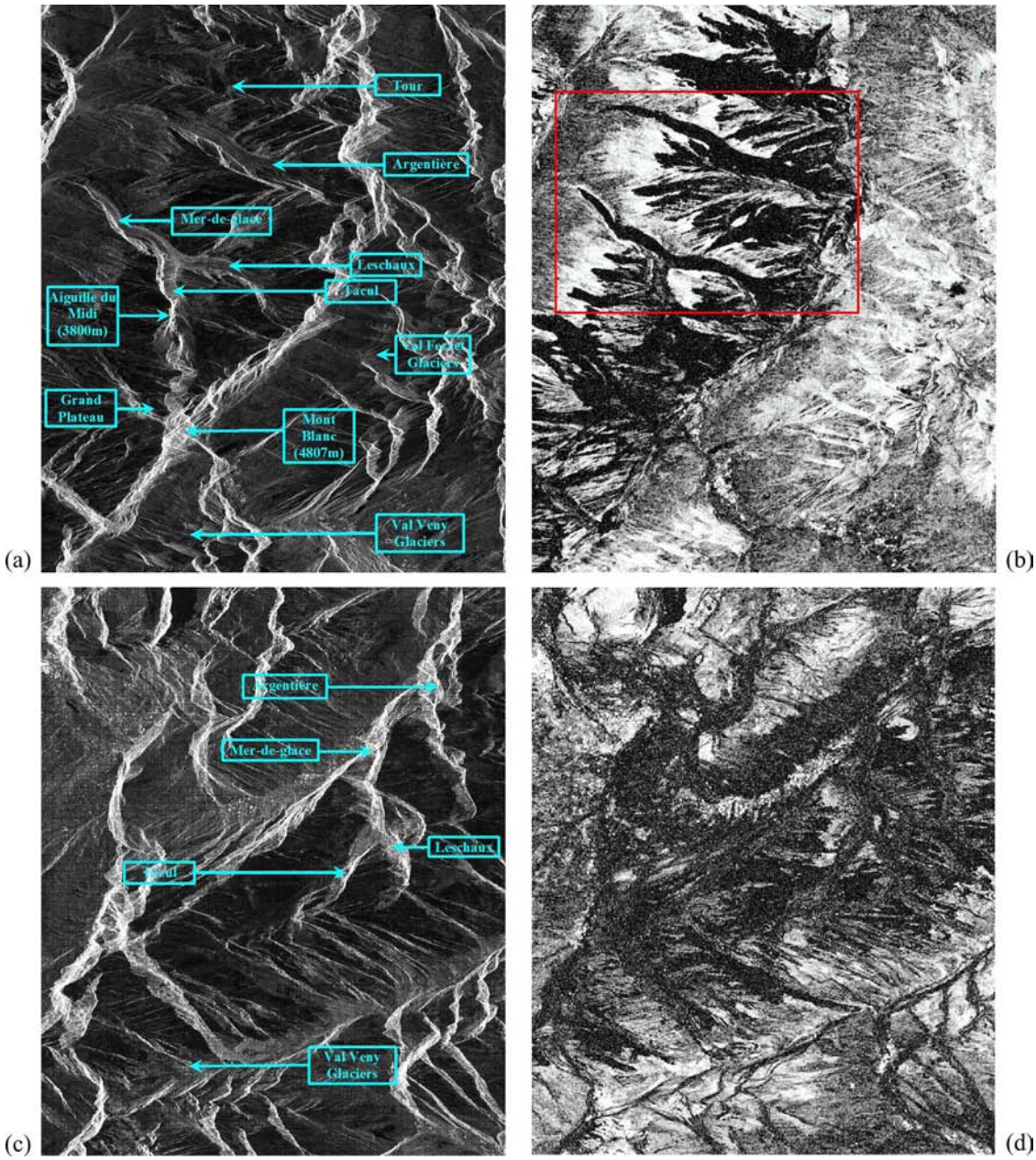


Fig. 8. (a) and (b) ERS1 three-day descending pass interferogram for the summer of 1991, annotated amplitude and coherence map of 1251 × 1531 pixels. The rectangle marked in red will be used in the sequel for further illustration. (c) and (d) ERS-1/2 one-day ascending pass interferogram for the summer of 1995, annotated amplitude and coherence map of 837 × 1024 pixels. These images are in radar geometry (slant range, azimuth) and obtained from SLC data by 1 × 5 multilooking.

differences between interferograms presented in Fig. 11. The difference is almost zero with two consecutive interferograms [March and April pairs, Fig. 11(a)] and slightly increases in some parts of the glaciers when more distanced periods are compared: the March/December pairs [Fig. 11(b)] and the March/October pairs [Fig. 11(c)]. The observed differences are also in quite good agreement with the *in situ* measurements presented in [50]. According to these results, at the scale of the glaciers located in the Alps, the atmospheric perturbations can be considered negligible in winter.

The removal of orbital and topographic fringes can be performed by using the large-scale DTM from Fig. 7(a) and precise orbit information from Delft University [44]. The visual analysis of the four interferograms presented in Fig. 10 shows the accuracy of the processing: out of the glaciers, the phase is almost constant along track and less than half a fringe appears in range direction, even with different perpendicular baselines and 3000-m height variations between the Chamonix valley and the mountain summits.

According to these results, the remaining fringe patterns can be considered to correspond only to the glacier one-day displacement, projected on the SAR LOS, and wrapped in the $[0, 2\pi]$ interval.

C. Phase Unwrapping and Orthorectification

To extract quantitative velocity information from the interferometric fringes shown in Fig. 10, the phase must be unwrapped.

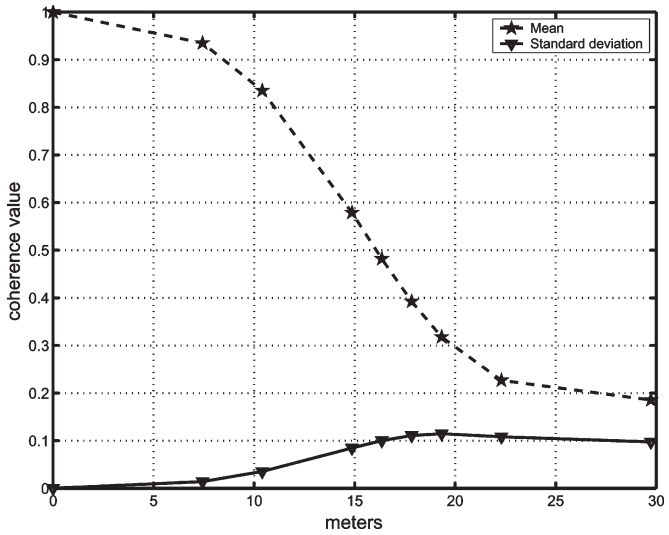


Fig. 9. Coherence values function of the artificially induced displacement created by using twice the same acquisition (ERS-1, August 17, 1991). Coherence mean and standard deviation are measured after 5×1 complex averaging on the Mer de Glace and Leschaux glaciers.

Several obstacles make fully automatic phase unwrapping difficult in the case of glacier displacement fringes. First, at the glacier margins, the motion phase signal is discontinuous with the rest of the interferogram, which should be a constant when all geometrical effects are perfectly corrected (orbital and topographic fringe removal). Depending on the studied glaciers, some parts such as the top of the accumulation area might move very slowly and allow the assumption that the velocity is close to zero in these areas. Accordingly, it is possible to assume that there is no displacement within one day for ERS tandem interferograms in such areas and to use them as a zero reference for the phase unwrapping. In the case of the Argentière glacier, the accumulation area is visible in SAR descending passes, but the surface topography is quite steep, which does not allow such an assumption. In the case of the Mer de Glace and Leschaux glaciers, motionless parts can be found in the Mallet glacier at the top of the Leschaux, but with the ERS 23° incidence angle, this part of the glacier is not visible. When there is no zero-speed area connected to the glacier in the interferogram, the observed fringe pattern can be unwrapped, but the result is obtained with an unknown offset. This offset can be found as soon as the motion of one point is known (by ground measurement for instance). This difficulty is increased when the glacier surface is separated in several disconnected parts because of the SAR geometry (shadow/layover) and the lack of coherence or aliasing, which occurs when the glacier accelerates, in ice fall areas for instance: the Nyquist criterion is not satisfied due to the image low sampling compared to the narrow fringe pattern. In this case, for the lowest part of the Argentière glacier for instance, a multiple of 2π is unknown between the different unwrapped parts of the glacier. This problem can be solved by complementary approaches such as speckle tracking [23] or measurement of the displacement of a coherent target to find the right multiple of 2π.

The two main approaches conventionally used to perform phase unwrapping are either local methods based on branch-cut algorithms, which unwrap the phase by propagation along

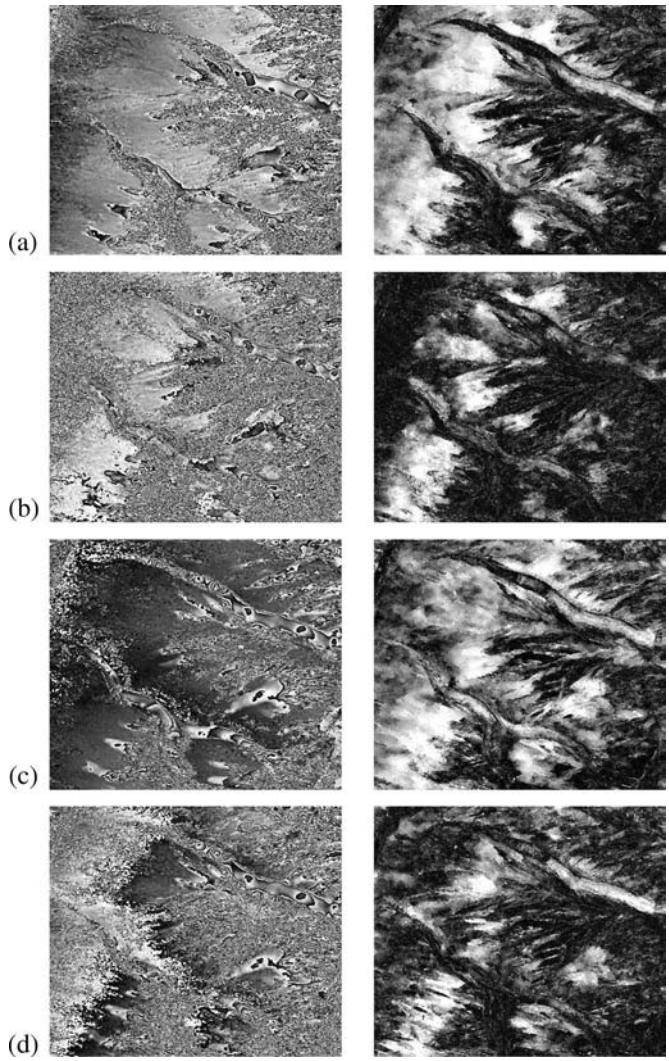


Fig. 10. ERS-1/2 tandem interferograms over the Mer de Glace/Leschaux and Argentière glaciers area (600×700 pixels). Differential phase and coherence filtered by amplitude-driven adaptive neighborhood. (a) October 22–23, 1995. (b) December 31, 1995–January 1, 1996. (c) March 10–11, 1996. (d) April 14–15, 1996.

paths as safe as possible [51], or global methods based on least square minimization of the distance between the wrapped phase gradient and the resulting unwrapped phase gradient [52]. With the first approach, the misplacement of branch cuts yields to the propagation of errors, which are multiples of 2π. The second approach has the advantage of allowing the detection and visual assessment of phase-unwrapping errors by computing the wrapped difference between the interferogram and the result.

To reduce the phase noise and to obtain a coherence level that reveals unreliable phase areas, the ROI-PAC initial 5×1 interferogram is filtered using local frequency estimation [53] and adaptive neighborhoods [48]. The filtered wrapped phase and associated coherence are illustrated in Fig. 10(c). Then, the weighted least squares phase-unwrapping approach has been applied to unwrap the phase over the Mer de Glace/Leschaux and Argentière glaciers. In order to avoid the influence of surrounding discontinuous fringes and corrupted areas, binary weights have been computed from the manual selection of the

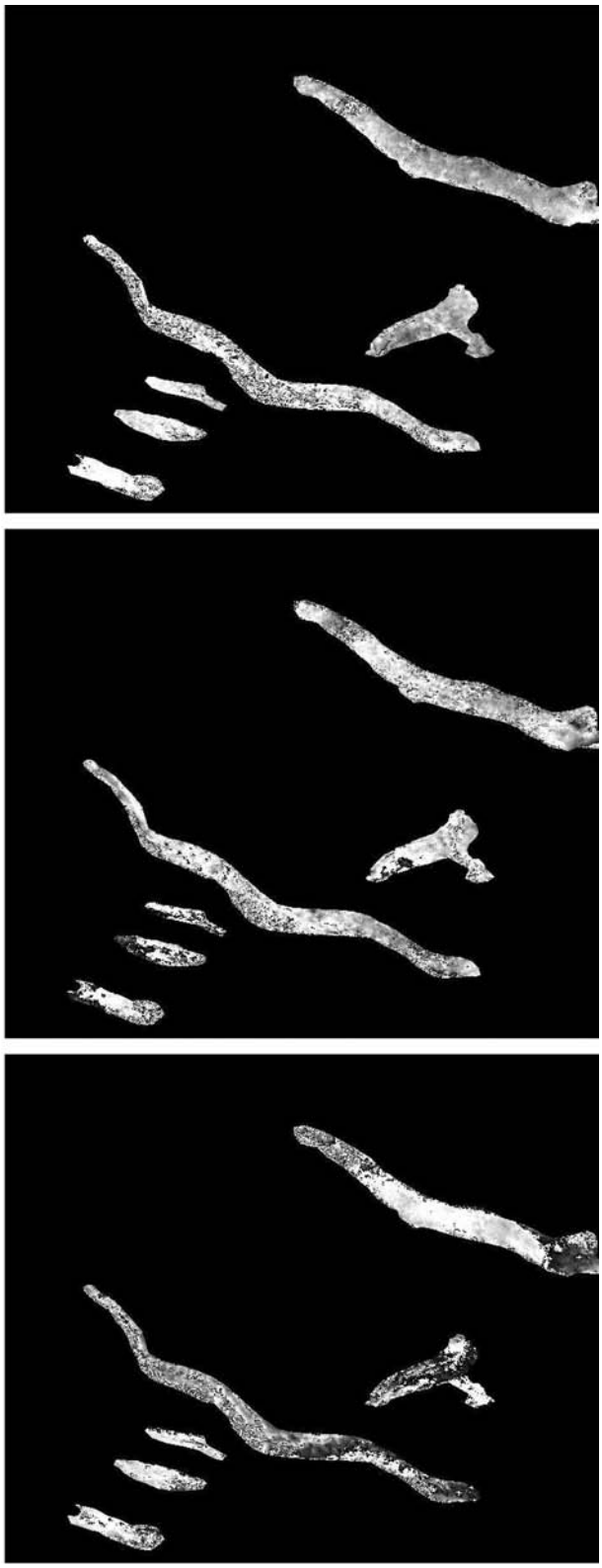


Fig. 11. Wrapped phase differences between interferograms presented in Fig. 10. (a) April 14–15, 1996 and March 10–11, 1996. (b) December 31, 1995–January 1, 1996 and March 10–11, 1996. (c) October 22–23, 1995 and March 10–11, 1996.

glacier SAR visible parts. The displacement field resulting from this unwrapping has an unknown offset on each glacier since they are disconnected.

Finally, the whole image is orthorectified, enabling easier computation of the final velocity field and comparison with ground measurements. This step is performed using the ROI-PAC software and the combined DTM described in Section II-C. It is based on the simulation of noise-free intensity images in SAR geometry using the distance to the satellite orbit and the local slope orientation provided by the DTM. Once the simulated image is registered on the real satellite image, the geometrical transformation is coded as a "lookup table," which provides the position in the SAR data of each DTM pixel illuminated by the radar. This allows to resample on the DTM grid any parameter initially computed in SAR geometry using, for instance, a bilinear interpolation.

Once the unwrapped phase is georeferenced, the unknown offsets can be set according to the knowledge of zero displacement areas or by using *in situ* measurements. One ground measurement point is necessary for each separated glacier, with a conversion into SAR LOS one-day displacement. Fig. 12 presents the georeferenced amplitude and coherence, which can be used to assess the confidence in the unwrapped phase. The unwrapped georeferenced differential phase is overlapped over a high-resolution airborne orthophoto to illustrate the portion of the glaciers that has been unwrapped and the geocoding accuracy of the database formed by SAR and optical orthoimages.

V. Motion Estimation

This section discusses the last stage of the processing: the use of the DTM to convert the one-day displacement field measured on the SAR LOS into a glacier velocity field. It presents the final results, comparisons with ground measurements, and uncertainty assessment.

A. From SAR LOS Displacement to Glacier Velocity

Due to the visibility of the studied glaciers with ERS data (Section IV-B1), the velocity field can be measured only through its projection on the LOS of descending acquisitions. The missing information is obtained by using an accurate DTM of the glacier surface and hypothesis often used when there is no reliable complementary information source. The hypotheses are given as follows:

- SPF assumption, which does not take the submergence/emergence velocity into account [30];
- direction of the maximum averaged downhill slope, which does not take a possible sliding component into account [15].

According to these hypotheses, the following steps are performed.

- In each pixel of the DTM, the two components of the elevation gradient are computed to derive the slope Sl and orientation Or angles of the glacier surface according to the angle conventions illustrated in Fig. 13. Then, the three-component unit vector $\overrightarrow{E}_m$ provides the main slope direction

$$\overrightarrow{E}_m = \begin{bmatrix} \cos(Sl) \cdot \cos(Or - \pi) \\ \cos(Sl) \cdot \sin(Or - \pi) \\ -\sin(Sl) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

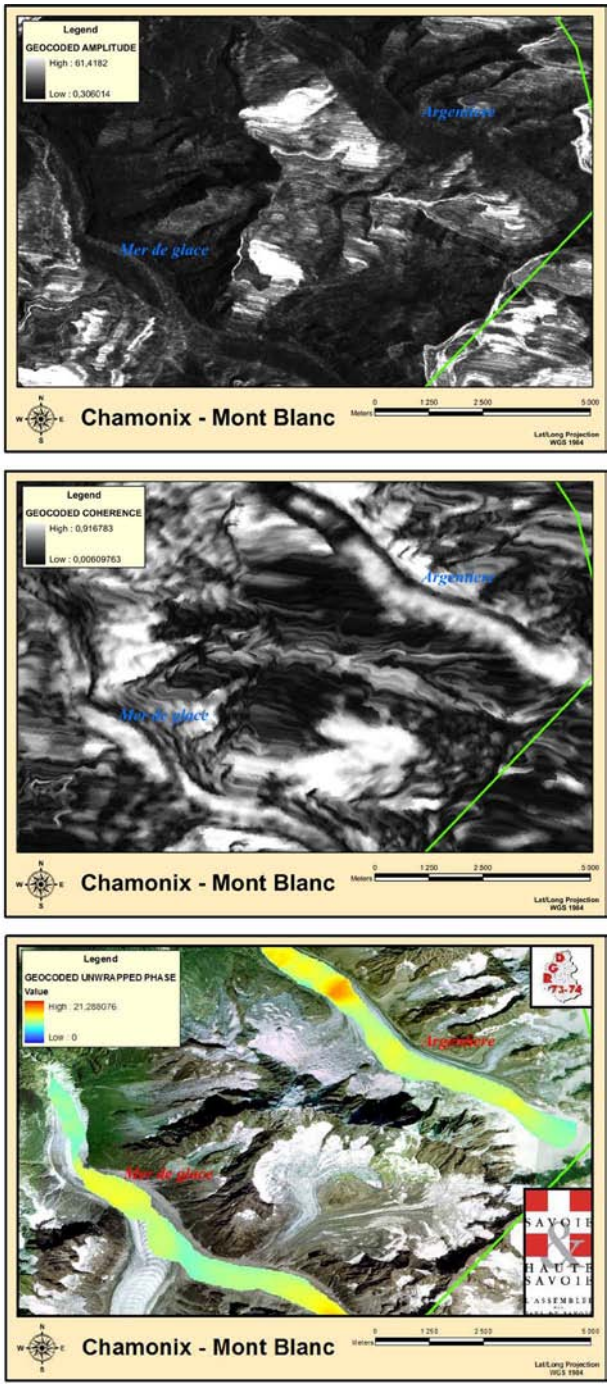


Fig. 12. ERS-1/2 tandem March 1996 interferogram. (a) and (b) Georeferenced amplitude and coherence. (c) Georeferenced unwrapped differential phase of the Mer de Glace and Argentière glaciers overlapped on an airborne orthophoto provided by the RGD-73/74; the color scalebar corresponds to the one-day LOS displacement in centimeters.

- In each pixel of the unwrapped phase image, the orientation of the LOS and the displacement along the movement direction are computed. First, the direction of the satellite must be determined with precision. Two angles are needed as parameters in the model, i.e., vertical and horizontal incidences. Vertical incidence inc_v is the conventional wave incidence angle, while horizontal incidence inc_h is the angle between the horizontal projection of the LOS and the local parallel of latitude

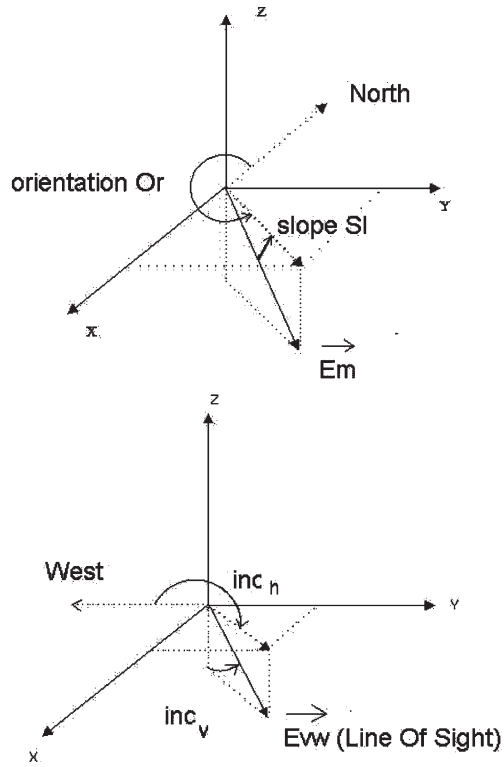


Fig. 13. Glacier surface and SAR LOS orientation angles.

at the current point. The vector representing the satellite LOS is

$$\overrightarrow{E}_{\mathrm{vw}} = \begin{bmatrix} -\sin(inc_v)\cdot\sin(inc_h) \\ -\sin(inc_v)\cdot\cos(inc_h) \\ -\cos(inc_v) \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Then, the displacement measured along the LOS D_{vw} is computed from the value of the unwrapped phase Φ_u, i.e.,

$$D_{\mathrm{vw}} = \alpha\frac{\Phi_u}{2\pi} \tag{3}$$

where α is a coefficient containing the geometrical constraints (in the case of ERS satellites $\alpha = 28$ mm). The absolute value of the displacement along the movement direction of the glacier D_m is

$$D_m = \frac{D_{\mathrm{vw}}}{\overrightarrow{E}_{\mathrm{vw}}\cdot\overrightarrow{E}_m}. \tag{4}$$

Finally, the vector of the velocity field on the glacier surface is

$$\overrightarrow{V}_m = \frac{D_m}{\Delta t}\overrightarrow{E}_m \tag{5}$$

where Δt is the time interval of the InSAR pair.

The displacement field obtained between the two interferometric SAR acquisitions in the March 1996 descending pass has been converted into quasi-3-D velocity field according to this processing, using either the aerial optical 1995 DTM where it was available or the large-scale DTM. In both cases, the surface gradient has been computed after 200×200 m^2 smoothing

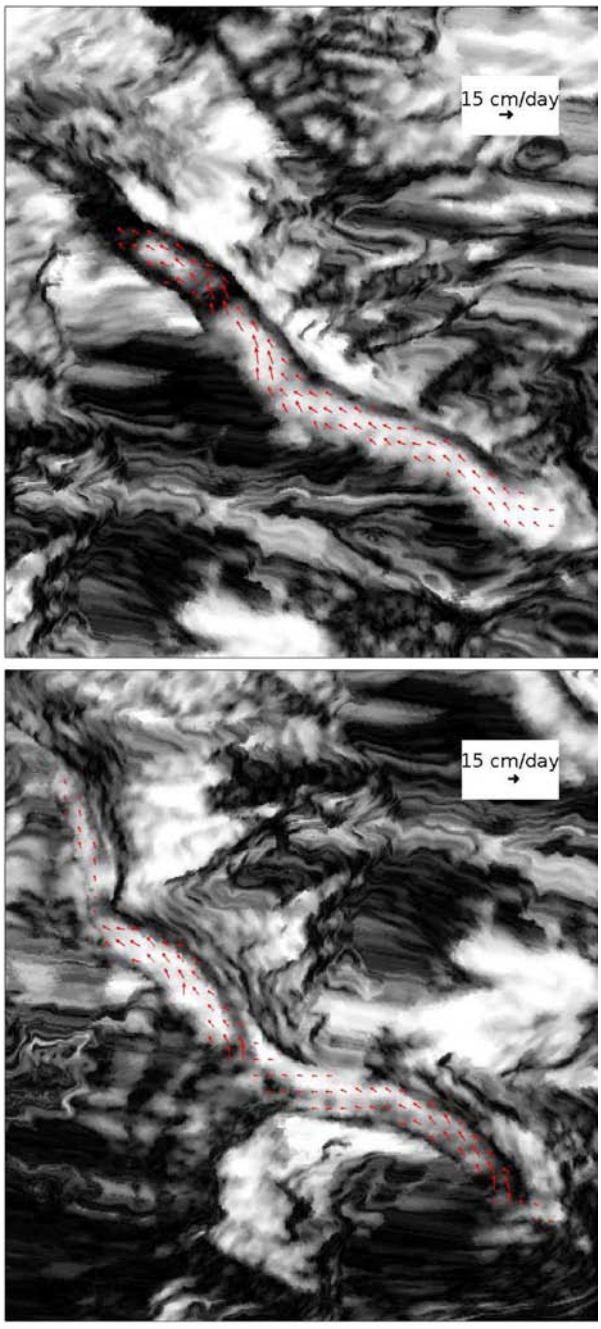


Fig. 14. Velocity field derived from the ERS-1/2 March 1996 tandem interferogram over the (a) Argentière and (b) Mer de Glace glaciers, which are overlayed on the orthorectified coherence.

in order to avoid taking microrelief into account. The result presented in Fig. 14 illustrates the flow of the Mer de Glace and Argentière glaciers. Vectors are overlayed on the orthorectified coherence, which can be interpreted as a measure of confidence.

B. Comparison With Ground Measurements

In the following, interferometric and *in situ* velocity measurements are compared. Three velocity profiles are extracted from the quasi-3-D velocity field described in the previous section from the ERS-1/2 March 1996 tandem interferogram. They are compared to the annual mean velocity derived from the annual displacement of ablation stakes between 1995 and 1996 over the Argentière and Mer de Glace/Leschaux glaciers. Fig. 15 illustrates the three profiles and associated uncertainty computed, as described in Section V-C. Along the Argentière longitudinal profile [Fig. 15(b)], the InSAR result reveals the velocity evolution: an increasing speed in the accumulation area up to the first crevasse field. The first point of ground measurements (the highest one) has been used to set the phase-unwrapping unknown offset. The InSAR profile keeps close to the following points.

On the Mer de Glace/Leschaux glacier [Fig. 15(b)], the velocity starts with low values in the upper part close to the Mallet glacier, increases quite fast in the Leschaux where the slopes are very steep, and decreases before the junction point with the Mer de Glace. The low velocity observed in this area is probably due to the weak slope and the fluxes, which are too small upstream to sustain a high velocity. Below the confluence, the speed observed on the Mer de Glace is higher than that of the lower part of the Leschaux glacier. Then, it decreases again on the Mer de Glace glacier tongue. The global profile corresponds to the known behavior of these glaciers and to the published results [36], [54].

On the Mer de Glace longitudinal profile, a strong artifact can be observed at the same location as strong slope changes (about 9000 m from the beginning of the profile). This artifact is due to the conversion of the LOS velocity into 3-D velocity. When the flow direction vector becomes almost perpendicular to the LOS direction, the denominator in (4) becomes close to zero. In this case, the LOS velocity should also be close to zero, but the conversion into 3-D velocity is numerically unstable. This configuration occurs for instance if the slope is oriented toward the radar (this corresponds to the foldover constraint and can be avoided by the use of visibility masks) or when the flow direction is parallel to the azimuth direction (the sensor displacement). In the lower part of the Mer de Glace, the tongue is narrow, and the main slope direction becomes closer to the azimuth direction, which makes the 3-D conversion more sensitive to such artifacts.

C. Uncertainty Assessment

A complete performance assessment of the InSAR velocity measurements is rather difficult because of the complex processing chain and the lack of ground truth (only the one-year displacement of a few ablation stakes between the summers of 1995 and 1996 is available). The effect of the different sources of uncertainty is strongly dependent on the available data, the processing strategy, and the characteristics of the glacier [31]. For the results obtained on the studied glacier, two different sources should be distinguished.

1) Uncertainty linked to the data and their processing. In this experiment, the three information sources are the interferometric pair, the DTM, and the *in situ* measurements used to set the phase-unwrapping offset.
2) Uncertainty linked to the hypotheses used to replace the missing information: in this case, the SPF and the maximum downhill slope assumptions.

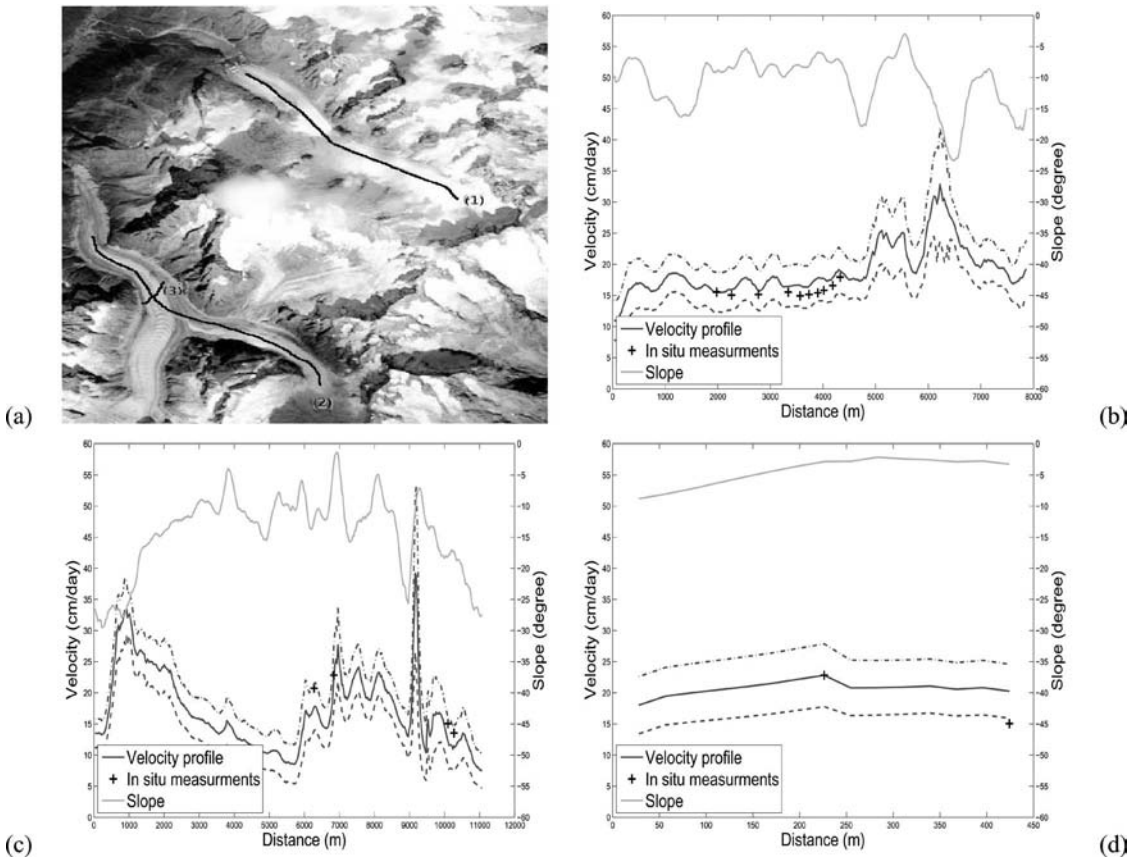


Fig. 15. ERS-1/2 March 10–11, 1996 velocity profiles. (a) SPOT image and profile location. (b) Longitudinal velocity profile on the Argentière glacier [curve 1 in (a)]. (c) Longitudinal velocity profile on the Leschaux/Mer de Glace glacier [curve 2 in (a)]. (d) Transversal velocity profile on the Mer de Glace glacier [curve 3 in (a)].

1) Data and Processing Uncertainty: The D-InSAR phase measure is affected by three different kinds of uncertainty.

1) The first one comes from the speckle noise, which affects the interferograms, especially in low-coherence areas, and requires appropriate filtering to preserve the small size features of Alpine glaciers. This kind of uncertainty affects each point with random values described by a standard deviation, which can be approximated by the Cramer–Rao lower bound [55], i.e.,

$$\sigma_\phi = \sqrt{\left\langle \left(\hat{\phi} - \langle\hat{\phi}\rangle\right)^2 \right\rangle} = \frac{1}{\sqrt{2M}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}$$

where γ is the coherence level and M is the number of independent looks averaged to obtain the phase estimate $\hat{\phi}$.

2) The second kind of uncertainty is the presence of fringes due to atmospheric perturbations, remaining orbital or topographic fringes, or hazardous phenomena, which are sometimes encountered in ERS interferograms [24]. Regarding atmospheric perturbations, the small scale of Alpine glaciers and the low winter temperatures should prevent large effect as confirmed by the comparison of different pairs from the same season. Regarding orbital and topographical fringes, this experiment has shown that the use of an accurate DTM and the available precise orbits is sufficient to obtain results that are free of the remaining fringes at the scale of the studied glaciers, even with large baselines. The strong surrounding topography of the Alpine glaciers and the availability of accurate DTMs from airborne photographs help to obtain accurate DTM-SAR registration and fringe removal.

3) The last kind of uncertainty comes from the phase-unwrapping step. Least squares unwrapping errors can be estimated by visual assessment of the remaining fringes. The unknown offset can be obtained by using a single-point *in situ* measurement for a whole connex part of a glacier. The precision depends on how this point is measured (by means of differential GPS, etc.) and how it is temporally related to the SAR measurement (same day/month/year, etc.). The resulting error is the same constant on the whole LOS velocity field.

For the results obtained with the March 10–11, 1996, ERS interferogram, the phase correction and unwrapping error is less than π (half a fringe), and the number of looks is approximately $M \simeq 25$ after filtering. Accordingly, the uncertainty that affects the final results can be obtained through the following:

1) computing the LOS uncertainty by adding $\pm\pi/2$ and $\pm\sigma_\phi$ according to the coherence level;
2) applying to this LOS uncertainty the same slope-dependent correction as applied to the LOS velocity (4), which brings the final uncertainty to infinity when the main slope direction is perpendicular to the LOS.

The resulting uncertainty is illustrated on the velocity profiles (Fig. 15) and with the corresponding error bar in Fig. 16, which

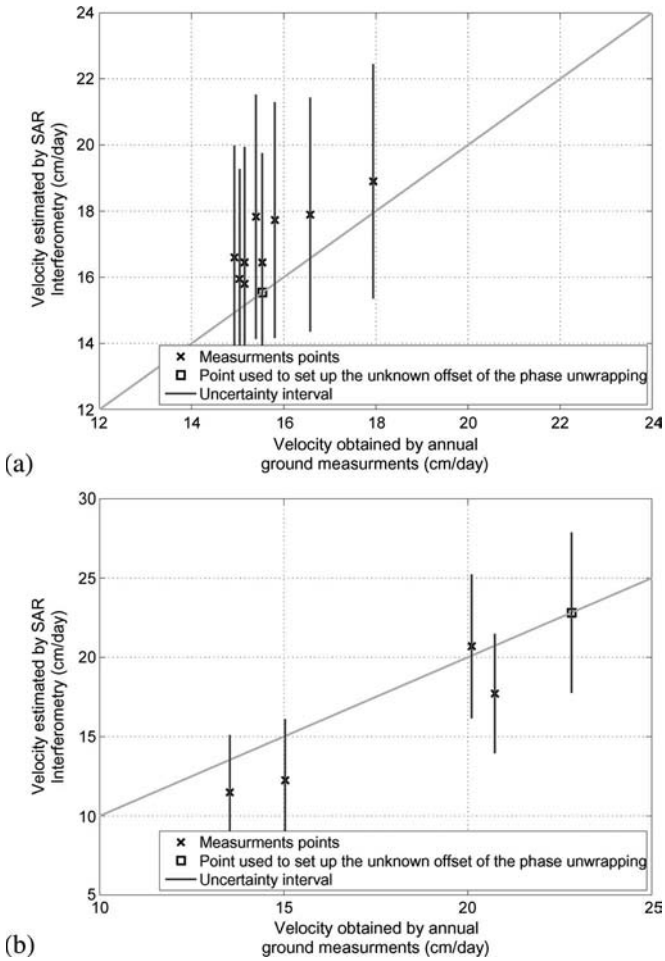


Fig. 16. Comparison between the velocity obtained by SAR interferometry during March 10–11, 1996 and the corresponding annual (August 1995–August 1996) *in situ* measurement on the (a) Argentière and (b) Mer de Glace glaciers. The rectangle points are those used to set up the phase-unwrapping unknown offsets. The vertical error bars show the D-InSAR velocity uncertainty due to the phase noise, phase corrections, and unwrapping errors, with backprojection in the main slope direction.

presents the InSAR measurement versus the *in situ* one-year measurement. This comparison does not take the offset error into account. This would yield a translation of the whole set of points. The distance to the diagonal illustrates the agreement of the dense D-InSAR velocity field with the set of *in situ* measurements.

2) Hypothesis Uncertainty: The hypotheses used to convert InSAR LOS displacement into 3-D velocities is a different source of error, which mainly depends on the studied glaciers and the available complementary information. In this experiment, since only descending measurements are available, the assumptions of SPF and maximum slope direction are used. Uncertainty comes from the slope estimation and the deviation from the hypotheses. Regarding the DTM slope information, a large smoothing (low-pass filter) has to be applied to obtain the main slope direction. This smoothing is large enough to consider that the DTM noise does not affect the slope estimate. The misregistration effect is difficult to assess since it is strongly dependent on the software used for the orthorectification (ROI-PAC from JPL in our case) and the topography itself since it creates the features that are necessary for the registration

TABLE III
IN SITU ONE-YEAR DISPLACEMENT AND LOCAL ABLATION OF TWO TRANSVERSE PROFILES. COMPARISON OF *IN SITU* AND DTM DERIVED FLOW DIRECTIONS

Glacier	Altitude	No. stakes	Horizontal disp.	Vertical disp.	Ablation	Flow direction error	
						Mean	RMS
Argentière	2700 m	11	56.6 m	-5.0 m	-0.9 m	8.9°	17.0°
Mer de Glace	1900 m	4	82.4 m	-8.9 m	-6.7 m	8.4°	30.7°

in the simulated intensity image. From this experiment, it seems that misregistration does not go over 100 m. Since a larger smoothing (200×200 m^2 averaging) has been applied to obtain the main slope and a mask has been used to avoid introducing a glacier border in the smoothing, misregistration should not strongly affect the slope estimate.

The uncertainty due to the SPF assumption is usually small for the fast moving glaciers with strong topography. It mostly affects the vertical component of the velocity, whereas the estimates of the horizontal component should remain relatively unaffected by deviations from the SPF [24]. Errors depend on the submergence/emergence velocity compared to the vertical component of the velocity due to the SPF. For the studied glaciers, it is possible to compare the local mass balance with the one-year displacement of ablation stakes on transverse profiles (cf. Table III). On the Argentière and Mer de Glace glaciers, the ablation represents 20% up to 75% of the vertical displacement, depending on the local altitude. Accordingly, the error due to the SPF assumption is not negligible on the vertical component of the velocity. However, in this experiment, the SPF vertical error should be smaller since the InSAR measurements are performed in winter.

A sliding component of the velocity might also affect the assumption that the velocity is in the direction of maximum downward slopes. However, the studied glaciers are quite narrow and long. Even without knowing the basal topography, one can assume that if there is a sliding component (probably small in winter), it will be in the main direction of the valley, which is given by the surrounding mountains and is not very different from the main slope orientation. This assumption has been confirmed by comparing the horizontal direction derived from the DTM with the displacement of ablation stakes. Results reported in Table III show quite good agreement between the DTM directions and *in situ* measurements on the two glaciers.

VI. CONCLUSION AND PERSPECTIVE

In this paper, the results presented on the Mont-Blanc temperate glaciers show the benefits of using both optical and SAR remote sensing data to obtain geophysical measurements on the glacier surfaces. A DTM has been computed using photogrammetric techniques. This high-resolution DTM has been semiautomatically generated, allowing complex and detailed surfaces to be accurately modeled and to generate orthophotos and 3-D representations. SAR interferograms have been computed from the ERS tandem and three-day pairs. SAR processing issues and difficulties due to the geophysical context have been investigated. Displacement fringes have been obtained over several Alpine glaciers in four winter one-day interferograms. The displacement field measured on the radar LOS has been converted into a quasi-3-D velocity field using the DTM under the assumption of surface-parallel motion in the

direction of the maximum downward slope. A mean velocity provided by *in situ* measurement at one point has been used to set the unknown offset of the field due to the lack of visibility of the motionless part of the glacier. In this case, the InSAR measurement allows to extend ground-point measurements and provides dense velocity fields, which are consistent with the rest of the available *in situ* measurements.

These results show the feasibility of using SAR D-InSAR in winter over temperate glaciers and combining this technique with photogrammetry for modeling and monitoring the glacier activity. The spatial resolution of glacier surface velocity fields is increased compared to the sparse terrestrial measurements. Depending on the satellite repeat-pass periodicity, SAR interferometry allows measurements of this field along the cold season. A new SAR observation potential should be investigated with the future TerraSAR-X satellite with a 11-day repeat cycle.

Furthermore, with the higher resolution of recently launched or future SAR satellites (RADARSAT-2, TerraSAR-X, ALOS, and Cosmo-SkyMed), high-quality DTMs become fundamental for D-InSAR applications at different stages in the processing chain: SLC image synthesis, data georeferencing, and computation of the displacement local direction and orientation when a single LOS is available. The next steps in the project described in this paper will focus on the fusion of the obtained measurements and extracted features (lakes, crevasses, ice falls, etc.) to derive higher level information such as hazard factors and risk maps.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the ESA for the ERS images provided through Cathegory 1 Projects 1088 and 3525, B. Legresy for the SPOT images, Régie de Gestion des Pays de Savoie (RGD-73/74) for the access to the RIS 73-74 database, and the Laboratory of Glaciology and Geophysics of Environment/Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble for the *in situ* measurements. They would also like to thank the anonymous reviewers for providing very precise comments and useful advice on this paper.

REFERENCES

[1] IPCC, *Climate change 2001: The scientific basis*, 2001. [Online]. Available: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1

[2] M. B. Dyurgerov, "Mountain and subpolar glaciers show an increase in sensitivity to climate warming and intensification of the water cycle," *J. Hydrol.*, vol. 282, no. 1–4, pp. 164–176, 2003.

[3] S. Richardson and J. Reynolds, "An overview of glacial hazards in the Hymalayas," *Quat. Int.*, vol. 65/66, pp. 31–47, Apr. 2000.

[4] A. Kääb, C. Huggel, L. Fischer, S. Guex, F. Paul, I. Roer, N. Salzmann, S. Schlaefli, K. Schmutz, D. Schneider, T. Strozzi, and Y. Weidmann, "Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: An overview," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 5, no. 4, pp. 527–554, Jul. 2005.

[5] R. J. Braithwaite, "Glacier mass balance: The first 50 years of international monitoring," *Prog. Phys. Geogr.*, vol. 26, no. 1, pp. 76–95, Mar. 2002.

[6] A. Kääb, "Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalayas," *Remote Sens. Environ.*, vol. 94, no. 4, pp. 463–474, Feb. 2005.

[7] J. Kargel, M. Abrams, M. Bishop, A. Bush, G. Hamilton, H. Jiskoot, A. Kääb, H. Kieffer, E. Lee, F. Paul, F. Rau, B. Raup, J. Shroder, D. Soltesz, D. Stainforth, L. Stearns, and R. Wessels, "Multispectral imaging contributions to global land ice measurements from space," *Remote Sens. Environ.*, vol. 99, no. 1/2, pp. 187–219, Nov. 2005.

[8] Régie de gestion des données des pays de savoie. [Online]. Available: http://www.rgd73-74.fr

[9] A. Kääb, "Monitoring high mountain terrain deformation from repeated air- and spaceborne optical data: Examples using digital aerial imagery and ASTER data," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 57, no. 1/2, pp. 39–52, Nov. 2002.

[10] J. Fox and A. M. Nuttall, "Photogrammetry as a research tool for glaciology," *Photogramm. Rec.*, vol. 15, no. 89, pp. 725–737, 1997.

[11] L. M. Andreassen, H. Elvehoy, and B. Kjollmoen, "Using aerial photography to study glacier changes in Norway," *Ann. Glaciol.*, vol. 34, no. 1, pp. 343–348, Jan. 2002.

[12] A. K. Gabriel, R. M. Goldstein, and H. A. Zebker, "Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry," *J. Geophys. Res.*, vol. 94, no. B7, pp. 9183–9191, 1989.

[13] D. Massonnet and T. Rabaute, "Radar interferometry, limits and potential," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 31, no. 2, pp. 455–464, Mar. 1993.

[14] K. E. Mattar, P. W. Vachon, D. Geudtner, A. L. Gray, I. G. Cumming, and M. Brugman, "Validation of alpine glacier velocity measurements using ERS tandem-mission SAR data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 3, pp. 974–984, May 1998.

[15] B. T. Rabus and D. R. Fatland, "Comparison of SAR-interferometric and surveyed velocities on a mountain glacier: Black rapids glacier," *J. Glaciol.*, vol. 152, no. 46, pp. 119–128, 2000.

[16] R. R. Forster, K. C. Jezek, L. Koenig, and E. Deeb, "Measurement of glacier geophysical properties from InSAR wrapped phase," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 41, no. 11, pp. 2595–2604, Nov. 2003.

[17] D. Massonnet and K. Feigl, "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface," *Rev. Geophys.*, vol. 36, no. 4, pp. 441–500, Nov. 1998.

[18] A. I. Sharov, K. Gutjahr, F. Meyer, and M. Schardt, "Methodical alternatives to the glacier motion measurement from differential SAR interferometry," in *Proc. Photogramm. Comput. Vis., ISPRS Tech. Commission III Symp.*, Graz, Austria, 2002, vol. 34, pt. 3A/B, pp. A-324–A-329.

[19] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, no. 1, pp. 8–20, Jan. 2001.

[20] R. Michel, J. P. Avouac, and J. Taboury, "Measuring ground displacements from SAR amplitude images: Application to the Landers earthquake," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 26, no. 7, pp. 875–878, Apr. 1999.

[21] R. Michel and E. Rignot, "Flow of glaciar Moreno, Argentina, from repeat-pass shuttle imaging radar images: A comparison of the phase correlation method with radar interferometry," *J. Glaciol.*, vol. 45, no. 149, pp. 93–100, 1999.

[22] A. L. Gray, N. Short, K. E. Matter, and K. C. Jezek, "Velocities and ice flux of the Filchner ice shelf and its tributaries determined from speckle tracking interferometry," *Can. J. Remote Sens.*, vol. 27, no. 3, pp. 193–206, 2001.

[23] T. Strozzi, A. Luckman, T. Murray, U. Wegmuller, and C. L. Werner, "Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, no. 11, pp. 2384–2391, Nov. 2002.

[24] I. Joughin, R. Kwok, and M. A. Fahnestock, "Interferometric estimation of three-dimensional ice-flow using ascending and descending passes," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 1, pp. 25–37, Jan. 1998.

[25] N. Reeh, J. J. Mohr, S. N. Madsen, H. Oerter, and N. S. Gundestrup, "Three-dimensional surface velocities of Storstrommen glacier, Greenland, derived from radar interferometry and ice-sounding radar measurements," *J. Glaciol.*, vol. 49, no. 165, pp. 201–209, 2003.

[26] E. Rignot, R. Forster, and B. Isacks, "Radar interferometric observations of Glacier San Rafael, Chile," *J. Glaciol.*, vol. 42, no. 141, pp. 279–291, 1996.

[27] T. Strozzi, G. H. Gudmundsson, and U. Wegmüller, "Estimation of the surface displacement of Swiss alpine glaciers using satellite radar interferometry," in *Proc. 3rd Workshop Remote Sens. Land, Ice and Snow*, Bern, Switzerland, Mar. 11–13, 2002.

[28] P. Sterzai, F. Mancini, C. Corazzato, C. D. Agata, and G. Diolaiuti, "Contribution of SAR interferometry (InSAR) to the study of alpine glaciers. The example of Forni glacier (central Alps, Italy): Preliminary results," in *Proc. EGS—AGU—EUG Joint Assembly*, Nice, France, Apr. 6–11, 2003.

[29] C. Mätzler and U. Wegmüller, "Dielectric properties of fresh-water ice at microwave frequencies," *J. Phys. D, Appl. Phys.*, vol. 20, no. 12, pp. 1623–1630, Dec. 1987.

[30] N. Reeh, S. N. Madsen, and J. J. Mohr, "Combining SAR interferometry and the equation of continuity to estimate the three-dimensional

glacier surface-velocity vector," *J. Glaciol.*, vol. 45, no. 151, pp. 533–538, 1999.
[31] J. J. Mohr, N. Reeh, and S. N. Madsen, "Accuracy of three-dimensional glacier surface velocities derived from radar interferometry and ice-sounding radar measurements," *J. Glaciol.*, vol. 49, no. 165, pp. 210–222, 2003.
[32] L. Reynaud, "Etude de la dynamique des séracs du Géant (Massif du Mont Blanc)," Ph.D. dissertation, Univ. Sci. Méd. Grenoble, Grenoble, France, 1973.
[33] G. Bocquet and J. C. Ricq, "Measurement of ice movement in subglacial cavities: A new cavitometer beneath the Glacier d'Argentière (Mt-Blanc, France)," *J. Glaciol.*, vol. 18, no. 78, pp. 137–142, 1977.
[34] C. Vincent, "Influence of climate change over the 20th century on four French glacier mass balances," *J. Geophys. Res.*, vol. 107, no. D19, pp. 43–75, Oct. 2002.
[35] R. Burnet and R. Mura, "Surveillance des glaciers par photographie aérienne," *B.T.I.*, pp. 243–248, 1985. 399/401(B2-Geog.-25).
[36] E. Berthier, H. Vadon, D. Baratoux, Y. Arnaud, C. Vincent, K.L. Feigl, F. Rémy, and B. Legrésy, "Mountain glacier surface motion derived from satellite optical imagery," *Remote Sens. Environ.*, vol. 95, no. 1, pp. 14–28, 2005.
[37] E. Berthier, Y. Arnaud, D. Baratoux, C. Vincent, and F. Rémy, "Recent rapid thinning of the 'Mer de Glace' glacier derived from satellite optical images," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 31, no. 17, L17401, 2004.
[38] G. Vasile, E. Trouvé, J.-S. Lee, and V. Buzuloiu, "Intensity-driven-adaptive-neighborhood technique for polarimetric and interferometric sar parameters estimation," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 44, no. 6, pp. 1609–1621, Jun. 2006.
[39] K. Kraus, *Photogrammetrie*, 7. Auflage ed, vol. Band 1. Berlin, Germany: Walter de Gruyter Verlag, 2004.
[40] K. Papathanassiou, I. Hajnsek, H. Rott, and T. Nagler, "Polarimetric sar interferometry for snow cover parameter estimation," in *Proc. POLinSAR Workshop*, 2005, CD-ROM.
[41] D. Massonnet, "Producing ground deformation maps automatically: The DIAPASON concept," in *Proc. IGARSS*, Singapore, 1997, vol. 3, pp. 1338–1340.
[42] H. A. Zebker and R. M. Goldstein, "Topographic mapping from interferometric SAR observations," *J. Geophys. Res.*, vol. 91, no. B5, pp. 4993–4999, Apr. 1986.
[43] P. A. Rosen, S. Hensley, I. R. Joughin, F. K. Li, S. N. Madsen, E. Rodriguez, and R. M. Goldstein, "Synthetic aperture radar interferometry," *Proc. IEEE*, vol. 88, no. 3, pp. 333–382, Mar. 2000.
[44] P. A. Rosen, S. Hensley, G. Peltzer, and M. Simons, "Updated repeat orbit interferometry package released," *Earth Observation Syst. Trans., Amer. Geophys. Union*, vol. 85, no. 5, p. 47, 2004. Electronic Supplement. [Online]. Available: http://www.agu.org
[45] J.-M. Nicolas, F. Tupin, G. Vasile, and E. Trouvé, "SAR processing in the temporal domain. Application to direct interferogram generation and mountain glacier monitoring," in *Proc. Adv. SAR Workshop, Can. Space Agency*, St. Hubert, QC, Canada, Nov. 15–17, 2005, CD-ROM.
[46] R. Hanssen and R. Bamler, "Evaluation of interpolation kernels for SAR interferometry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 37, no. 1, pp. 318–321, Jan. 1999.
[47] A. Fischer, H. Rott, and H. Björnsson, "Observation of recent surges of Vatnajkull, Iceland, by means of ERS SAR interferometry," *Ann. Glaciol.*, vol. 37, no. 1, pp. 69–76, Jun. 2003.
[48] G. Vasile, E. Trouvé, M. Ciuc, and V. Buzuloiu, "General adaptive neighborhood technique for improving SAR interferometric coherence estimation," *J. Opt. Soc. Amer. A, Opt. Image Sci.*, vol. 21, no. 8, pp. 1455–1464, Aug. 2004.
[49] H. Tarayre and D. Massonnet, "Atmospheric propagation heterogeneities revealed by ERS-1 interferometry," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 23, no. 9, pp. 989–992, 1996.
[50] D. Hantz, "Dynamique et hydrologie du glacier d'Argère," Ph.D. dissertation, CNRS, Lab. Glaciol. Géophys. l'Environ., Saint Martin d'He`res, France, Apr. 1981.
[51] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and C. L. Werner, "Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping," *Radio Sci.*, vol. 23, no. 4, pp. 713–720, Jul. 1988.
[52] D. C. Ghiglia and L. A. Romero, "Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods," *J. Opt. Soc. Amer. A, Opt. Image Sci.*, vol. 11, no. 1, pp. 107–117, Jan. 1994.
[53] E. Trouvé, J. M. Nicolas, and H. Maître, "Improving phase unwrapping techniques by the use of local frequency," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 6, pp. 1963–1972, Nov. 1998.
[54] L. Lliboutry and L. Reynaud, "'Global dynamics' of a temperate valley glacier, Mer de Glace, and past velocities deduced from Forbes'bands," *J. Glaciol.*, vol. 27, no. 96, pp. 207–226, 1981.
[55] E. Rodriguez and J. M. Martin, "Theory and design of interferometric synthetic aperture radars," *Proc. Inst. Electr. Eng.—F*, vol. 139, no. 2, pp. 147–159, Apr. 1992.

Emmanuel Trouvé (M'99) received the Engineer degree in electrical engineering from the Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées, Paris, France, in 1990 and the Ph.D. degree in signal and image processing from the Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, in 1996.

From 1996 to 1998, he was with Thomson Marconi Sonar in underwater acoustic and signal processing. Since September 1998, he has been an Associate Professor of signal processing and computer vision with the Université de Savoie, Polytech'Savoie, Annecy, France, and has been working at the Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance. He is also currently with the Laboratoire des Images et des Signaux, Institut National Polytechnique de Grenoble, Centre National de la Recherche Scientifique, Saint-Martin-d'Hères, France. He coordinates the French multilaboratory MEGATOR project (Monitoring the Evolution of Alpine Glaciers by Optical and Radar Remote Sensing). His research interests include SAR image processing and data fusion in remote sensing.

Dr. Trouvé is a member of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Data Fusion Technical Committee.

Gabriel Vasile (S'04–M'04) received the Engineer degree in electrical engineering and computer science and the M.S. degree in image, shapes, and artificial intelligence from the University Politehnica of Bucharest, Bucharest, Romania, in 2003 and 2004, respectively. He is currently working toward the Ph.D. degree at the University Politehnica of Bucharest and the University of Savoie, Polytech'Savoie, Annecy, France. Since 2004, he has been working on his Ph.D. dissertation on SAR multivariate signal processing with joint supervision from both the University Politehnica of Bucharest and the University of Savoie, Polytech'Savoie, in the framework of the French multilaboratory MEGATOR Project.

From 2001 to 2003, he was an Engineering Assistant with the Center of Microsystems and Microstructures for Environmental Monitoring and Biomedical Applications, National Institute for Research and Development in Micro and Nanotechnologies, Romania. He is currently with the Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance, Université de Savoie and also with the Laboratoire des Images et des Signaux, Institut National Polytechnique de Grenoble, Centre National de la Recherche Scientifique, Saint-Martin-d'Hères, France. His research interests are signal and image processing, polarimetric and interferometric SAR applications, and glacier monitoring.

Michel Gay received the Engineer degree in electrical engineering from the Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier, Montpellier, France, in 1987 and the Ph.D. degree in physics from the University Joseph Fourier, Grenoble, France, in 1999.

From 1988 to 2003, he was with Cemagref Grenoble, Grenoble, where he worked on electrical engineering for environmental applications. Since 2003, he has been a Research Engineer with the Laboratoire des Images et des Signaux, Institut National Polytechnique de Grenoble, Centre National de la Recherche Scientifique, Saint-Martin-d'Hères, France. His research interests include remote sensing, image processing, and survey of Alpine glaciers.

Lionel Bombrun (S'06) received the Engineer degree in electrical engineering and the M.S. degree in signal, image, speech, and telecommunications from the Grenoble National Polytechnic Institute (INPG), Grenoble, France, in 2005. He is currently working toward the Ph.D. degree at the Grenoble Image Parole Signal et Automatique Laboratory, INPG, Centre National de la Recherche Scientifique, Saint-Martin-d'Hères, France. Since 2005, he has been working on his Ph.D. dissertation on the development of SAR signal processing at the Laboratoire des Images et des Signaux, INPG, Centre National de la Recherche Scientifique, in the framework of the French multilaboratory MEGATOR Project.

His research interests include SAR polarimetry and interferometry, and glacier monitoring.

Pierre Grussenmeyer received the Engineer degree in geodetic surveying and topography from Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg (ENSAIS) [currently Institut National des Sciences Appliquees (INSA) de Strasbourg (a Graduate School of Science and Technology)], Strasbourg, France, in 1984 and the Ph.D. degree in photogrammetry from the University of Strasbourg I (in relationship with the Institut Geographique National, Paris, France), Strasbourg, in 1994.

From 1988 to 2004, he was an Associate Professor with ENSAIS. Since 2004, he has been a Professor with INSA Strasbourg and the Head of the Equipe Photogrammétrie et Géomatique, Modèles et Simulations pour l'Architecture, l'Urbanisme et le Paysage-Photogrammetrie Architechturale et Geomatique UMR 694. His current research interests include close-range photogrammetry, architectural photogrammetry and lasergrammetry, visual and virtual models, and cultural heritage documentation.

Prof. Grussenmeyer has been a member of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing since 1996 and the Treasurer and a Member of the board of the International Committee for Architectural Photogrammetry since 1999. He is also a Vice President of the Association Française de Topographie.

Tania Landes received the Engineer degree in geodetic surveying and topography in 1995 from ENSAIS [currently Institut National des Sciences Appliquees (INSA) de Strasbourg (Graduate School of Science and Technology)], Strasbourg, France, and the Ph.D. degree in radar remote sensing from the University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, in 2000.

Since 2006, she has been an Associate Professor with ENSAIS. She is currently with the Equipe Photogrammétrie et Géomatique, Modèles et Simulations pour l'Architecture, l'Urbanisme et le Paysage-Photogrammetrie Architechturale et Geomatique UMR 694, INSA. Her current research interests include remote sensing and lasergrammetry.

Jean-Marie Nicolas received the M.S. degree from the Ecole Normale Superieure de Saint Cloud, Lyon, France, in 1979 and the Ph.D. degree in physics from the University of Paris XI, Paris, France, in 1982.

He was a Research Scientist with the Laboratoire d'Electronique Philips in medical imaging and was then with Thomson CSF, working in signal and image processing. He is currently with the Département TSI, Ecole Nationale Superieure des Telecommunications, Paris, as a Professor. His research interests include radar imaging.

Philippe Bolon (M'94) was born in 1956. He received the Engineer degree in electrical engineering and the Ph.D. degree in signal processing from the National Polytechnic Institute of Grenoble (INPG), Grenoble, France, in 1978 and 1981, respectively.

From 1984 to 1994, he was an Associate Professor with the Université de Savoie, Polytech'Savoie, Annecy, France. He has been Professor with the Université de Savoie, Polytech'Savoie since September 1994 and the Head of the Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance since 2002. Since 1996, he has been a Member of the steering committee of the French national research group in Signal and Image Processing (GdR ISIS). His current research interests include information fusion, nonlinear image processing, image segmentation, and image analysis.

Dr. Bolon is a member of the European Association for Signal Processing. He was the Chairman or a Cochairman of the Scientific Committee of the International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV) in 1997, 1998, 1999, 2001, and 2003.

Ivan Petillot received the Engineer degree in electrical engineering and computer sciences and the M.S. degree in image, information, and hypermedia from the Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, Toulouse, France, in 2005. He is currently working toward the Ph.D. degree at the Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance, Université de Savoie, Polytech'Savoie, Annecy, France. Since 2005, he has been working on his Ph.D. dissertation on the information fusion systems for remote sensing at the University of Savoie, in the framework of the MEGATOR Project.

His research interests include information fusion, risk assessment, and glacier monitoring.

Andreea Julea received the Engineer degree in electrical engineering and computer science and the M.S. degree in image processing and artificial intelligence from the University Politehnica of Bucharest, Bucharest, Romania, in 2005 and 2006, respectively. She is currently working toward the Ph.D. degree at the Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance, Université de Savoie, Polytech'Savoie, Annecy, France. Since 2006, she has been working on her Ph.D. dissertation on data mining in remote sensing applications with joint supervision from the University Politehnica of Bucharest and University of Savoie.

Since 2006, she has been with the Space Sciences Institute, Bucharest. Her research interests are data mining, image processing, and remote sensing.

Lionel Valet received the M.S. degree from the Ecole Superieur d'Ingenieur d'Annecy, University of Savoie, Annecy, France, in 1998 and the Ph.D. degree in signal and image processing from the University of Savoie, in 2001.

He is currently an Associate Professor in computer science with the Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance, Université de Savoie, Polytech'Savoie. His research interests include information fusion system conception with applications to image analysis.

Jocelyn Chanussot (M'04–SM'04) received the Engineer degree in electrical engineering from the Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, France, in 1995 and the Ph.D. degree from Savoie University, Annecy, France, in 1998.

In 1999, he was with the Geography Imagery Perception Laboratory for the Delegation Generale de l'Armement (French National Defence Department). Since 1999, he has been an Associate Professor of signal and image processing with INPG, Centre National de la Recherche Scientifique, Saint-Martin-d'Hères, France, and has been working at the Laboratoire des Images et des Signaux. His research interests include statistical modeling, multicomponent image processing, nonlinear filtering, remote sensing, and data fusion. He is an Associate Editor for *Pattern Recognition* (2006–2008).

Dr. Chanussot is an Associate Editor of the IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS (since 2005). He is a Cochair of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Data Fusion Technical Committee (2005–2007) and a member of the Machine Learning for Signal Processing Technical Committee of the IEEE Signal Processing Society (2006–2008). He serves as a regular reviewer for various conferences (e.g., IEEE ICASSP, IEEE ICIP, ACIVS).

Mathieu Koehl received the Engineer degree in geodetic surveying and topography from ENSAIS [currently Institut National des Sciences Appliquees (INSA) de Strasbourg (a Graduate School of Science and Technology)], Strasbourg , France, in 1990 and the Ph.D. degree in geomatics from the University of Strasbourg I, Strasbourg (in relationship with the Technische Universitat Vienna, Vienna, Austria), in 1999.

Since 1994, he has been an Associate Professor with the Equipe Photogrammétrie et Géomatique, Modèles et Simulations pour l'Architecture, l'Urbanisme et le Paysage-Photogrammetrie Architechturale et Geomatique UMR 694, INSA de Strasbourg. His current research interests include 3-D modeling, 3-D GIS, and WebGIS.

Résumé

L'imagerie radar à synthèse d'ouverture (SAR) est une source importante d'information pour le suivi d'objets géophysiques terrestres par télédétection. Nous présentons une première partie méthodologique dédiée au filtrage du speckle des données POL/In/POL-InSAR multivariées et son impact sur l'estimation de paramètres. L'objectif du filtrage de speckle est de restaurer l'information spatiale et radiométrique de la scène. Trois directions principales sont étudiées pour gagner en stationnarité/ergodicité : des voisinages adaptatifs vis-à-vis du signal, un estimateur adaptatif ou non (moyenne complexe multi-vue, LLMMSE) et la compensation de la composante déterministe du signal de phase interférométrique. Une nouvelle stratégie pour filtrer des images SAR multivariées est proposée: l'utilisation de voisinages adaptatifs obtenus par une technique de croissance de région multivariée. Cette méthode appelée IDAN combine toutes les informations d'intensité disponibles dans un processus de croissance de région pour assurer la validité des hypothèses de stationnarité/ergodicité. Conjointement à IDAN, une nouvelle méthode est proposée pour estimer les fréquences locales dans des interférogrammes SAR. Ces méthodes ont été testées à la fois sur des images satellitaires basse résolution provenant d'acquisitions tandem ERS et sur plusieurs jeux de données aéroportées haute résolution dans différentes bandes de fréquences et configurations polarimétriques. La seconde partie est dédiée à l'observation des glaciers alpins par télédétection SAR. Cette partie aborde le problème du traitement des données SAR multivariées sur le site test « Chamonix Mont-Blanc ». L'analyse de plusieurs interférogrammes ERS tandem acquis entre juillet 1995 et avril 1996 a permis d'obtenir les premiers champs de vitesse D-InSAR sur des glaciers des Alpes françaises et de montrer qu'il est possible de mesurer leur vitesse de surface entre octobre et avril avec un échantillonnage spatial de l'ordre de 20 m dans des interférogrammes à 1 jour en bande C. La seconde application présente une analyse POL/POL-InSAR des données SAR multi-bandes haute résolution acquises par le système aéroporté E-SAR en octobre 2006, sur les glaciers d'Argentière, du Tacul et de la Mer-de-glace. Ces premiers résultats illustrent plusieurs applications possibles de la télédétection radar polarimétrique/interférométrique pour l'observation des glaciers, telle que l'analyse des bandes de Forbes.

Mots-clé : traitement de l'information, imagerie radar à synthèse d'ouverture, interférométrie, polarimétrie, télédétection, glaciers alpins

Abstract

In this PhD thesis, two main axes have been investigated. The first methodological part of this thesis proposes a particular focus on speckle filtering of POL-InSAR multivariate data and its implication on parameter estimation. The objective of speckle filtering is to retrieve the radiometric and spatial scene information from the observed speckled SAR measurement. Three main directions for gaining in stationarity/ergodicity have been investigated: signal adaptive neighbourhoods, non-adaptive/adaptive estimators and compensation of deterministic components in the interferometric phase signal. This thesis proposes a novel strategy for filtering multivariate SAR images, namely the use of adaptive neighbourhoods obtained by multivariate region growing techniques. According to this algorithm, named IDAN, all the available intensity images of the polarimetric or/and interferometric components are fused in the region growing process to ensure the validity of the stationarity/ergodicity assumptions. A novel method for estimating local frequencies in SAR interferograms is proposed. These algorithms have been tested both on several high resolution airborne data sets, and on low resolution spaceborne tandem ERS SAR images. The second part of this thesis is dedicated to Alpine glacier monitoring by SAR remote sensing. This part tackles the problem of processing multivariate SAR data over the Chamonix Mont-Blanc test site. The first application presented consists in measuring the 3D displacement field of an Alpine glacier by D-InSAR. The analysis of several tandem ERS interferograms between July 1995 and April 1996 shows that it is possible to measure temperate glacier surface velocity fields from October to April in 1-day C-band interferograms with approximately 20-meter ground sampling. The second application is represented by the first POL-InSAR analysis of multiband high resolution airborne SAR data acquired by the E-SAR system in October 2006.

Keywords: information processing, SAR, interferometry, polarimetry, remote sensing, Alpine glaciers