

---

# EFIDIR : extraction et fusion d'informations pour la mesure de déplacements par imagerie radar

**Emmanuel Trouvé<sup>1</sup>, Jean-Marie Nicolas<sup>2</sup>, Laurent Ferro-Famil<sup>3</sup>, Michel Gay<sup>4</sup>, Virginie Pinel<sup>5</sup>, Marie-Pierre Doin<sup>6</sup>, Nicolas Méger<sup>1</sup>, Cécile Lasserre<sup>5</sup>, Gilles Mauris<sup>1</sup>, Flavien Vernier<sup>1</sup>, Renaud Fallourd<sup>1,2</sup>, Yajing Yan<sup>1,5</sup>, Olivier Harant<sup>3,4</sup>, Romain Jolivet<sup>5</sup>**

---

*RÉSUMÉ. L'imagerie radar satellitaire permet de mesurer le déplacement du sol avec une précision centimétrique, voire millimétrique à l'aide de séries d'images SAR (Synthetic Aperture Radar). Ces précisions ne peuvent être atteintes qu'en exploitant la masse de données radar disponibles ou le potentiel de satellites lancés récemment : images haute résolution (métrique) ou polarimétriques. Cet article présente les principaux résultats obtenus par le projet ANR EFIDIR (Extraction et Fusion d'Informations pour la mesure de Déplacement en Imagerie Radar, 2008-2012) qui rassemble des spécialistes de l'imagerie radar, du traitement de l'information et des géosciences. Un radar imageur de terrain a été mis au point et des méthodes de traitement spécifiques ont été développées (tomographie radar, suréchantillonnage d'images complexes...) afin d'améliorer la caractérisation de la diffusion électromagnétique et les prétraitements des données SAR. Les méthodes d'extraction d'informations de déplacement à partir de l'amplitude (texture tracking) ou de la phase (interférométrie multitemporelle) ont été approfondies et testées sur les grands déplacements de glaciers, ou de faibles déformations intersismiques. Une approche originale de fouille de données a également été développée pour extraire les motifs séquentiels fréquents et appliquée avec succès à la détection de motifs liés à la déformation du sol noyés dans des artefacts atmosphériques. Enfin une approche nouvelle de représentation des incertitudes par la théorie des possibilités a été introduite dans l'étape d'inversion qui permet de reconstruire des champs de déplacement 3D (Est, Nord, vertical) ou d'estimer les paramètres de modèles géophysiques des phénomènes à l'origine des déplacements observés en surface. Ces travaux illustrent ainsi les grandes étapes des chaînes de traitement permettant d'aller de la formation des données SAR à la modélisation géophysique.*

*ABSTRACT. Spaceborne SAR (Synthetic Aperture Radar) imagery allows ground displacement to be measured with a precision as high as centimeter or even millimeter by using series of images. This precision can be reached only by exploiting the mass of available radar data or the potential of recently launched satellites: high-resolution (metric) or polarimetric images. This article presents the main results obtained by the ANR project EFIDIR (Extraction and Fusion of Information for Displacement measurement from Radar imagery, 2008-2012) which gathers specialists of SAR images, information processing and geosciences. A ground based SAR (GB-SAR) and specific processing methods were developed (radar tomography, oversampling of complex images...) to improve the characterization of electromagnetic scattering and SAR data*

*pre-processing. The methods for extracting displacement information from the amplitude (texture tracking) or from the phase (multitemporal interferometry) have been expanded and tested on glacier large displacements or small interseismic deformations. An original data mining approach has also been developed for extracting frequent sequential patterns and successfully applied to the detection of patterns related to the ground deformation hidden by atmospheric artifacts. Finally a new approach to represent uncertainty by the possibility theory was introduced in the inversion step that can reconstruct 3D displacement fields (East, North, Up) or estimate the model parameters of geophysical phenomena at the origin of the observed surface displacements. These studies thus illustrate the major stages of processing chains from SAR data acquisition to geophysical modeling.*

*MOTS-CLÉS : images SAR, interférométrie, polarimétrie, fouille de données, géophysique.*

*KEYWORDS: SAR images, interferometry, polarimetry, data mining, geophysics.*

---

DOI:10.3166/TS.28.375-416 © 2011 Lavoisier, Paris

1. *Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC), Polytech Annecy-Chambéry, Université de Savoie, BP 80439 F-74944 Annecy-le-Vieux Cedex*

*{emmanuel.trouve, nicolas.meger, gilles.mauris, flavien.vernier, renaud.fallourd, yajing.yan}@univ-savoie.fr*

2. *Laboratoire de Traitement et Communication de l'Information (LTCI), Télécom ParisTech, 46 rue Barrault F-75013 Paris*

*jean-marie.nicolas@telecom-paristech.fr*

3. *Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes (IETR), Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, 263 avenue G. Leclerc, CS 74205 F-35042 Rennes Cedex*

*Laurent.Ferro-Famil@univ-rennes1.fr*

4. *Grenoble Images Parole Signal et Automatique (GIPSA-Lab), INP Grenoble, 961 rue de la Houille Blanche F-38402 Saint Martin d'Hères*

*{michel.gay, olivier.harant}@gipsa-lab.grenoble-inp.fr*

5. *Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) – Université Joseph Fourier, Maison des Géosciences, BP53, F-38041 Grenoble Cedex 9 – Université de Savoie, Campus Scientifique F-73376 Le Bourget du Lac Cedex*

*{cecile.lasserre, romain.jolivet}@obs.ujf-grenoble.fr; Virginie.Pinel@univ-savoie.fr*

6. *Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure, 24 rue Lhomond F-75231 Paris Cedex 05*

*doin@geologie.ens.fr*

## Extended abstract

The large and ever-increasing number of satellites dedicated to Earth observation provide us continuously and globally with a huge mass of information about our environment. Synthetic Aperture Radar (SAR) is an important class of the numerous on-board remote-sensing instruments, with its all-weather and day-night imaging capabilities. In the 90s, the first generation of civilian radar satellites (the European ERS-1, ERS-2 satellites, the Japanese JERS-1 and the Canadian RadarSAT-1) have demonstrated the potential of differential Interferometry (D-InSAR) to measure Earth displacement from repeat pass SAR time series. After 10 years with only one new satellite with a SAR sensor (ENVISAT, Europe), a second generation of spaceborne SAR sensors started to be launched in 2006-2007, with 4 Earth observation satellites operating in 3 different bands: ALOS (L band, Japan), RadarSAT-2 (C band, Canada), TerraSAR-X (X band, Germany) and the first satellite of the COSMO-SKYMED constellation (X band, Italy). These new SAR sensors offer new observation modes including higher resolution data (up to meter resolution) or fully polarimetric data which increase the potential and the reliability of different methods dedicated to Earth displacement measurement. However, the transformation of the multitemporal 2-dimensional electromagnetic ground response, stored in Terabytes of SAR data, into geophysical knowledge, namely models with a few parameters, relies on tedious processing chains: SAR processing, interferogram generation, phase unwrapping, geocoding, artefacts corrections, geophysical model inversion...

The EFIDIR project (Extraction and Fusion of Information for DIplacement measurement from Radar imagery) gathers six research laboratories to develop and experiment processing tools fitted on one hand to SAR data specificity and, on the other hand, to large time series of SAR images from which ground motion measures are extracted. The work presented in this paper illustrates several aspects of the progress made by this project, at the radar data processing level, and at the displacement measurement level.

Regarding radar data processing, the most upstream work focuses on the development of a GB-SAR (Ground Based SAR) to collect data in controlled experimental conditions. It has a dual purpose: first to develop SAR synthesis methods, particularly for three-dimensional images (tomograms), and second to improve the knowledge of the electromagnetic response of scattering media such as snow (Longepe *et al.*, 2009). This work is presented in Section 2 and shows the first results of a SAR tomographic system developed by a French laboratory. Always at the upstream processing, original results are presented in Section 3 on the problem posed by the sampling of 2D complex signals, especially the issue of phase vortex appearing when SAR data are oversampled. The phase of SLC images (Single Look Complex) contains the displacement information sought in the interferometric processing, but most studies have so far focused on analyzing the phase difference signal (interferogram filtering, unwrapping...), while the phase distribution and stability of residues in the original data play an important role for further processing (Fallourd *et al.*, 2009). These results and those of Section 4 show the potential of SAR imagery to observe the cryosphere, one of the fundamental elements of the climate system and a significant indicator of its temporal evolution.

Regarding displacement measurement, the project results are illustrated in three axes. The first axis relates to the use of the geometric information contained in the sampling of SAR images, especially in high-resolution amplitude data or in polarimetric data from the second generation of radar satellite. Different methods derived from the amplitude correlation technique are developed and tested on the measurement of large displacements such as those of alpine glaciers (Fallourd *et al.*, 2011 ; Harant *et al.*, 2011). The results are presented in Section 4. The second axis relates to the use of the second geometric information provided by the phase of radar images, in particular the processing of interferometric time series. The precision of the phase allows small displacements to be measured, provided that the various sources of uncertainty are sufficiently reduced. The work presented in Section 5 illustrates the complementarity of a SBAS (Small BAseline Subset) approach which optimally combines usable interferograms (Berardino *et al.*, 2002), and a data mining approach, to extract spatial and temporal patterns related to a deformation signal embedded in atmospheric artifacts (Julea *et al.*, 2011). Finally, the third axis consists in using simultaneously the two sources of information on the displacement: amplitude and phase. Different data fusion strategies are proposed to invert physical models and reduce uncertainties. Section 6 illustrates this work by introducing a novel approach based on the possibility theory to represent and propagate uncertainty (Yan *et al.*, 2011). These results are illustrated on two types of deformation of seismic origin: the slow deformation of the fault of Haiyuan (China) and the co-seismic deformation of the 2005 Kasmir earthquake. In both cases, the results of multitemporal SAR image processing help improve the modeling and knowledge of geophysical processes.

## 1. Introduction

Depuis l'avènement des premiers satellites radar d'observation de la Terre dans les années 90, le volume de données accessibles pour mesurer les déformations de la surface terrestre ne cesse d'augmenter. Le lancement de la seconde génération de satellites radar en 2006-2007 (ALOS, TerraSAR-X, RadarSAT-2, Cosmo-SkyMed) a multiplié les sources d'images radar à synthèse d'ouverture (SAR : *Synthetic Aperture Radar*) à haute résolution (HR) et les types de mesures permettant de suivre les déplacements du sol. C'est dans ce contexte qu'a été soumis à l'ANR le projet EFIDIR *extraction et fusion d'informations pour la mesure de déplacements par imagerie radar* afin de développer une plateforme ouverte de traitement adaptée d'une part aux spécificités des données SAR et d'autre part aux séries temporelles d'images satellitaires (STIS) exploitées pour les mesures de déplacement. Ce projet pluridisciplinaire associe quatre laboratoires du domaine des sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC) développant des méthodes de traitement des images SAR et de fusion d'informations, et deux laboratoires du domaine des sciences de la terre au sein desquels des chercheurs sont spécialisés dans la mesure des déformations par imagerie radar et son exploitation pour enrichir la connaissance des phénomènes géophysiques observés.

L'acquisition et le traitement des données SAR permet d'obtenir des images complexes qui apportent une double information géométrique sur la surface imagée. L'amplitude fournit une information sur la position des cibles dans l'image, la précision de la mesure de déplacement entre deux images acquises à des dates

différentes dépend alors de la résolution selon chaque axe et de la capacité à suivre les cibles ou les motifs par des techniques de types « corrélation d'amplitude » (Michel *et al.*, 1999). Du fait de l'utilisation d'une source cohérente, les images radar comportent également une information de phase, qui peut se décomposer en un terme de phase propre, lié à la rétrodiffusion, et un terme lié au temps de propagation aller-retour. Lorsque la phase propre d'une cible est suffisamment stable dans le temps, la différence de phase entre deux images mesure alors la différence de temps de propagation radar-cible entre les deux acquisitions. Si les conditions atmosphériques sont les mêmes entre les deux dates et les positions des satellites parfaitement connues, cette différence de phase permet de mesurer le déplacement des cibles avec une précision inférieure à la demi-longueur d'onde (2,6 cm en bande C) (Massonnet *et al.*, 1998). Cette technique appelée interférométrie différentielle radar (D-InSAR) a suscité dans les années 90 un grand intérêt pour de nombreuses applications, en particulier dans le domaine de la géophysique où la mesure de champs de déformation en surface permet de mieux contraindre les modèles de phénomènes tels que les failles ou les volcans.

Cependant plusieurs limitations importantes réduisent les données exploitables et la précision des mesures interférométriques : la perte de cohérence temporelle ou géométrique (évolution de la phase propre dans le temps ou du fait des bases qui séparent les orbites), les perturbations atmosphériques, les incertitudes des données externes employées telles que les modèles numériques de terrain et les orbites des satellites, ou encore les erreurs de traitement notamment dans l'étape de déroulement de phase. Le potentiel de l'interférométrie radar est lié à la nature des données utilisées (longueur d'onde, type de terrain, amplitude du déplacement, durée entre les acquisitions) et à des avancées méthodologiques permettant de réduire les incertitudes grâce au traitement du signal et des images et à l'exploitation de séries de données.

Les travaux présentés dans cet article illustrent plusieurs aspects des avancées réalisées dans le projet EFIDIR au niveau du traitement des données radar et au niveau de la mesure de déplacement.

Au niveau de l'imagerie SAR, les travaux les plus en amont dans la chaîne de traitement ont porté sur le déroulement d'un système d'acquisition SAR utilisable sur le terrain pour collecter des données dans des conditions expérimentales contrôlées. Ce GB-SAR (Ground Based SAR) répond à un double objectif : d'une part développer des méthodes de formation des images, en particulier tri-dimensionnelles (tomogrammes) et d'autre part améliorer la connaissance de la réponse électromagnétique des milieux diffusants tels que la neige (Longepe *et al.*, 2009). Ces travaux sont présentés en section 2 et illustrent les premiers résultats d'un système de tomographie SAR développé par un laboratoire français.

Toujours au niveau des traitements amonts, nous nous sommes également intéressés aux problèmes posés par l'échantillonnage de signaux complexes, et en particulier l'apparition de vortex de phase lors du suréchantillonnage des données SAR. La phase des images SLC (*Single Look Complex*) véhicule l'information de déplacement recherchée dans les traitements interférométriques, mais la plupart des travaux ont jusqu'ici porté sur l'analyse du signal de différence de phase (filtrage, déroulement de phase...), alors que la distribution et la stabilité des résidus présents

dans les données initiales jouent un rôle important pour la suite des traitements. Ces travaux originaux présentés au GRETSI 2009 (Fallourd *et al.*, 2009) sont détaillés dans la section 3.

Au niveau de la mesure de déplacement, nous illustrons les travaux réalisés par le projet selon trois axes. Le premier axe porte sur l'utilisation de l'information géométrique contenue dans l'échantillonnage des images SAR, en particulier dans les données d'amplitude haute résolution ou les données polarimétriques issues de la seconde génération de satellite radar. Des méthodes de type « corrélation d'amplitude » exploitant ces données sont développées et expérimentées sur la mesure de grands déplacements tels que ceux des glaciers alpins (Fallourd *et al.*, 2011 ; Harant *et al.*, 2011). Les résultats sont présentés dans la section 4. Ces travaux et ceux de la section 2 illustrent le potentiel de l'imagerie radar pour l'observation de la cryosphère qui est non seulement un des éléments fondamentaux du système climatique, mais aussi un des indicateurs les plus marquants de son évolution temporelle (Solomon *et al.*, 2007).

Le second axe porte sur l'utilisation de la seconde information géométrique fournie par l'imagerie radar *via* la phase, en particulier sur les traitements des séries temporelles interférométriques. La précision apportée par la phase permet de s'intéresser à de petits déplacements à condition de réduire les différentes sources d'incertitudes. Les travaux présentés en section 5 illustrent la complémentarité entre une approche de type SBAS (*Small BAseline Subset*) qui combine de façon optimale les interférogrammes exploitables (Berardino *et al.*, 2002) et une approche fouille de données (*data mining*) qui permet d'extraire des motifs spatiotemporels fréquents liés à un signal de déformation noyé dans des perturbations atmosphériques (Julea *et al.*, 2001).

Enfin le troisième axe porte sur l'utilisation simultanée des deux sources d'information sur le déplacement (amplitude et phase) et les stratégies de fusion de données mises en œuvre pour inverser un modèle physique et réduire les incertitudes. La section 6 illustre ces travaux en introduisant notamment une approche originale basée sur la théorie des possibilités pour représenter et propager les incertitudes (Yan *et al.*, 2011). Les résultats de ces travaux et ceux de la section précédente sont illustrés sur deux types de déformations d'origine sismique : la déformation lente de la faille d'Haiyuan (Chine) et la déformation cosismique du tremblement de terre du Cachemire de 2005. Dans les deux cas, les résultats issus de l'imagerie radar contribuent à améliorer la modélisation et la connaissance des processus géophysiques.

## **2. Caractérisation des milieux diffusants**

### **2.1. Objectifs et méthodologie proposée**

De nombreuses techniques de télédétection électromagnétique (EM) ont été appliquées pour la caractérisation à grande échelle de la neige et de la glace, en utilisant des capteurs passifs ou actifs et des signaux de longueur d'onde métrique à millimétrique ou proche du domaine visible. Les radar imageurs de type SAR, occupent une place prépondérante parmi les moyens de mesure utilisés, en raison de leur très faible sensibilité aux conditions météorologiques, de la haute résolution

actuelle des images produites ainsi que des possibilités d'analyse volumique liées à la pénétration des ondes dans un couvert.

Cependant, l'étude quantitative d'un couvert neigeux à l'aide d'images SAR est loin d'être aisée (Hallikainen *et al.*, 2001). Si la très grande sensibilité de la réflectivité EM à la Teneur en Eau Liquide (TEL) d'un couvert a largement été utilisée (Nagler *et al.*, 2000) (Longepe *et al.*, 2009) pour la détection de la fonte saisonnière, l'analyse de la neige sèche se heurte à d'importants problèmes liés à la complexité du milieu observé. La neige sèche est un milieu à faible contraste diélectrique, constitué de particules de glace de tailles et de formes diverses, généralement arrangées en strates, d'épaisseur et de densité très variables, dont les interfaces peuvent être rugueuses. En raison de la faible atténuation des ondes par le couvert nival, le sol sous-jacent, dont les caractéristiques sont en général inconnues, joue un rôle important dans la rétrodiffusion globale. L'estimation de paramètres physiques d'un couvert se révèle être un problème mal conditionné, mettant en oeuvre un nombre considérable de variables dont les valeurs réelles sont difficilement accessibles et pour lequel des hypothèses EM classiques, comme l'approximation incohérente pour des milieux peu denses, mènent à de fortes imprécisions.

L'étude présentée ici porte sur la caractérisation à très haute résolution (THR) de l'interaction des ondes EM avec un manteau neigeux à partir d'un radar de terrain Ground-Based SAR (GB-SAR), nommé Pocket SAR (PoSAR), spécifiquement développé par l'IETR dans le cadre de ce projet. L'objectif principal est d'établir une image 3-D THR de la réponse du couvert qui pourra être utilisée pour :

- séparer et caractériser finement la contribution de chacune des couches ;
- simplifier les modèles de diffusion EM d'un couvert en évaluant l'influence d'hypothèses simplificatrices ou l'attribution de valeurs *a priori* à certains paramètres physiques ;
- établir le potentiel du SAR dans des conditions de mesures réelles et non plus à partir de simulations, pour l'analyse d'un couvert neigeux, notamment en fonction de la fréquence porteuse utilisée.

Le mode d'imagerie SAR utilisé, nommé interférométrie multi-bases (MB-InSAR) et illustré sur la figure 1, repose sur l'acquisition de  $M$  signaux SAR selon des trajectoires  $t_i$  légèrement décalées. Après formation, compensation et recalage géométrique des signaux, on obtient  $M$  images SAR 2-D,  $s_i(x, r)$  où  $x$  représente la coordonnée en azimut et  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ , la distance proximale d'un point donné. Comme le montre la figure 1, l'ambiguïté cylindrique naturelle de l'imagerie SAR 2-D classique est mal adaptée à la caractérisation de milieux volumiques. Le signal SAR pour une position  $(x_0, r_0)$  donnée résulte de l'intégration cohérente de la densité de réflectivité  $a(x, r, \nu)$  du milieu considéré :

$$s_i(x_0, r_0) = \int_{\mathcal{C}(x_0, r_0)} a(x, r, z) e^{jk_z z} dz \quad i = 1 \dots M \quad [1]$$

où  $\mathcal{C}(x_0, r_0)$  représente une cellule de résolution possédant la forme d'une tranche cylindrique, dont les limites hautes et basses sont définies par le milieu volumique observé. Les limites de la cellule de résolution sont données par

$$|x - x_0| < \frac{\delta x}{2}, |r - r_0| < \frac{\delta r}{2}, z_{vmin} < z < z_{vmax} \quad [2]$$

avec  $\delta x$  et  $\delta r$  la résolution SAR en azimuth et en distance respectivement. L'expression [1] suppose  $\delta x$  et  $\delta r$  suffisamment faibles pour que  $a(x,r,z)$  soit seulement une fonction de l'élévation. Ce terme traduit la variation de phase interférométrique d'une image à l'autre et  $k_{z_i}$  se calcule à partir de la configuration géométrique de la mesure.

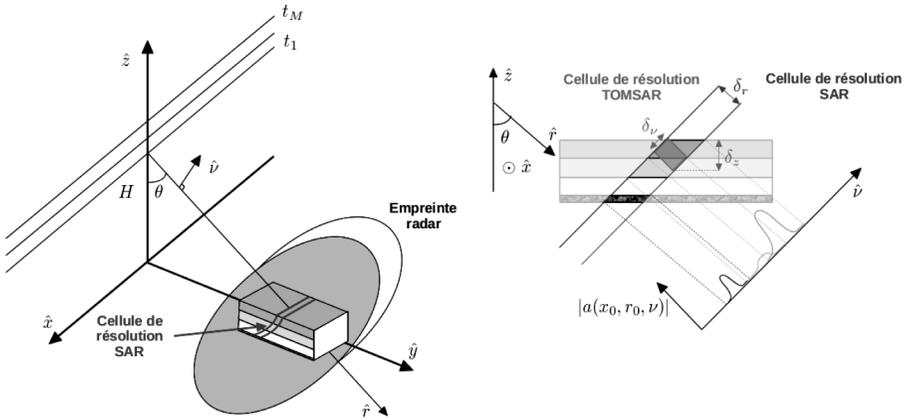


Figure 1. Configuration géométrique d'une mesure MB-InSAR (gauche), cellules de résolution SAR et TOMSAR (droite)

L'objectif de la tomographie SAR (TOMSAR), illustrée figure 1, est d'améliorer la résolution verticale de la mesure SAR, pour estimer la densité volumique de réflectivité  $|a(x,r,z)|^2$  de façon plus précise. On utilise pour cela les  $M$  mesures SAR intégrales  $s_i(x_0, r_0)$ , acquises pour des nombres d'onde verticaux,  $k_{z_i}$ , différents. Il s'agit d'un problème classique d'estimation spectrale, pour lequel un ensemble de solutions peut être appliqué (Gini *et al.*, 2005).

## 2.2. Imagerie 3-D THR multifréquences d'un couvert neigeux par tomographie

Afin de collecter sur le terrain des informations sur les mécanismes de rétrodiffusion des zones imagées, l'équipe SAPHIR de l'IETR a développé sur ces principes un système de mesure GB-SAR THR pour l'analyse de milieux volumiques par tomographie. Ce système est constitué d'un rail de mesure de longueur  $\Delta x = 3m$  sur lequel se déplace, à l'aide d'un système de positionnement à haute précision, un radar à onde continue (cf. figure 2). L'acquisition de signaux SAR est assurée par un analyseur de réseau vectoriel et deux antennes à large bande (2 GHz – 20 GHz).

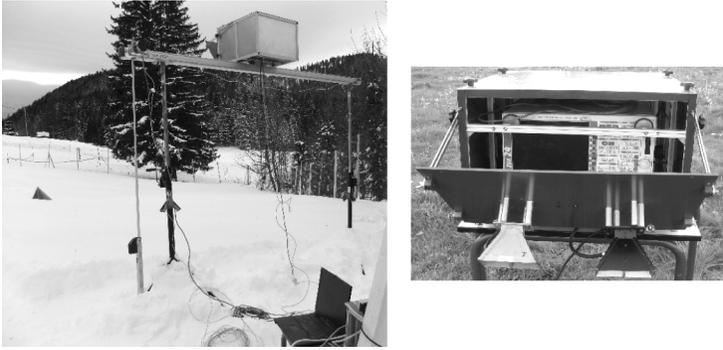


Figure 2. Photographies du système GB-SAR THR PoSAR au CEN de Météo France (Col de Porte) lors des expérimentations de décembre 2010

Une campagne de mesures TOMSAR d'un couvert neigeux en bandes X et Ku a été effectuée les 19 et 20 décembre 2010, en collaboration avec EDF et le Centre d'Etudes de la Neige (CEN) de Météo-France, au col de Porte, à proximité de Grenoble. Les principales caractéristiques des images SAR acquises et focalisées sont résumées dans le tableau 1 où la résolution en azimut est indiquée au centre de la fauchée azimutale et pour un angle d'incidence de  $45^\circ$ .

Tableau 1. Caractéristiques des images SAR focalisées

Bande	$f_c$ (GHz)	$\Delta f$ (GHz)	$\delta x$ (cm)	$\delta r$ (cm)
X	10,2	4	1,9	3,75
Ku	14,2	4	1,35	3,75

La réflectivité SAR THR en bande X du couvert neigeux est montrée sur la figure 3, où l'on distingue nettement l'atténuation en distance provoquée par le diagramme de rayonnement des antennes utilisées ainsi qu'une zone à forte réflectivité correspondant à un sentier de neige fortement tassée par le passage de personnes lors de la mise en service du radar.

Malgré sa très haute résolution, cette image SAR ne permet pas de mettre en évidence la structure du couvert neigeux observé. Pour cela, des acquisitions SAR tomographiques ont été effectuées, selon trois configurations, deux en bande X et présentant des résolutions verticales différentes, dénommées X1, X2 et une en bande Ku. L'évolution de la résolution verticale en fonction de la configuration et de la distance au sol est donnée sur la figure 4.

Des relevés manuels de profils stratigraphiques du couvert ont permis de mettre en évidence une structure de couches, dont les principaux paramètres moyens sont donnés sur la figure 5. On constate que le couvert peut être simplifié en 3 couches :

- une couche inférieure, pour  $0\text{ cm} \leq z \leq 35\text{ cm}$ , constituée d'une neige très dense, avec de gros grains, qui peut être assimilée à de la glace en cours de solidification ;

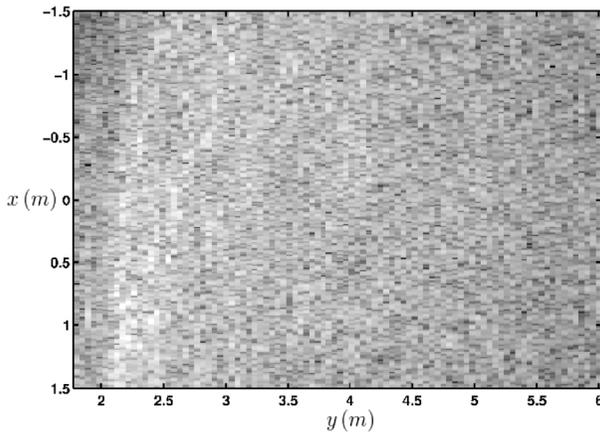


Figure 3. Image SAR en bande X du couvert neigeux, avant compensation du diagramme des antennes, projetée à l'altitude  $z = 0$

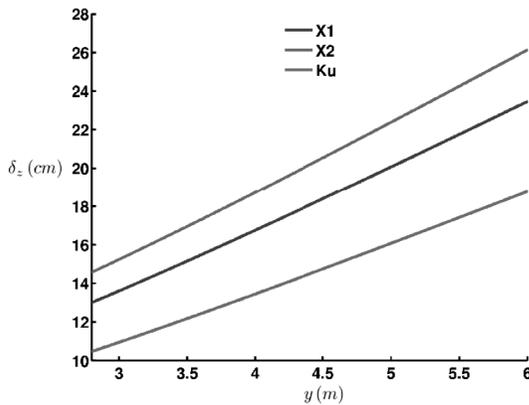


Figure 4. Résolution verticale en fonction de la distance au sol, pour chacune des configurations utilisées

- une couche intermédiaire, pour  $35\text{ cm} \leq z \leq 50\text{ cm}$ , de neige peu dense avec de petits grains ;

- une couche supérieure, de  $10\text{ cm}$  d'épaisseur de neige très légère formée de très gros grains.

Les tomogrammes évalués le long d'une coupe de l'image SAR de la figure 3 sont présentés sur la figure 6. Ces tomogrammes indiquent la distribution verticale en échelle logarithmique d'une intensité relative. Pour chaque distance au sol,  $y$ , on représente  $10 \log_{10}(\sigma(y, z_i) / \text{moy}_z(\sigma(y, z)))$  où  $\sigma(y, z_i)$  est la réflectivité pour l'élévation  $z_i$  estimée par la technique d'analyse spectrale de Capon. Cette

normalisation permet d'apprécier la répartition de la puissance rétrodiffusée entre les différents constituants du couvert, mais peut masquer des variations d'intensité moyenne le long du profil.

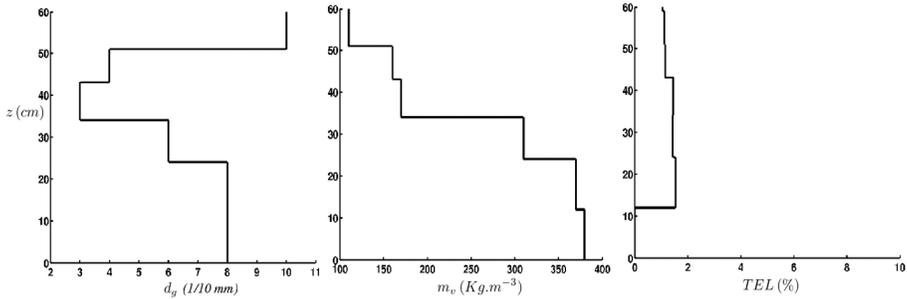


Figure 5. Paramètres moyens de la structure stratigraphique du couvert.  
Diamètre des grains de neige (gauche), masse volumique (centre)  
et teneur en eau liquide (droite)

Les tomogrammes traduisent bien la présence d'un milieu diffusant aux élévations  $0\text{ cm} \leq z \leq 60\text{ cm}$  au début du profil, qui s'abaisse lorsque la distance au sol croît, ce qui a été confirmé par des mesures de terrain. On constate aisément l'influence de la résolution d'analyse sur la qualité de la focalisation verticale. La configuration Ku présente ainsi un profil possédant une information très détaillée, alors que la configuration X2 donne un profil amassé autour du centre du couvert, traduisant ainsi un moindre pouvoir de discrimination. En comparant les tomogrammes X1 et X2, on constate des différences importantes alors que les résolutions verticales ne diffèrent que de un à deux centimètres. Ceci est dû à une amplification des différences pour des zones peu significatives provoquée par la normalisation de l'intensité ainsi qu'à l'estimateur spectral utilisé pour la focalisation. La résolution donnée sur la figure 4 correspond à un estimateur classique de Fourier alors que les tomogrammes ont été focalisés avec la méthode de Capon qui présente un gain de résolution non constant. De ce fait une faible variation de résolution théorique peut se traduire par un fort gain lors de la focalisation avec la méthode utilisée.

En bande Ku, la rétrodiffusion provient majoritairement de la couche supérieure peu dense et formée de gros grains. La réponse du sol reste faible mais constante en distance, ce qui indique qu'à cette fréquence l'interface couvert-sol apparaît comme très rugueux. On note la diffusion quasi-nulle par la couche de neige-glace très dense au sein du milieu. En bande X la répartition de la diffusion est beaucoup plus équilibrée. Pour des distances faibles, la réponse du sol est assez importante, mais s'atténue lorsque l'angle d'incidence augmente, traduisant un comportement de surface peu rugueuse à cette fréquence. On note que la partie supérieure du couvert ne contribue que très peu à la diffusion globale, au contraire de la couche de neige dense qui possède une très forte réflectivité, ainsi qu'une rugosité marquée. Cette interprétation a été confirmée lors de l'expérience de terrain par une image SAR

mesurée alors que des tranchées avaient été creusées dans le couvert. Le sol nu présentait alors une réflectivité faible alors que les blocs de neige durcie avaient une réponse très énergétique.

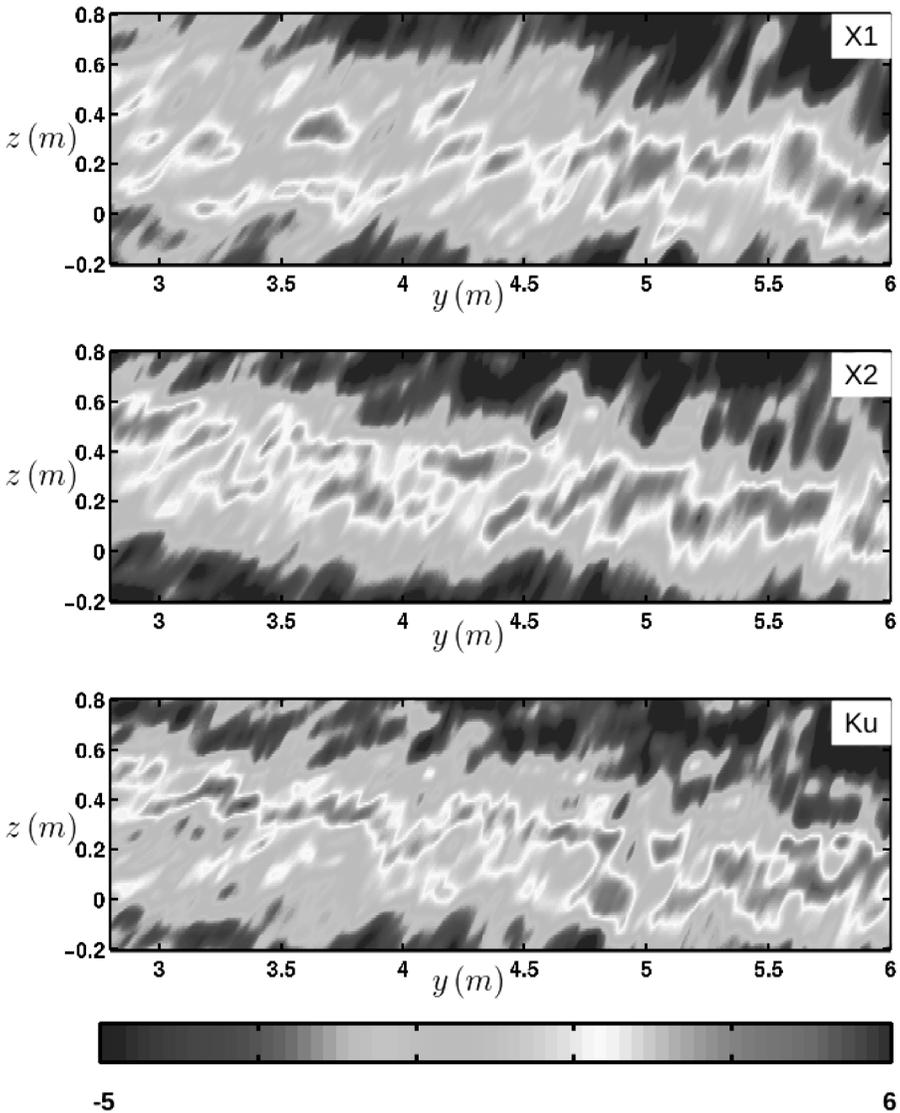


Figure 6. Tomogrammes en réflectivité relative,  $\sigma_{rel}(y, z)$  (dB), obtenus pour une même coordonnée en azimut  $x$  et pour les configurations X1 (haut), X2 (milieu) et Ku (bas). La réflectivité relative est définie comme

$$\sigma_{rel}(y, z_i) = \sigma(z_i) / \text{moy}_z(\sigma(y, z)).$$

Cette expérience de mesure tomographique a montré que l'imagerie SAR 3-D à haute résolution permet de caractériser finement la réponse d'un couvert neigeux et peut être utilisée d'une part pour valider des hypothèses de simulation électromagnétique et d'autre part pour quantifier les possibilités d'estimation de paramètres physiques par des systèmes SAR classiques ou futurs (Rott *et al.*, 2008). Contrairement aux GPR (*Ground Penetrating Radar*) effectuant des sondages verticaux, cette mesure, de par sa configuration géométrique, utilise des angles d'incidence comparables à ceux utilisés par les systèmes SAR satellitaires actuels.

### 3. Suréchantillonnage de données complexes

#### 3.1. Les spécificités des données complexes

Les images SAR brutes ou traitées par un outil de synthèse SAR ont la caractéristique d'avoir des pixels complexes, représentés en général par deux valeurs : une partie réelle et une partie imaginaire. On peut aussi les représenter par une amplitude et une phase : c'est d'ailleurs l'image d'amplitude qui est présentée à l'utilisateur car c'est elle qui est directement interprétable. La phase est moins intuitive à analyser vu qu'elle comporte deux termes : le premier, appelé « phase propre », est lié à la sommation cohérente de la réponse des cibles présentes dans la cellule de résolution, et le second est lié au trajet aller-retour du signal entre l'antenne et le sol.

Dans le modèle du chatoiement (*speckle*) pleinement développé de Goodman (Goodman, 2007), on montre que la phase propre d'un pixel peut être vue comme le résultat d'un tirage d'une loi uniforme entre  $-\pi$  et  $\pi$  dans l'hypothèse où deux pixels voisins sont totalement décorrélés. À première vue, la phase ne semble donc pas avoir un rôle prédominant en imagerie radar. Cependant, c'est une information essentielle dès lors qu'il est possible de la comparer entre deux images acquises à deux instants différents. En effet, dans la mesure où la phase propre reste inchangée entre deux acquisitions, la différence est alors uniquement liée à la différence des trajets (aller retour) entre le capteur et le sol. Nous avons vu que cette propriété est à la base des techniques D-InSAR utilisées pour mesurer les déformations du sol entre deux acquisitions. Les sections 5 et 6 approfondiront ces techniques.

L'interférométrie radar nécessite donc d'analyser une différence de phase. Cependant une phase construite à partir d'une partie réelle et d'une partie imaginaire n'est connue que modulo  $2\pi$  : on parle de « phase repliée » et une étape spécifique dite de déroulement est requise. Dans le cas d'un signal monodimensionnel, ce processus de déroulement s'effectue sans ambiguïté : il n'y a qu'un seul moyen d'obtenir la vraie phase en un point  $x_{n+1}$  connaissant d'une part la vraie phase au point  $x_n$  et d'autre part la différence de phase entre les deux points. En effet, si l'on connaît aux points voisins  $x_n$  et  $x_{n+1}$  les phases  $\phi_n$  et  $\phi_{n+1}$  (repliées sur  $]-\pi, \pi]$ ), la différence s'écrit :

$$\delta\phi = \begin{cases} \phi_{n+1} - \phi_n + 2\pi & \text{si } \phi_{n+1} - \phi_n \in ]-2\pi, \pi] \\ \phi_{n+1} - \phi_n & \text{si } \phi_{n+1} - \phi_n \in ]-\pi, \pi] \\ \phi_{n+1} - \phi_n - 2\pi & \text{si } \phi_{n+1} - \phi_n \in ]\pi, 2\pi] \end{cases}$$

et il est alors possible de retrouver la phase non repliée en tout point. Ce n'est pas pour autant que l'on puisse ainsi garantir que l'on obtient la « vraie » phase déroulée : en effet, entre deux acquisitions, la « vraie » phase peut différer d'un nombre quelconque de multiple de  $2\pi$  sans que l'on puisse le savoir. Notons aussi que le résultat peut différer si on choisit l'intervalle  $[-\pi, \pi[$  au lieu de l'intervalle  $] - \pi, \pi ]$ .

En revanche, la phase interférométrique obtenue à partir des différences de phase de deux images complexes ne relève pas uniquement de cette approche. Elle peut bien entendu s'analyser comme un phénomène monodimensionnel, par exemple en se plaçant selon les lignes ou les colonnes de l'image. Elle peut aussi s'analyser en effectuant des parcours fermés dans le plan de l'image. Or il est bien connu dans le monde de l'interférométrie radar que le fait de disposer ainsi d'un moyen de contrôle sur la phase en effectuant ce type de parcours planaire met en évidence des incohérences dès lors que deux parcours donnent deux valeurs différentes : la phase interférométrique présente alors des discontinuités appelées « résidus » (Maître, 2001).

### 3.2. Vortex de phase, dislocations, résidus et singularités

L'existence de ces résidus en interférométrie est en réalité une manifestation d'un problème bien plus vaste qui tient à une sorte de modification du comportement topologique de la phase dès lors que l'on opère dans un espace de dimension égale ou supérieure à 2. D'autres domaines scientifiques abordent d'ailleurs ce problème.

Par exemple, en mécanique des fluides, l'analyse du champ de vitesse de certains phénomènes naturels (comme les cyclones) peut mettre en évidence des points de l'espace où la vitesse ne peut être définie. Les physiciens appellent alors ce point singulier « vortex ». On peut aussi attribuer un signe au vortex, selon que le champ de vitesse est lévogyre ou dextrogyre.

De même, la théorie des fonctions analytiques pose les fondements des fonctions holomorphes. Celles-ci peuvent ne pas être définies à l'origine : sous certaines hypothèses, si  $\gamma$  est un chemin fermé entourant l'origine, on a :

$$\int_{\gamma} f(z) dz = 2i\pi a_{-1}$$

la valeur  $a_{-1}$  s'appelle « résidu » de la fonction  $f$  au point singulier 0 : si ce résidu est nul, la fonction est définie à l'origine. Ceci se généralise bien évidemment à tout point singulier situé en n'importe quel point du plan complexe.

Dennis (Dennis, 2001) a été le premier à proposer une analyse transdisciplinaire de ces problèmes de points singuliers dans l'espace en se plaçant dans le cadre des champs ondulatoires (*wave fields*) dans lesquels, tant dans le plan que dans l'espace tridimensionnel, la phase joue un rôle majeur. Comme elle n'est connue que modulo  $2\pi$ , c'est en définissant un parcours fermé dans l'espace que l'on peut « dérouler » la phase. Or il peut exister des points de l'espace où deux parcours différents donnent deux valeurs différentes (mais égales modulo  $2\pi$ ). On parle alors de vortex de phase car ceci révèle l'existence d'un point de l'espace où la phase est indéfinie. Dans le plan complexe, on peut alors utiliser les relations fondamentales suivantes :

$$\operatorname{Re}(z) = |z| \cos \varphi \quad \operatorname{Im}(z) = |z| \sin \varphi$$

On peut alors déduire l'expression de la phase :

$$\varphi = \operatorname{Atan}\left(\frac{\operatorname{Im}z}{\operatorname{Re}z}\right)$$

expression qui est toujours définie exceptée au point  $(\operatorname{Re}(z) = 0, \operatorname{Im}(z) = 0)$  : en ce point on observe donc une singularité de la phase.

Il est important de noter que le signe d'un vortex de phase peut se définir en fixant un sens dans le parcours et en analysant le signe de la dérivée moyenne du champ le long du parcours : on a ainsi deux types de vortex de phase, les vortex « positifs » et les vortex « négatifs ».

### 3.3. La phase d'une image Single Look Complex

#### 3.3.1. Suréchantillonnage d'une image Single Look Complex

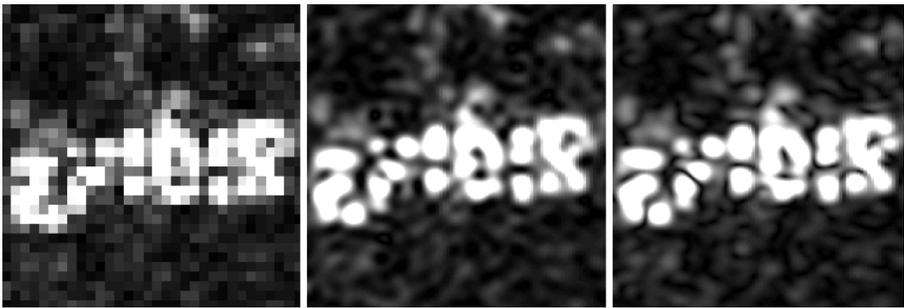


Figure 7. Image TerraSAR-X d'un réseau de coins réflecteurs placés lors de l'école de printemps EFIDIR organisée à l'École de Physique des Houches, 5 mai 2011.

Chacun des 70 participants disposait d'un réflecteur et était placé de façon à former le sigle « EFIDIR ». A gauche, l'image d'amplitude initiale pour laquelle chaque pixel est répliqué 8 fois en ligne et 8 fois en colonne. Au centre, l'image d'amplitude a été suréchantillonnée 8 fois en ligne et 8 fois en colonne (par bourrage de zéros). A droite, amplitude de l'image complexe suréchantillonnée 8 fois en ligne et 8 fois en colonne (par bourrage de zéros).

Sur cette dernière image, les vortex de phase se manifestent par des zones serpentiformes dans lesquelles les amplitudes sont très faibles

Pour une image radar complexe *Single Look Complex*, chaque pixel est donc décrit par une partie réelle et une partie imaginaire. Suréchantillonner ce type d'image requiert donc de suréchantillonner séparément partie réelle et partie imaginaire pour respecter le critère de Shannon : il ne peut être envisagé de suréchantillonner amplitude et phase car les deux grandeurs sont le résultat d'une opération non linéaire. Or la phase joue un rôle essentiel dès lors que l'on souhaite suréchantillonner une image complexe : il suffit de comparer une image dont on

suréchantillonne seulement l'amplitude avec une image complexe pour laquelle on suréchantillonne séparément partie réelle et partie imaginaire (cf. figure 7). Sur cette dernière image, on observe un certain nombre de pixels dont l'amplitude est quasi nulle. Ce sont en fait les vortex de phase qui sont ainsi mis en évidence et qui n'existent pas sur une image d'amplitude (puisque celle-ci a une phase nulle). La question est de savoir si ces vortex sont des phénomènes rares ou bien facilement observables sur une image donnée.

### 3.3.2. Les vortex de phase d'une image de chatoiement pleinement développé

Considérons d'abord une image radar théorique correspondant à du chatoiement pleinement développé. On sait alors que les pixels sont indépendants et que la phase est un processus aléatoire dont la densité de probabilité (ddp) est la loi  $p_1(x)$  équidistribuée sur  $] -\pi, \pi ]$  :

$$p_1(x) = \frac{1}{2\pi} \quad \text{si } x \in ] -\pi, \pi ]$$

Considérons dans l'image quatre pixels voisins :  $P_1, P_2, P_3$  et  $P_4$ . On peut montrer que l'on peut, sans perte de généralité, fixer la valeur de la phase du premier pixel à 0. Il est alors facile de montrer les points suivants :

– la différence de phase  $\delta\phi_{21}$  entre  $P_2$  et  $P_1$  suit la ddp  $p_1(x)$ , dont le support est  $] -\pi, \pi ]$ ,

– la différence de phase  $\delta\phi_{31}$  calculée comme la somme de la différence de phase entre  $P_3$  et  $P_2$  et la différence de phase entre  $P_2$  et  $P_1$  suit la ddp  $p_2(x) = p_1(x) \star p_1(x)$ , qui est la loi triangle sur  $] -2\pi, 2\pi ]$ ,

– la différence de phase  $\delta\phi_{41}$ , calculée comme la somme de la différence de phase entre  $P_4$  et  $P_3$ , la différence de phase entre  $P_3$  et  $P_2$  et la différence de phase entre  $P_2$  et  $P_1$ , suit la ddp  $p_3(x) = p_1(x) \star p_1(x) \star p_1(x)$ , définie sur  $] -3\pi, 3\pi ]$ . On montre que :

$$\begin{aligned} p_3(x) &= \frac{1}{16\pi^3} (3\pi + x)^2 & x \in ] -3\pi, -\pi ] \\ p_3(x) &= \frac{1}{2\pi} \left( \frac{3}{4} - \frac{x^2}{4\pi^2} \right) & x \in ] -\pi, \pi ] \\ p_3(x) &= \frac{1}{16\pi^3} (3\pi - x)^2 & x \in ] \pi, 3\pi ] \end{aligned}$$

Puisque l'on se place dans le plan, on peut aussi calculer directement la différence de phase  $\delta\phi_{41}$  calculée comme la différence de phase entre  $P_4$  et  $P_1$ , dont la ddp est tout simplement  $p_1(x)$  et dont le support se restreint à l'intervalle  $] -\pi, \pi ]$ .

On voit bien que le repliement de la phase va donc placer les valeurs obtenues précédemment dans l'intervalle  $] -3\pi, 3\pi ]$  à l'intérieur de l'intervalle  $] -\pi, \pi ]$ . On montre aisément les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \int_{-3\pi}^{-\pi} p_3(x) dx + \int_{\pi}^{3\pi} p_3(x) dx &= \frac{1}{3} \\ \int_{-3\pi}^{-2\pi} p_3(x) dx + \int_{2\pi}^{3\pi} p_3(x) dx &= \frac{1}{24} \end{aligned}$$

La première relation se vérifie expérimentalement par simulation : sur une image de speckle pleinement développé de  $N$  pixels, on observe un nombre de vortex égal à  $N/3$ .

La seconde relation montre qu'une partie de ces vortex correspondent en fait à un repliement supérieur à  $4\pi$  : il n'y a en effet aucun moyen de savoir si l'on a replié les valeurs de  $\pm 2\pi$  ou de  $\pm 4\pi$ . Pour lever cette ambiguïté, il suffit de suréchantillonner l'image d'un facteur 2 : on peut alors observer expérimentalement que le nombre de vortex (ramené au nombre de pixels de l'image initiale) passe du facteur  $1/3$  à  $5/12$ . En effet, un vortex correspondant à une donnée déroulée entre  $[-3\pi, -2\pi]$  ou entre  $[2\pi, 3\pi]$  sera mis en évidence lors du processus de suréchantillonnage par un facteur 2 : en lieu et place de chaque pixel de ce type on trouvera 4 pixels et 3 vortex, soit un vortex de même signe que le vortex initial et une paire de vortex dont les signes sont opposés. Si  $N$  est le nombre de pixels de l'image initiale, le nombre de vortex  $N'$  de l'image suréchantillonnée d'un facteur 2 est égal à

$$N' = \frac{N}{3} + 2\frac{N}{24} = \frac{5N}{12}$$

Des résultats de simulations ont montré le bien fondé de cette analyse : il y a effectivement lors d'un suréchantillonnage d'un facteur 2 création de paires de vortex pour 1 pixel sur 24. Pour un facteur de suréchantillonnage supérieur à 2, on observe que le nombre de vortex ne varie quasiment plus ensuite. Les observations sur des données expérimentales ont aussi montré que le nombre de vortex augmente nettement si l'on suréchantillonne l'image initiale d'un facteur 2, mais que par la suite, pour un facteur de suréchantillonnage supérieur, ce nombre reste à peu près constant.

### 3.4. Les vortex de phase d'une image SAR

En pratique, les images SAR ne vérifient pas exactement les conditions de Goodman. Parmi les hypothèses sujettes à caution, le fait que les pixels soient indépendants n'est pas vérifié : il existe en effet une certaine corrélation interpixelique facilement explicable par le fait que les spectres des images SAR ne sont pas totalement denses dans le domaine de Fourier.

Cette observation va avoir des conséquences sur la phase d'une image SAR car si sa ddp est toujours globalement équidistribuée entre  $-\pi$  et  $\pi$ , la loi vérifiée par les différences de phase entre pixels voisins ne vérifient plus les lois vues précédemment :  $p_1(x)$ ,  $p_2(x)$  et  $p_3(x)$ .

Il ne semble pas possible d'exhiber les expressions analytiques de ces lois connaissant la forme du spectre des images. En revanche il est possible de simuler des spectres dont l'allure est proche de spectres théoriques ou réels et d'en calculer le nombre de vortex. Les résultats de simulation reportés dans le tableau 2 montrent que ce taux est très proche des 33,3 % théorique dans le cas où le spectre occupe tout le plan de Fourier et diminue dès lors que le spectre utile n'occupe qu'une portion du plan de Fourier.

Le nombre de vortex varie aussi en fonction de la fonction d'apodisation du spectre : on obtient ainsi des taux de vortex caractéristiques pour les images TerraSAR-X différents de ceux obtenus avec les images Cosmo-SkyMed.

Tableau 2. Évolution du taux de vortex en fonction de la corrélation des pixels

Spectre utile (en %)	20	40	60	80	100
Taux de vortex (en %)	9,66	17,82	24,42	29,41	33,25

Enfin, le dépointage de l'antenne, qui se traduit par un décalage azimutal du spectre (et que l'on appelle très souvent *Doppler centroid*), modifie profondément le nombre de vortex. C'est d'ailleurs un moyen original de savoir s'il y a ou non dépointage de l'antenne : en comparant le nombre de vortex avec celui obtenu sur une image « à zéro Doppler », on a immédiatement une idée de l'existence d'un dépointage sans pour autant passer dans le domaine de Fourier.

### 3.5. Vortex et cohérence

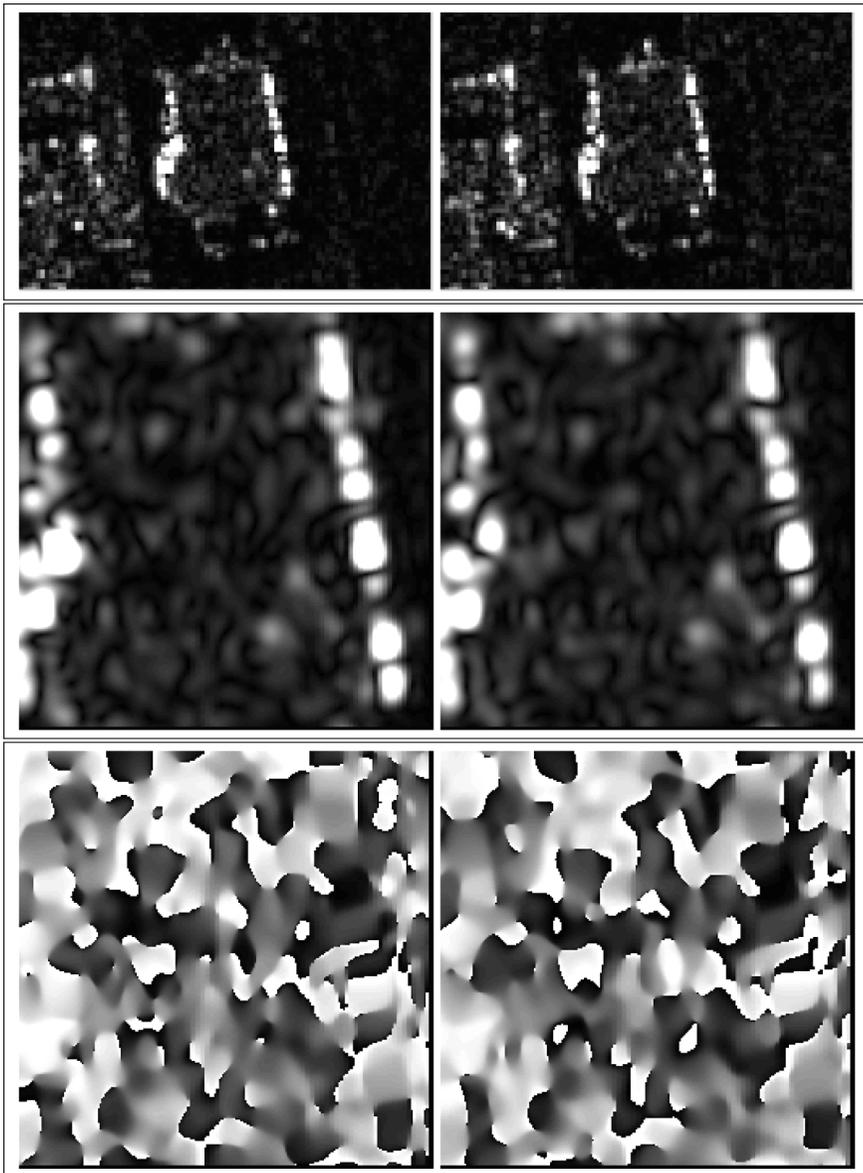
Le point le plus important dans le cadre du projet EFIDIR porte sur les liens étroits entre vortex de phase et cohérence. En effet, la cohérence interférométrique est un indicateur de changement local de phase : si une zone d'étude a peu ou pas changé entre deux acquisitions, la phase propre de chaque pixel sera aussi inchangée et sa cohérence sera forte. En suréchantillonnant les deux images, on peut alors noter que la localisation des vortex de phase demeure à peu près la même entre les deux images (voir la figure 8). En revanche, si la zone d'étude a fortement changé entre deux acquisitions, la phase propre de chaque pixel sera aussi fortement modifiée et la localisation des vortex de phase sera fondamentalement différente.

D'une certaine manière, observer les vortex de phase sur une image fortement suréchantillonnée est un moyen d'analyser la phase d'une image radar. La localisation des vortex de phase peut être vue comme une signature de la phase et deux images ayant une même signature de phase sont en réalité cohérentes de sorte qu'il est alors possible d'exploiter la phase pour des applications thématiques comme celles qui sont abordées dans le projet EFIDIR.

## 4. Mesure de grands déplacements

Les images SAR complexes apportent deux informations qui peuvent être exploitées pour mesurer des déplacements : la phase et l'amplitude. L'utilisation de la différence de phase par la technique d'interférométrie différentielle (D-InSAR) est *a priori* la plus précise (une fraction de la longueur d'onde), mais elle souffre de plusieurs limitations, en particulier la décorrélation temporelle due à l'évolution de la surface dans le temps et la décorrélation spatiale qui impose l'utilisation de faible ligne de base pour les cibles distribuées (Massonnet *et al.*, 1998). Néanmoins, elle a été appliquée avec succès au suivi des glaciers tempérés, mais principalement avec les images des satellites ERS1-2 acquises à un jour d'intervalle en mode tandem (Joughin *et al.*, 1998 ; Mattar *et al.*, 1998 ; Trouvé *et al.*, 2007).

Pour l'observation de grands déplacements, l'augmentation de la résolution spatiale permet de s'intéresser également à l'information d'amplitude. Celle-ci (au même titre que l'intensité) apporte une information spatiotemporelle sur la position



*Figure 8. Images TerraSAR-X de l'entrepôt « Metro » de la zone industrielle de Saint Gervais le Fayet. Les deux images ont été acquises à 11 jours d'intervalle. En haut : les données (Single Look Complex) fournies par le DLR (sans recalage subpixellique, mais avec un zoom par réplification de pixels d'un facteur 8). Au milieu, l'amplitude des imagerie suréchantillonnées d'un facteur 8, affichée entre 0 et moyenne  $+ 7\sigma$ . En bas, la phase des imagerie suréchantillonnées d'un facteur 8. On constate que les zones similaires en amplitude (même aspect serpentiforme) correspondent à des phases similaires (la localisation des vortex est similaire)*

des cibles (isolées ou distribuées) et la variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion pour des applications comme la détection de changement (Chatelain *et al.*, 2007) ou l'analyse du couvert neigeux (Longepe *et al.*, 2009). Quand la résolution est suffisante, les images d'amplitude peuvent être utilisées pour mesurer des mouvements de surface par différentes approches : le suivi de chatoiement (Michel *et al.*, 1999), le suivi de texture (Strozzi *et al.*, 2002) ou le suivi de cible (Serafino, 2006). Des résultats ont été obtenus avec la première génération de satellites radar (ERS, JERS, Radarsat-1, Envisat) sur des mouvements d'objets géophysiques comme les glaciers (Nakamura *et al.*, 2007) ou les séismes importants (Pathier *et al.*, 2006). Différents critères de suivi de texture ont été proposés pour analyser les mouvements des glaciers à partir des images Envisat (Erten *et al.*, 2009). La précision attendue des mesures de déplacement à partir de l'information d'amplitude est limitée par la résolution spatiale des images. Il est difficile d'atteindre une précision au delà de 1/10 de la résolution (Strozzi *et al.*, 2002). L'avènement des nouveaux satellites (TerraSAR-X, Radarsat-2, COSMO-SkyMed) de résolution métrique permet d'atteindre des précisions de mesure de l'ordre de la dizaine de centimètres. Dans cette section, nous illustrons sur le mouvement des glaciers de la vallée de Chamonix les méthodes et les résultats obtenus dans la mesure du déplacement avec cette nouvelle génération de capteur SAR, en exploitant soit les données d'amplitude haute résolution, soit l'information polarimétrique qui enrichit l'observation des cibles au détriment de la résolution.

#### 4.1. Données SAR haute résolution

Dans le cadre de la mesure de déplacement, la haute résolution spatiale permet de suivre deux types de cibles : les points cibles comme les « coins réflecteurs » et les cibles distribuées où le signal de rétro-diffusion n'est pas dominé par un seul diffuseur. Dans ce dernier cas, l'effet de chatoiement (speckle) est *a priori* un phénomène déterministe qui peut être exploité dans les méthodes dites de « speckle tracking ». Cependant, en raison des évolutions de surface et des angles de vues légèrement différents, la corrélation du speckle entre deux acquisitions tend à disparaître, entraînant ainsi la perte de la cohérence interférométrique et l'impossibilité de suivre le speckle sur les surfaces uniformes. En revanche, sur les zones non-homogènes, la présence de texture permet de continuer à suivre les déplacements dans les informations d'amplitude en s'appuyant sur des méthodes dites de « texture tracking » dans les images SAR. Il existe donc deux approches différentes, utilisables pour retrouver le déplacement dans les images radar, la première par détermination et par suivi de points cibles, la deuxième par suivi de cibles distribuées (speckle ou texture tracking). Nous allons détailler ces deux approches.

Pour les points cibles, la méthode proposée par Serafino (Serafino, 2006) consiste à appliquer un filtre adapté basé sur la réponse impulsionnelle idéale du système pour détecter les Points Diffuseurs Isolés (PDI) : points cibles ou « coin réflecteur ». En l'absence d'apodisation, la réponse impulsionnelle d'un capteur SAR peut s'écrire de la façon suivante :

$$I_{sinc}(x_{LOS}, y_{az}) = \text{sinc}\left(\frac{x_{LOS}}{\delta_{LOS}}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{y_{az}}{\delta_{az}}\right) \quad [3]$$

où  $\delta_{LOS}$  et  $\delta_{az}$  sont respectivement la résolution en distance (LOS) et en azimut, et  $(x_{LOS}, y_{az}) = (az_{px} \cdot i, rg_{px} \cdot j)$  avec les notations habituelles  $((i, j)$  : coordonnées du pixel,  $rg_{px}$  et  $az_{px}$  : dimension en distance et en azimut du pixel). La mesure de déplacement s'effectue alors en deux étapes : la sélection des PDI et l'estimation sub-pixellique du déplacement entre l'image maître et l'image esclave.

Pour les cibles distribuées, l'approche par mesure de similarité consiste à définir une zone au voisinage d'un pixel de la première image et à chercher la localisation d'une zone de même taille dans la deuxième image. Cette approche appelée *suivi d'offset* est appliquée pour mesurer le déplacement entre deux images d'intensité : l'image maître  $I_m(i, j)$  et l'image esclave  $I_s(i, j)$ . Pour un pixel donné  $(i, j)$  dans l'image maître, le vecteur déplacement  $\vec{V}(i, j)$  est obtenu en calculant la valeur de la fonction de similarité  $sim(p, q)$  entre une zone maître  $\Omega_m$  centrée sur le pixel  $(i, j)$  et une zone similaire  $\Omega_s$  translattée de  $(p, q)$  dans l'image esclave. À partir d'une connaissance approximative du déplacement, la recherche s'effectue pour  $(p, q) \in \Delta = [p_{min}, p_{max}] \times [q_{min}, q_{max}]$ . Le vecteur déplacement estimé du pixel  $(i, j)$  peut s'écrire :

$$\vec{V}^d(i, j) = (p_{opt}, q_{opt}) = \underset{(p, q) \in \Delta}{\text{Argmax}} \ sim(p, q) \quad [4]$$

où  $(p_{opt}, q_{opt})$  est l'offset qui maximise la fonction de similarité  $sim(p, q)$ .

Deux fonctions de similarités ont été testées. La première est la fonction classique d'inter-corrélation centrée normalisée (Zero-mean Normalized Correlation, ZNCC) utilisée pour le recalage d'images (Zitová *et al.*, 2003) ou pour les mesures de déplacements dans les images optiques (Berthier *et al.*, 2005) et SAR (Nakamura *et al.*, 2007). La seconde est une fonction spécifique aux images SAR, le maximum de vraisemblance non-corrélé (Uncorrelated Maximum Likelihood, UML) (Erten *et al.*, 2009), qui tiend compte de la statistique du bruit multiplicatif des images SAR. Sous l'hypothèse du bruit de chatoiement distribué selon une loi Gamma et décorrélié entre les deux images, cette fonction de similarité est définie par :

$$UML(p, q) = \sum_{(k, l) \in \Omega} \left( \underline{I}_m(k, l) - \underline{I}_s(k + p, l + q) - 2 \ln \left( 1 + e^{(\underline{I}_m(k, l) - \underline{I}_s(k + p, l + q))} \right) \right) \quad [5]$$

où  $\Omega$  est un voisinage,  $\underline{I}_m = \ln(I_m)$  et  $\underline{I}_s = \ln(I_s)$ .

#### 4.2. Données SAR polarimétriques

La méthodologie générale du suivi de texture dans les images SAR polarimétriques, schématisée sur la figure 9, peut être décomposée en trois étapes. Tout d'abord, la texture est extraite du jeu de données SAR polarimétriques. Cette texture est ensuite modélisée pour permettre, dans un troisième temps, de définir un critère de similarité basé sur les statistiques de l'image. Ce critère est défini comme une vraisemblance.

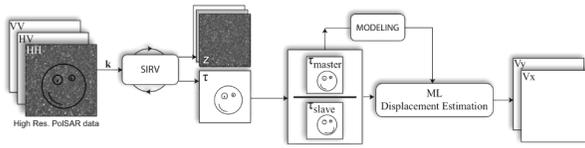


Figure 9. Principe général du suivi de texture dans les images SAR polarimétriques

4.2.1. Estimation de la texture  $\tau$

Dans le cadre de l’estimation de déplacement de la surface des glaciers, il est important de souligner le caractère non stationnaire du problème dû à la grande variabilité temporelle de la neige et de la glace. Pour s’affranchir de ce problème, nous proposons d’utiliser un paramètre de texture issu de la décomposition SIRV (Spherically Invariant Random Vectors). Le vecteur de rétrodiffusion  $\mathbf{k}$  est donc décomposé en utilisant l’estimateur du point fixe (Pascal *et al.*, 2008). Cet estimateur permet d’estimer la texture  $\tau$  et la matrice de covariance  $[M]$  d’un noyau gaussien de manière itérative et quelque soit l’initialisation de  $[M]$ . Pour une matrice de covariance donnée  $[M]$ , l’estimateur de la texture  $\tau$  au sens du maximum de vraisemblance s’écrit:

$$\hat{\tau}_i = \frac{\mathbf{k}_i [M]^{-1} \mathbf{k}_i}{p}, \tag{6}$$

où  $p$  représente la dimension du vecteur de rétrodiffusion  $\mathbf{k}$  ( $p = 3$  dans le cas polarimétrique avec réciprocité). L’estimateur au sens du maximum de vraisemblance de la matrice de covariance normalisée  $[M]$  existe dans les cas d’une texture déterministe et non déterministe (Bombrun *et al.*, 2010).

Pascal *et al.* ont établi l’existence et l’unicité (à un facteur scalaire près) de cet estimé. Dans le cadre de nos applications, l’approximation d’une texture déterministe est satisfaisante. Il est important de souligner la généralité des SIRVs dans le sens où aucune loi n’est spécifiée. Ils décrivent donc tout un ensemble de processus stochastiques dont les lois conventionnelles font partie (Normale,  $\mathcal{K}$ ,  $\mathcal{G}^0$ , KummerU).

4.2.2. Modélisation de la texture  $\tau$

Les images SAR en intensité sont couramment modélisées par les lois Gamma mais dans le contexte de la haute résolution spatiale, on peut montrer que les lois de Fisher modélisent mieux ces images et notamment la texture (Bombrun *et al.*, 2010). La loi de Fisher est une loi à trois paramètres définie par :

$$p_\tau(\tau) = \mathcal{F}[m, \mathcal{L}, \mathcal{M}](\tau) = \frac{\Gamma(\mathcal{L} + \mathcal{M})}{\Gamma(\mathcal{L})\Gamma(\mathcal{M})} \frac{\mathcal{L}}{\mathcal{M}m} \frac{\left(\frac{\mathcal{L}\tau}{\mathcal{M}m}\right)^{\mathcal{L}-1}}{\left(1 + \frac{\mathcal{L}\tau}{\mathcal{M}m}\right)^{\mathcal{L}+\mathcal{M}}} \tag{7}$$

où  $m$  est un paramètre d’échelle,  $\mathcal{L}$  et  $\mathcal{M}$  sont deux paramètres de forme.

Pour mettre en évidence la pertinence d'une telle modélisation, il est intéressant de réaliser une classification sur le type de modélisation de texture. Une telle classification est illustrée sur la figure 10. Elle se base sur l'estimation des log-cumulants d'ordre 2 et 3 et de leur classification dans le plan  $\kappa_2/\kappa_3$  (Nicolas, 2002). L'image de texture utilisée ici est extraite d'une acquisition TerraSAR-X sur le glacier d'Argentière dans le massif du Mont Blanc. La majorité des pixels de cet extrait d'image correspond bien à une loi de Fisher (en gris moyen figure 10).

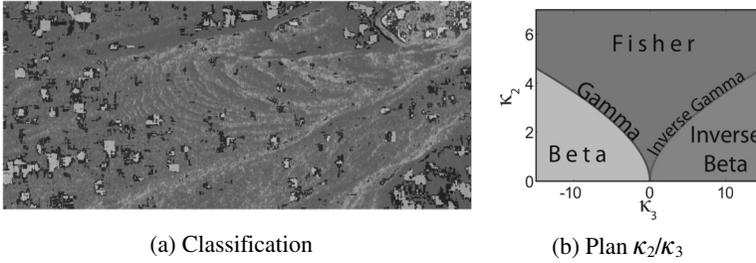


Figure 10. Modélisation de la texture : exemple de classification

La dernière étape de cette approche consiste à construire un critère de similarité basé sur la distribution du ratio des paramètres de textures issus de la décomposition SIRV. Le vecteur de déplacement est alors obtenu par une approche de type maximum de vraisemblance décrite dans (Harant *et al.*, 2011).

### 4.3. Application aux glaciers tempérés

Des premiers résultats ont été obtenus sur les glaciers de la vallée de Chamonix. Certains glaciers sont instrumentés avec des GPS continus. Ces GPS permettent de comparer les mesures de déplacements obtenues par imagerie satellitaire avec des mesures in-situ. Les trois méthodes présentées section 4.1 ont été mises en œuvre sur des images haute résolution du satellite TerraSAR-X. L'évaluation des résultats présentée dans (Fallourd *et al.*, 2011) a montré que le critère standard (ZNCC) offrait des performances comparables à celles de la méthode dédiée aux cibles isolées ou à la méthode UML sur les cibles distribuées. Elle offre l'avantage d'opérer simultanément sur les deux types de diffuseurs et de fournir une mesure de confiance (le niveau de corrélation) utilisable pour écarter les mesures totalement erronées.

Des déplacements globaux ont été calculés avec la fonction de similarité ZNCC sur l'ensemble des glaciers imagés par des couples TerraSAR-X ascendants et descendants afin de pouvoir reconstruire le déplacement 3D (Est, Nord, Vertical) lorsque les 4 projections du déplacement sont disponibles (selon les deux directions azimutales et les deux lignes de visée, cf. section 6). Le module des vecteurs de déplacement 3D ainsi obtenus est illustré figure 11.

La modélisation de texture et l'algorithme de suivi (section 4.2) ont été appliqués sur des images TerraSAR-X dual-pol (HH/HV) acquises sur le glacier d'Argentière dans le massif du Mont Blanc les 06/01/2009 et 08/02/2009. Une région d'intérêt a été choisie dans la zone basse du glacier (figure 12(a) haut) et offre différentes

configurations : une zone de crevasses assez raide ainsi qu'une partie plate et des bords de glacier. Le glacier s'écoule du coin supérieur droit au coin inférieur gauche de l'image. Les rives se situent dans les deux autres coins et sont bien entendu immobiles.

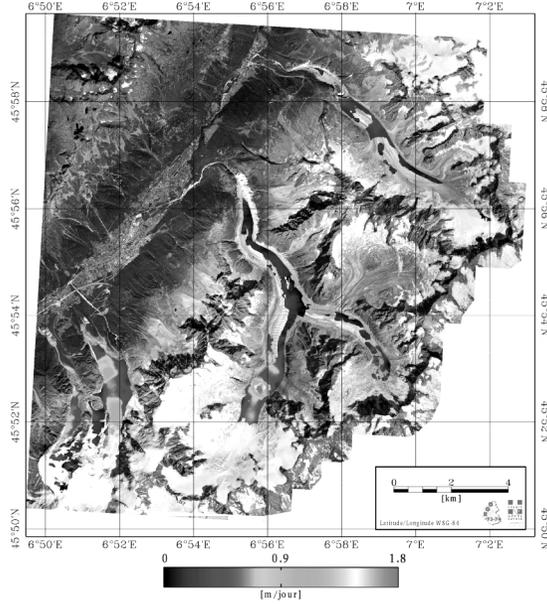
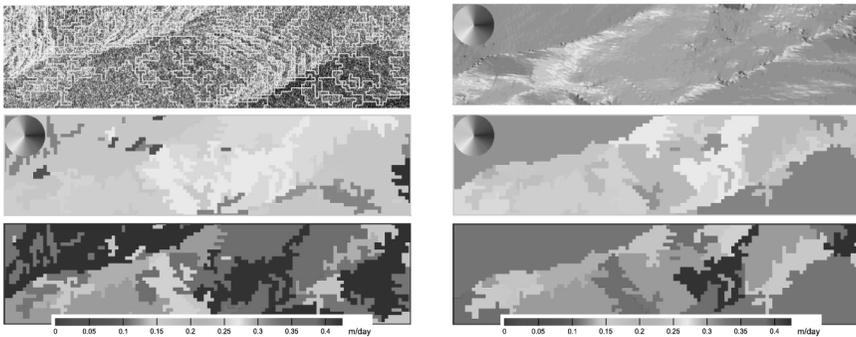


Figure 11. Déplacement 3D (module en m/jour) des glaciers de la vallée de Chamonix calculé à partir de couples d'images SAR haute résolution : données TerraSAR-X descendantes du 14 et 25/08/2009 et ascendantes du 16 et 27/08/2009



(a) segmentation initiale (haut), orientation estimée (milieu) et champ de vitesse dans la ligne de visée (bas)

(b) orientation vraie issue d'un MNT (haut), orientation estimée (milieu) et champ de vitesse dans la ligne de visée (bas)

Figure 12. Données TerrasAR-X dual-pol, 06/01/2009 - 08/02/2009. Estimation des vitesses de la surface du glacier d'Argentière avec segmentation hiérarchique. (a) Sans contrainte d'écoulement et (b) avec contrainte d'écoulement

L'algorithme a été appliqué sur les images de texture segmentées en 100 régions. Les résultats préliminaires de ce suivi de texture adaptatif sont présentés sur la figure 12. La complexité de la distribution du rapport de deux textures et de sa vraisemblance entrave la définition d'une mesure de qualité de la détection et rend la validation des résultats délicate. Toutefois ces résultats sont cohérents avec la réalité dans le sens où les bords du glacier ont une vitesse très faible alors que la zone crevassée présente une vitesse plus importante. La vitesse décroît ensuite sur la zone plate en aval. La figure 12(b) montre des résultats avec l'ajout d'une contrainte d'écoulement du glacier (ligne de plus grande pente). La carte d'orientation (figure 12(b), milieu) est beaucoup plus proche de la réalité dans ce cas, le champ de déplacement (bas) est peu modifié. Cette application de mesure de déplacement à la surface du glacier d'Argentière a permis de valider la modélisation de la texture (SIRV) et de mettre en évidence les améliorations apportées par la prise en compte de l'hétérogénéité statistique des images.

## 5. Détection de faibles déformations

L'interférométrie SAR a pour objet la mesure des différences de phase entre des images SAR acquises en configuration interférométrique à différentes dates. Ces différences de phases permettent de qualifier et de quantifier la déformation du sol au cours du temps sur de vastes zones géographiques, tout en garantissant une très haute précision (centimétrique en bande C). Les deux limitations principales de cette technique sont les changements de surface, qui réduisent la cohérence entre les images SAR, et les perturbations atmosphériques. La perte de l'information de phase est facilement détectable à l'aide d'un simple seuillage. En revanche, les perturbations atmosphériques sont difficilement séparables de la déformation du sol. Bien que la contribution liée à l'atmosphère stratifiée puisse être grossièrement estimée à l'aide de Modèles Numériques de Terrain (MNT) et de données météorologiques, les effets de l'atmosphère turbulente affectent en effet fortement les interférogrammes.

Différentes approches sont développées pour réduire ces difficultés. Par exemple, la technique des permanent scatterers (PS) (Ferretti *et al.*, 2001) s'appuie sur l'analyse du signal sur des cibles spécifiques tandis que la stratégie dite des Small Baseline Subsets (SBAS) (Berardino *et al.*, 2002) sélectionne les paires d'interférogrammes les plus fiables en fonction de bases spatiales et temporelles. La méthode STAMPS (Hooper, 2008) mélange ces approches. Ces méthodes sont utilisées par les géophysiciens pour surveiller les déformations de la surface des sols au fil du temps.

L'approche développée dans le cadre de ce projet s'appuie tout d'abord sur une préparation des données permettant d'enlever les variations de délai liées à la troposphère stratifiée (Cavalié *et al.*, 2007). Une technique de type SBAS est utilisée de façon à calculer l'évolution de la phase en fonction du temps. Cette préparation des données est décrite dans la partie 5.1. L'application d'une telle technique à une Série Temporelle d'Images Satellitaires (STIS) génère d'énormes volumes de données à analyser. De plus, ces données restent affectées par l'atmosphère turbulente. Nous avons alors développé une technique de fouille de données (*data mining*) (Julea *et al.*, 2011) pour analyser spatialement et temporellement les STIS

afin d'extraire les *Motifs Séquentiels Fréquents Groupés (MSFG)*. Ces motifs permettent de se concentrer sur la déformation du sol tout en rejetant l'information liée aux perturbations atmosphériques. L'extraction de ces motifs est présentée dans la partie 5.2. Les résultats expérimentaux issus de l'analyse d'une STIS couvrant la faille d'Haiyuan située à la limite nord-est du plateau tibétain sont détaillés dans la partie 5.3.

### 5.1. Traitement des séries temporelles

Les données sont tout d'abord préparées à l'aide d'une version avancée de l'approche SBAS (Lopez-Quiroz *et al.*, 2009). L'objectif de cette étape de traitement multitemporel de données InSAR est de calculer les mesures de déplacements du sol en prenant en compte les caractéristiques des données sans pour autant introduire une quelconque connaissance sur la déformation du sol étudiée. La chaîne de traitement inclut les étapes suivantes :

1) recalage des images SAR par rapport une même image maître et génération des interférogrammes avec un filtrage local adaptatif en portée afin d'éliminer les parties non recouvrantes des spectres des deux images,

2) inversion jointe des résidus orbitaux et des délais atmosphériques,

3) validation des corrections atmosphériques en utilisant le modèle global atmosphérique ERA40 (ECMWF) et correction de chaque interférogramme déroulé (Doin *et al.*, 09),

4) inversion de la série d'interférogrammes pour obtenir les incréments de délais radar en ligne de visée (*LOS, Line Of Sight*) entre les dates d'acquisition, en adaptant la technique SBAS (Jolivet *et al.*, 2011a ; Jolivet *et al.*, 2011b). Aucun moyennage n'est effectué. L'évolution de la phase ainsi obtenue suit la déformation du sol tout en restant polluée par les turbulences atmosphériques.

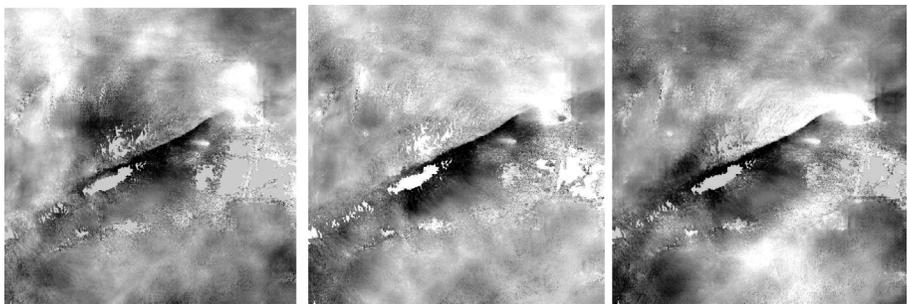


Figure 13. Déplacement LOS de la faille d'Haiyuan (Chine) pour 3 différentes dates : 21/09/2006 (1<sup>ère</sup> image), 28/02/2008 et 06/08/2009 (dernière image)

Cette chaîne de traitements a été appliquée à une STIS (aquisitions Envisat) couvrant la faille d'Haiyuan située à la limite nord-est du plateau tibétain. Cette zone a été affectée par de puissants tremblements de terre au début du XX<sup>e</sup> siècle. La

technique D-InSAR est dans ce cas utilisée pour localiser et mesurer de possibles déformations continues de la croûte terrestre. Un ensemble de 24 images SAR obtenues lors de passes ascendantes effectuées entre 2006 et 2009 a été utilisé pour générer 130 interférogrammes. Les 24 images de déplacement LOS résultant de l'inversion temporelle sont illustrées pour 3 différentes dates dans la figure 13.

## 5.2. Recherche de motifs spatiotemporels par fouille de données

Une fois que les données ont été préparées, celles-ci peuvent être explorées de façon à découvrir les structures spatiotemporelles pertinentes qui sont présentes dans une STIS InSAR. Cette étape de fouille de données utilise une technique automatique permettant d'explorer de grandes quantités de mesures affectées par le bruit, les traitements et les artefacts atmosphériques. L'objectif est d'extraire des *Motifs Séquentiels Fréquents Groupés (MSFG)* et de les présenter à l'utilisateur final afin d'attirer son attention sur des déplacements ou des évolutions de déplacements potentiellement inconnus.

Cette approche s'appuie sur l'extraction, au niveau pixel, d'évolutions et sous-évolutions. Une évolution de pixels est décrite en utilisant un motif séquentiel noté  $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_n$ , avec  $A_1, A_2, \dots, A_n$  des symboles représentant les états discrets des pixels pour  $n$  différentes dates qui ne sont pas nécessairement consécutives. Ces évolutions et sous-évolutions de pixels sont utilisées pour extraire, de façon non supervisée, des groupes de pixels pouvant être d'intérêt pour l'utilisateur final. De façon à produire des ensembles de pixels spatialement et temporellement significatifs, les ensembles ayant au moins  $\sigma$  pixels (i.e. une surface minimum) partageant la même évolution temporelle  $\alpha$  sont sélectionnés. Les pixels partageant  $\alpha$  sont dits *couverts* par  $\alpha$  et sont notés  $cov(\alpha)$ . La cardinalité  $|cov(\alpha)|$  est appelée la *support* de  $\alpha$  et notée  $support(\alpha)$ . Les pixels couverts par un motif doivent aussi dépasser une limite minimum de connexité  $\kappa$ . La mesure de connexité utilisée est appelée la *connexité moyenne*. Elle donne, pour les pixels couverts par  $\alpha$ , le nombre moyen de pixels voisins qui sont aussi couverts par  $\alpha$ . Les voisins sont pris dans un 8-voisinage.

Soit une *fonction de connexité locale*  $LC((x,y),\alpha)$  qui retourne, pour un pixel  $(x,y)$ , le nombre de voisins couverts par  $\alpha$ . La connexité moyenne de  $\alpha$ ,  $AC(\alpha)$ , est alors définie par :

$$AC(\alpha) = \frac{\sum_{(x,y) \in cov(\alpha)} LC((x,y),\alpha)}{|cov(\alpha)|}$$

Formellement, une évolution (ou sous-évolution)  $\alpha$  est sélectionnée si  $|cov(\alpha)| \geq \sigma$  et si  $AC(\alpha) \geq \kappa$ . Dans ce cas, elle est appelée *Motif Séquentiel Fréquent Groupé (MSFG)*. Ces contraintes peuvent être activement poussées au sein des algorithmes de fouille de données (e.g., (Agrawal *et al.*, 1995 ; Pei *et al.*, 2007)) pour élaguer l'espace de recherche et pour procéder à des extractions dans des conditions standards au niveau espace (mémoire) et temps d'exécution. Ces aspects opérationnels sont présentés dans (Julea *et al.*, 2010). Notre prototype, basé sur l'algorithme *PrefixGrowth* (Pei *et al.*, 2007), est écrit en C et utilise nos propres structures de données.

### 5.3. Application à la détection de mouvements intersismiques

Les 24 images de déplacement LOS ( $781 \times 501$  pixels) résultant de l'inversion temporelle (cf. partie 5.1) ont été fouillées de façon à extraire des MSFG (cf. partie 5.2). Les valeurs négatives correspondent à un mouvement d'éloignement par rapport au satellite, le long de la LOS. La série complète de déplacements a été considérée et les valeurs d'entrée ont été fortement quantifiées à l'aide de 3 symboles ('1', '2' et '3') en utilisant les 33<sup>e</sup> et 66<sup>e</sup> centiles. Le symbole '1' représente les fortes valeurs négatives, le symbole '2' correspond aux faibles valeurs négatives et le symbole '3' est lié aux valeurs positives. L'extraction de MSFG a été faite sur un PC portable standard (Intel Core i5 CPU M 520 @ 2.40 GHz, 4 GB de RAM, noyau linux 2.6.37) en réglant la limite de surface minimum  $\sigma$  à 100000 pixels et en imposant une limite minimum de connexité moyenne  $\kappa$  de 6 voisins. En environ une heure, 3413 MSFG ainsi que leurs mesures respectives de surface et de connexité moyenne ont été extraits. De façon à ne considérer que les motifs les plus spécifiques, les MSFG les plus longs ont été sélectionnés. Au final, 18 motifs avec 10 symboles et un motif avec 11 symboles ont été retenus.

Pour chaque motif, une image a été construite pour observer quels sont les pixels affectés par le motif considéré. Une palette de couleur a été appliquée pour indiquer la date à laquelle l'évolution a été complètement observée. Les dates de la série temporelle sont linéairement reliées à la palette de couleurs de la figure 14. Les couleurs rouges correspondent aux premières dates et les couleurs violettes aux dernières dates. Les résultats obtenus pour 2 MSFG 1,1,1,1,1,1,1,1,1 et 3,3,3,3,3,3,3,3,3,3, sont illustrés dans la figure 14. Au centre de l'image, en diagonale, le phénomène de glissement continu (fluage) le long de la faille, mis en évidence par les 2 MSFG, est cohérent avec un mouvement latéral sénestre. Des « arcs-en-ciel » peuvent être observés pour les 2 MSFG : ces évolutions de pixels se propagent donc à la fois dans l'espace et dans le temps. La propagation observée pour le MSFG 1,1,1,1,1,1,1,1,1 n'est pas radiale par rapport à la zone de fluage. Le déplacement de la zone de fluage le long de la faille peut expliquer un tel motif.

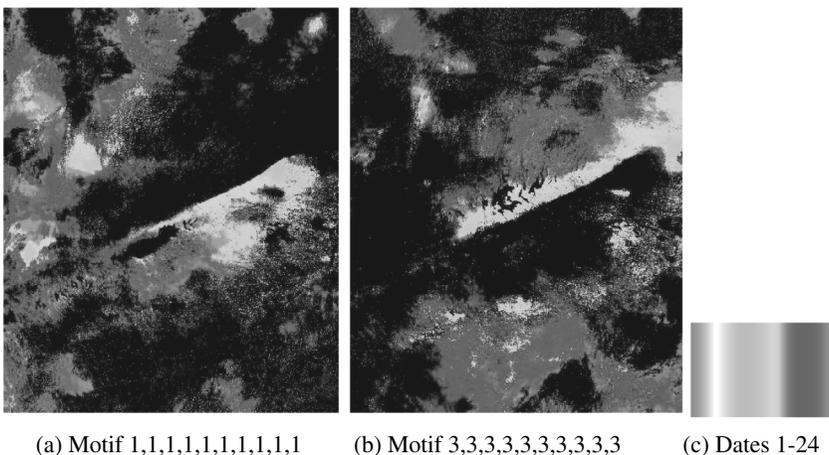


Figure 14. Localisation spatiotemporelle de 2 motifs séquentiels fréquents groupés

Ces résultats illustrent le potentiel d'une utilisation combinée de traitements D-InSAR multitemporels avancés et d'une technique de fouille de données. Les traitements InSAR permettent en effet de construire la série temporelle de déplacements, laquelle est explorée à l'aide d'une technique de fouille de données extrayant, en mode non supervisé, des structures spatiotemporelles correspondant à de lentes déformations du sol. L'approche SBAS avancée permet de réduire l'incertitude épistémique. L'extraction de motifs séquentiels fréquents groupés offre quant à elle aux utilisateurs finaux le moyen d'explorer de gros volumes de données, à la recherche d'évolutions temporelles pouvant être cachées par l'incertitude aléatoire.

## 6. Fusion et inversion de mesures de déplacement

Après traitement, un couple de données radar fournit, en général, des cartes de déplacement en surface, selon une, ou au mieux, deux directions spécifiques. Les techniques de corrélation d'amplitude permettent ainsi d'obtenir le déplacement dans la direction correspondant à la trajectoire du satellite et dans la direction correspondant à sa ligne de visée avec une précision de l'ordre du dixième de pixel (précision métrique à décimétrique). Quant à l'interférométrie différentielle, elle donne accès uniquement au déplacement dans la ligne de visée du satellite mais avec une bien meilleure précision (centimétrique voire millimétrique). En combinant différentes trajectoires d'acquisition (en particulier ascendante et descendante) il est donc possible, via inversion d'un système linéaire, d'obtenir le déplacement en surface en trois dimensions (généralement exprimé en composantes Nord, Est et verticale) (Wright *et al.*, 2004 ; Yan *et al.*, 2011). Ces trois composantes du déplacements sont parfois fournies, de manière indépendante et ponctuelle, par des mesures in situ (GPS par exemple).

Cependant les cartes de déplacement en trois dimensions en surface ne constituent pas l'information finale recherchée par les géophysiciens qui s'intéressent soit à la source en profondeur de ce déplacement (géométrie et distribution de déplacement d'une faille (Jónsson *et al.*, 2002 ; Pathier *et al.*, 2006), géométrie et variation de pression d'une intrusion magmatique (Fukushima *et al.*, 2005 ; Pedersen *et al.*, 2004)), soit à la rhéologie de la partie superficielle de la Terre (Cavalié *et al.*, 2007). Ces deux informations sont obtenues par inversion de modèles mécaniques qui sont le plus souvent non linéaires.

Dans les deux cas, estimation du déplacement de surface ou de la connaissance géophysique interne, se pose le problème de combiner au mieux des données souvent redondantes et d'incertitudes différentes et variées. La solution employée, le plus souvent, par les géophysiciens, consiste à inverser conjointement toutes les données disponibles avec différentes options de décimation des jeux de données et de pondération. Dans le cadre de ce projet, d'autres stratégies ont été testées qui pourraient permettre une meilleure gestion de l'incertitude non aléatoire.

### 6.1. Stratégies de combinaison

En vue de combiner les sources d'informations, plusieurs stratégies de fusion peuvent être envisagées. La plus communément employée est l'inversion jointe où

toutes les données disponibles sont inversées (figure 15a). La stratégie de pré-fusion (figure 15b) consiste à fusionner certaines données avant l'étape d'inversion. Avec cette stratégie, les différentes mesures agrégables sont groupées selon certains critères avant l'inversion, par exemple en calculant la moyenne, la médiane, la moyenne pondérée fournie par l'approche BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) ou en sélectionnant des mesures en fonction de leurs propriétés telles que l'incertitude, la confiance, etc. L'inversion est ensuite réalisée avec ces mesures pré-fusionnées. Une dernière stratégie qualifiée de post-fusion (figure 15c) consiste à fusionner les résultats obtenus après différentes inversions. Pour ce faire, on distingue plusieurs sous-groupes de mesures, entre lesquels les mesures sont indépendantes d'un groupe à l'autre. Puis une inversion est réalisée pour chaque sous-groupe et les différents résultats d'inversion sont fusionnés *a posteriori* selon une règle prédéfinie.

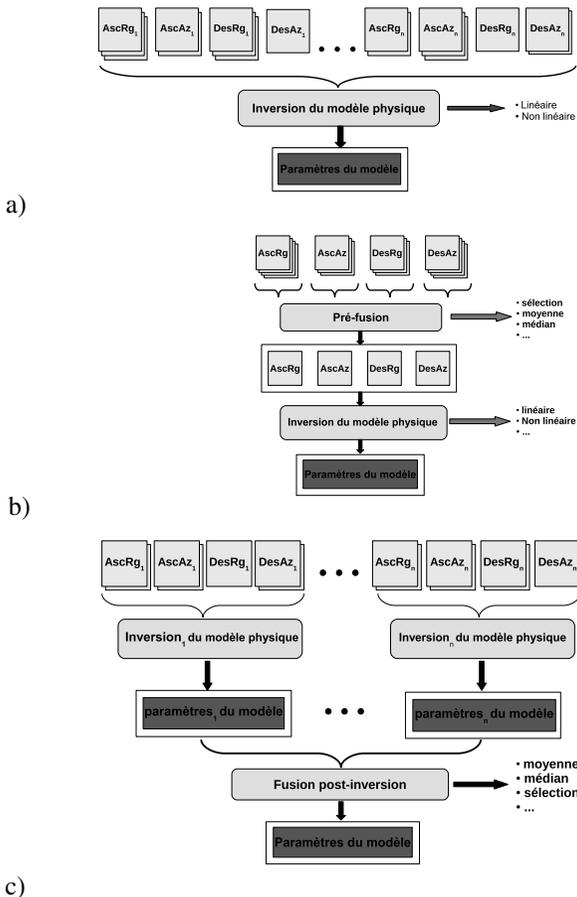


Figure 15. Différentes stratégies de fusion de données envisagées :  
 a) Inversion jointe; b) Pré-fusion; c) Post-fusion. Asc et Des : orbites ascendantes ou descendantes ; Az et Rg : mesure dans la direction azimutale ou la direction de visée (range)

## 6.2. Représentation des incertitudes

Dans le domaine des géosciences, comme dans beaucoup d'autres domaines, les paramètres d'un modèle (constantes, variables d'entrée ou de sortie) sont souvent connus de manière incertaine. Les diverses incertitudes rencontrées peuvent être classées en deux principaux types (une fois les valeurs aberrantes éliminées) :

- les incertitudes aléatoires provenant de la nature aléatoire du phénomène étudié et qui se traduisent par une variabilité des observations,
- les incertitudes épistémiques provenant d'un manque de connaissance sur le phénomène étudié ou de l'imperfection du capteur utilisé et qui se traduisent par une imprécision sur la valeur du paramètre considéré.

Le premier type d'incertitude est dit irréductible car intrinsèque au phénomène mais cela ne veut pas dire que l'incertitude sur la valeur du paramètre ne peut pas être réduite par des traitements statistiques adéquats. Le deuxième type peut être réduit uniquement par ajout de connaissances qui peuvent provenir d'autres sources d'information, entre autres d'experts. Pour ce qui concerne les mesures par images SAR, les incertitudes proviennent principalement des différentes perturbations générées le long du parcours de l'onde radar, du manque de connaissance sur les mécanismes de rétrodiffusion locaux ainsi que du bruit généré dans les traitements électroniques. Ces perturbations donnent lieu à des incertitudes aléatoires induites par exemple par le bruit de décorrélation, et à des incertitudes épistémiques induites par l'état de l'atmosphère, par l'imprécision de l'information orbitale et par des corrections imparfaites de certains paramètres.

### 6.2.1. Introduction des distributions de possibilités

Pour représenter les incertitudes aléatoires, la théorie des probabilités propose des méthodes et outils adéquats. Généralement une distribution gaussienne est utilisée, voire plus simplement la moyenne et l'écart-type car ces deux manières conduisent à des traitements relativement simples dans la propagation des incertitudes dans les situations fréquentes où nombre de données indépendantes sont massivement disponibles. La représentation probabiliste est moins adaptée aux incertitudes épistémiques pour lesquelles il est souvent difficile d'identifier une seule loi de probabilités. La représentation habituelle par un intervalle conduisant à une grande imprécision après propagation, une représentation par distributions de possibilités qui généralise l'intervalle tout en étant plus spécifique est alors intéressante. De plus, une distribution de possibilités permet de représenter une famille de lois de probabilités (Dubois *et al.*, 2004). Ceci autorise une représentation possibiliste également pour les incertitudes aléatoires, permettant de considérer des informations probabilistes partielles qui s'affranchissent d'hypothèses parfois difficiles à vérifier dans le contexte d'utilisation.

Dans l'objectif d'avoir à la fois une modélisation simple, facilement compréhensible par l'utilisateur, plus adaptée à la représentation de connaissances pauvres disponibles, et aussi moins soumise à des hypothèses trop simplificatrices, nous avons considéré dans ce projet l'utilisation de la théorie des possibilités pour le traitement des incertitudes. Introduite par L. Zadeh (Zadeh, 1978), la théorie des possibilités est associée à la théorie des sous-ensembles flous par la sémantique

d'incertitude qu'elle donne à la fonction d'appartenance. Une distribution de possibilités  $\pi$  est (dans le contexte de mesure physique) une application de l'ensemble des parties de  $\mathfrak{R}$  dans  $[0,1]$  telle que :  $\sup_{x \in \mathfrak{R}} \pi(x) = 1$ . Un degré de possibilité  $\pi(x)$  exprime l'absence de surprise sur le fait que la valeur  $x$  soit la valeur de la variable considérée (Dubois *et al.*, 1988). Différents types de distributions de possibilités allant de l'ignorance totale à la connaissance exacte sont illustrés figure 16.

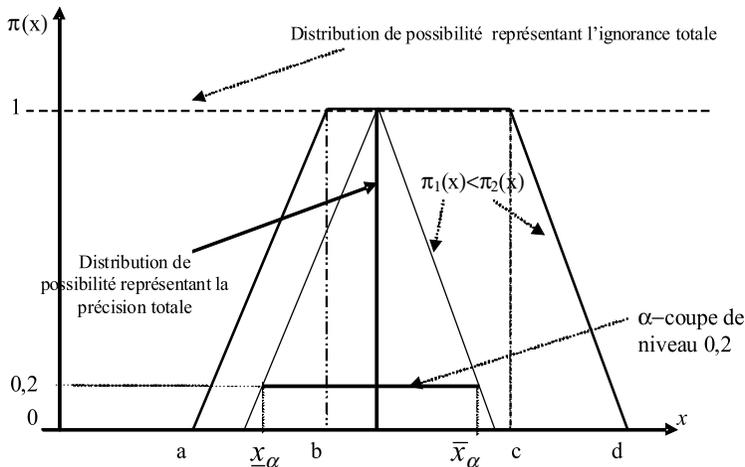


Figure 16. Exemples de distributions de possibilités

### 6.2.2. Traitements mis en œuvre sur les mesures de déplacement

Dans les problèmes pratiques étudiés, les différents types d'incertitude se présentent simultanément. C'est pourquoi nous avons mis en œuvre dans des applications du projet les deux approches : probabiliste (avec indépendance et loi de Gauss) et possibiliste. La mesure de déplacement en surface est obtenue par la méthode des moindres carrés généralisés appliquée à des données fournies par de la corrélation et l'interférométrie différentielle d'images SAR, sous la forme de valeurs nominales  $r_0$  et leurs incertitudes associées  $\sigma_0$  ( $\sigma_0$  est la pseudo-variance fournie par le logiciel ROI PAC qui modélise les effets aléatoires et épistémiques). Pour l'approche possibiliste nous avons considéré que les mesures étaient bornées, et modélisé celles-ci par des distributions de possibilités triangulaires de mode  $r_0$  et de support  $[r_0 - \sigma_0\sqrt{3}, r_0 + \sigma_0\sqrt{3}]$  (Dubois *et al.*, 2004). Une description paramétrique de l'incertitude peut être obtenue en prenant la largeur de la coupe à 50 % de la distribution de possibilité, *i.e.*  $\sigma_0\sqrt{3}$ .

Ensuite ces distributions ont été propagées dans le système linéaire correspondant à la solution des moindres carrés généralisés. Dans le cas général, la propagation de distributions de possibilités par une fonction de la forme  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$  se base sur le principe d'extension de Zadeh (Zadeh, 1978), (Dubois *et al.*, 1988) :

$$\pi_Y(y) = \sup_{(x_1, \dots, x_n) / f(x_1, \dots, x_n) = y} (\min(\pi_1(x_1) \dots \pi_n(x_n)))$$

Ce théorème est très général et constitue le pendant possibiliste du produit de convolution probabiliste. Il s'applique à toutes les formes de distribution, même multimodale, il est aussi la base du calcul avec des ensembles flous appelé arithmétique floue. Dans le cas des fonctions arithmétiques de base (somme, soustraction, multiplication par un scalaire) et de distributions linéaires par morceaux telles que les fonctions triangulaires utilisées, la sup-min convolution possibiliste se simplifie car la forme linéaire par morceaux se conserve.

### 6.3. Exemple du séisme du Cachemire (2005)

L'application pratique de la propagation des incertitudes dans les différentes stratégies et avec les différentes approches (classique versus floue) a été effectuée sur le cas du séisme du Pakistan d'octobre 2005 (Pathier *et al.*, 2006). Une inversion linéaire des mesures de déplacement obtenues par corrélation d'amplitude et interférométrie radar différentielle est réalisée dans le but de reconstruire le déplacement en trois dimensions en surface.

Cette application a montré des conclusions similaires aux tests synthétiques effectués par ailleurs (Yan *et al.*, 2011). Traiter la propagation des incertitudes avec l'approche conventionnelle ou l'approche possibiliste conduit à favoriser des stratégies de fusion différentes. Il en découle que le choix de la stratégie de fusion est dépendant de la nature de l'incertitude présente dans les données. L'approche conventionnelle adaptée aux incertitudes de type aléatoire favorise l'inversion jointe qui permettra une réduction optimale de l'incertitude sur les résultats. Dans le cas de données réelles contenant potentiellement des incertitudes épistémiques, on peut considérer que l'approche conventionnelle fournit une incertitude sur les résultats obtenus qui est sous-estimée alors que l'approche floue propose une incertitude qui est, au contraire, sur-estimée mais plus robuste.

Par ailleurs, le déplacement 3D de surface obtenu par inversion linéaire a été comparé à celui obtenu par inversion non-linéaire d'un modèle direct mécanique (Yan *et al.*, 2012). Les données de déplacement obtenues par corrélation d'amplitude et interférométrie radar différentielle ont été inversées en utilisant un modèle de dislocation dans un milieu élastique, homogène et uniforme (Okada, 1985) afin d'obtenir les paramètres géométriques (localisation, orientation, taille et amplitude du glissement) caractérisant la faille à l'origine du déplacement de surface. Une distribution de ces paramètres a été obtenue en bruitant les données et en réalisant une série de 1000 inversions. Les caractéristiques du bruit ajouté (bruit blanc pour les données de corrélation et bruit spatialement corrélé pour les données d'interférométrie) ont été déterminées sur un jeu de données pré-sismiques caractérisé par une absence de déplacement. Pour chaque jeu de paramètres de faille obtenu, le déplacement 3D en surface a été recalculé ce qui a fournit une distribution du déplacement 3D en surface obtenue par une inversion non-linéaire. Cette distribution a été traduite sous la forme d'une distribution de possibilité triangulaire et symétrique.

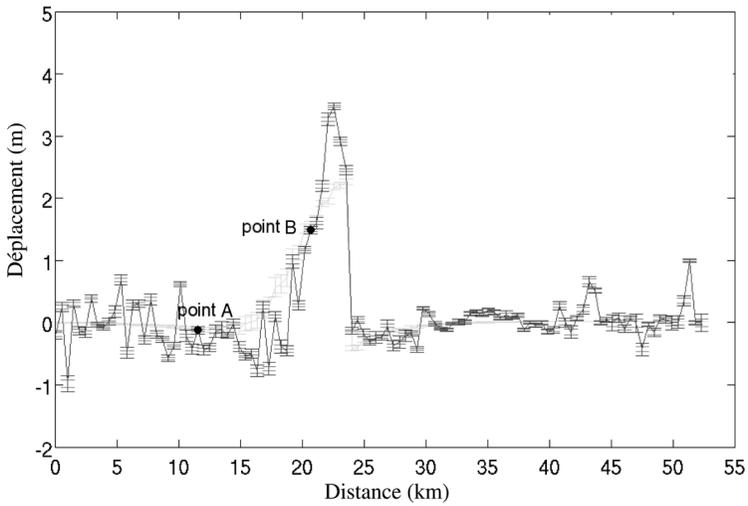


Figure 17. Composante verticale du déplacement de surface et incertitudes associées pour différentes méthodes : inversion linéaire avec incertitude probabiliste (rouge), inversion linéaire avec incertitude possibiliste (bleu) et inversion non-linéaire (vert)

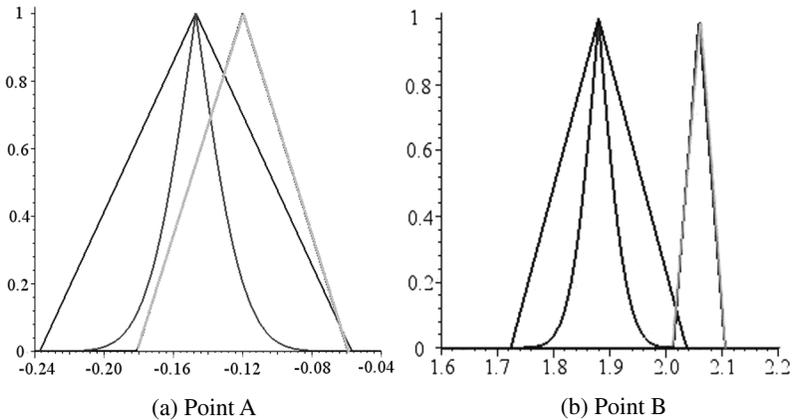


Figure 18. Distributions de possibilités pour la composante verticale du déplacement de surface en deux points particuliers pour différentes méthodes : inversion linéaire avec incertitude probabiliste (rouge), inversion linéaire avec incertitude possibiliste (bleu) et inversion non linéaire (vert).  
Le point A est situé loin de la faille alors que le point B est proche

La figure 17 présente la composante verticale du déplacement de surface et les incertitudes associées pour les différentes méthodes (inversion linéaire avec incertitude probabiliste, inversion linéaire avec incertitude possibiliste et inversion non-linéaire) le long d'un profil traversant la faille. Le déplacement issu de l'inversion non-linéaire est, par construction, corrélé spatialement contrairement au déplacement issu de l'inversion linéaire. L'accord est relativement bon surtout lorsqu'on s'éloigne de la faille. L'incertitude possibiliste plus élevée assure une meilleure adéquation des résultats. La figure 18 montre les distributions de possibilités pour 2 points particuliers de ce profil et illustre le fait que la distribution possibiliste permet une meilleure intersection entre le résultat issu de l'inversion linéaire et celui issu de l'inversion non-linéaire.

## 7. Conclusions et perspectives

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet ont permis des avancées significatives dans l'exploitation des séries temporelles importantes issues de la première génération de satellites radar (ERS et Envisat), ainsi que dans le traitement des données SAR haute résolution ou polarimétriques issues de la seconde génération (TerraSAR-X et Radarsat-2). Les résultats ont été obtenus en lien avec les problématiques posées par l'observation de la Terre par télédétection radar, en particulier dans les domaines de la cryosphère (caractérisation de la rétrodiffusion de milieu neige/névé/glace et mesure du déplacement des glaciers) et de la géophysique (suivi des déformations de surface, inversion de modèle de faille...).

Les méthodes développées au sein du projet ont été regroupées dans une API (*Applications Programming Interface*) nommée « EFIDIR\_tools », distribuée sous forme de logiciel libre sous licence GPL. Ces méthodes ont été testées sur des jeux de données satellitaires acquis sur différents sites test présentant un intérêt particulier du point de vue méthodologique ou géophysique. La plupart de ces séries d'images ont été regroupées dans une base de données expérimentales destinées à poursuivre/tester les développements et capitaliser les résultats.

Les satellites de la « troisième » génération, en particulier Sentinel I prévu pour 2013, vont encore accroître le volume de données SAR disponibles pour l'observation de la Terre, avec deux principes favorables à l'utilisation massive de cette source d'informations : la répétitivité des acquisitions et la gratuité des données. Selon les prochaines missions scientifiques retenues, les données satellitaires radar devraient également exploiter de nouvelles bandes de fréquences, en particulier la bande P pour l'observation de la forêt à l'aide de données polarimétriques et la bande Ku pour la cryosphère.

Les progrès potentiels viendront des techniques d'extraction et de fusion d'informations, mais plus particulièrement de notre capacité à transformer la masse de données satellitaires en informations fiables et exploitables dans les modèles développés en géosciences. Au delà de l'amélioration des chaînes de traitement classiques, les prochains travaux accorderont une place croissante à la représentation et la gestion des incertitudes liées aux données et à la modélisation. Des verrous importants doivent encore être levés pour rendre opérationnelle l'assimilation de mesures issues des images SAR dans des modèles physiques permettant de comprendre les phénomènes observés et prédire les évolutions, travaux à mener en collaboration étroite entre le domaine des STIC et celui des Sciences de la Terre.

### Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet EFIDIR financé par l'Agence Nationale pour la Recherche (projet ANR-07-MDCo-04, Masse de Données et Connaissances, édition 2007). Ce projet de recherche académique regroupe 6 partenaires : le LISTIC (Polytech Annecy-Chambéry, Université de Savoie), coordonnateur, les laboratoires IETR (Université de Rennes), GIPSA-lab (INP Grenoble), LTCI (Télécom Paris-Tech), ISTerre (Université de Savoie et Université Joseph Fourier) et le laboratoire de Géologie de l'ENS Paris.

Les auteurs souhaitent remercier l'ensemble des partenaires qui ont contribué à ce projet, en particulier : Ph. Bolon, S. Galichet, F. Ledo, A. Julea, D. Rosu et H.-T. Pham (LISTIC, U. Savoie), S. Allain et E. Pottier (IETR, U. Rennes-1), G. Vasile, L. Ott et D. Faure-Vincent (GIPSA-lab, INPG), F. Tupin (LTCI, Télécom Paris-Tech), E. Pathier, A. Walpersdorf et F. Lodge (ISTerre, UJF), P. Briole, S. Guillaso et S. Martz (Laboratoire de Géologie de l'ENS), ainsi que B. Fruneau (U. Marne-la-Vallée), F. Jouanne (ISTerre, U. Savoie) et L. Moreau (EDYTEM, U. Savoie) pour leur expertise. Ces travaux ont également bénéficié du soutien de l'Assemblée des Pays de Savoie et d'un ensemble de données satellitaires fournies par l'agence spatiale européenne (ESA) et l'agence spatiale allemande (DLR, projet MTH0232).

### Bibliographie

- Agrawal R., Srikant R. (1995). « Mining sequential patterns », in P. S. Yu, A. S. P. Chen (eds), *Proc. of the 11th International Conference on Data Engineering (ICDE'95)*, IEEE Computer Society Press, Taipei, Taiwan, p. 3-14.
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. (2002). « A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, p. 2375-2382.
- Berthier E., Vadon H., Baratoux D., Arnaud Y., Vincent C., Feigl K., Rémy F., Legrésy B. (2005). « Mountain glaciers surface motion derived from satellite optical imagery », *Remote Sensing Environ.*, vol. 95, no. 1, p. 14-28.
- Bombrun L., Vasile G., Gay M., Totir F. (2010). « Hierarchical Segmentation of Polarimetric SAR Using Heterogeneous Clutter Models », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- Cavalié O., Doin M.-P., Lasserre C., Briole P., « Ground motion measurement in the Lake Mead area (Nevada, USA), by DInSAR time series analysis : probing the lithosphere rheological structure », *Journal of Geophysical Research*, 2007. B03403, doi : 10.1029/2006JB004344.
- Chatelain F., Tourneret J., Inglada J., Ferrari A. (2007). « Bivariate gamma distributions for image registration and change detection », *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 16, no. 7, p. 1796-1806.
- Dennis M. (2001). Topological singularities in wave fields., PhD thesis, University of Bristol.
- Doin M.-P., Lasserre C., Peltzer G., Cavalié O., Doubre C. (2009). « Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry : validation with global atmospheric models », *Journal of Applied Geophysics*, vol. 69, no. 1, p. 35-50.

- Dubois D., Foulloy L., Mauris G., Prade H. (2004). « Probability-possibility transformations, triangular fuzzy sets and probabilistic inequalities », *International Journal on Reliable Computing*, vol. 10, no. 4, p. 273-297.
- Dubois D., Prade H. (1988). *Possibility theory : An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*, Plenum Press.
- Erten E., Reigber A., Hellwich O. (2009). « Glacier velocity monitoring by maximum likelihood texture tracking », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 2, p. 394-405.
- Fallourd R., Harant O., Trouvé E., Nicolas J.-M., Gay M., Walpersdorf A., Mugnier J.-L., Serafini J., Rosu D., Bombrun L., Vasile G., Cotte N., Vernier F., Tupin F., Moreau L., Bolon P. (2011). « Monitoring Temperate Glacier Displacement by Multi-Temporal TerraSAR-X Images and Continuous GPS Measurements », *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS)*, vol. 4, no. 2, p. 372-386.
- Fallourd R., Nicolas J.-M., Trouvé E., Tupin F. (2009). « La phase en imagerie cohérente : application au suréchantillonnage d'images RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) », *22<sup>e</sup> colloque GRETSI sur le Traitement du Signal et des Images*, Dijon, France, p. 4 pages, September.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001). « Permanent scatterers in SAR interferometry », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 1, p. 8-20.
- Fukushima Y., Cayol V., Durand P. (2005). « Finding realistic dyke models from interferometric synthetic aperture radar data : The February 2000 eruption at Piton de la Fournaise », *Journal of Geophysical Research*. B03206, doi :10.1029/2004JB003268.
- Gini F., Lombardini F. (2005). « Multibaseline crosstrack SAR interferometry : a signal processing perspective », *Aerospace and Electronic Systems Magazine*, IEEE, vol. 20, no. 8, p. 71-93, Aug..
- Goodman J. (2007). *Speckle phenomena in optics : Theory and applications*, Roberts & Company.
- Hallikainen M., Pulliainen J., Praks J., Arslan A. (2001). « Progress and challenges in radar remote sensing of snow », *Proc. 3rd international symposium on the retrieval of bio- and geophysical parameters for SAR data land applications*, ESA SP-475, p. 185-192, Sep.
- Harant O., Bombrun L., Vasile G., Ferro-Famil L., Gay M. (2011). « Displacement Estimation by Maximum Likelihood Texture Tracking », *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 5, no. 3, p. 398-407.
- Hooper A. (2008). « A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches », *Geophysical Research Letters*.
- Jolivet R., Lasserre C., Doin M.-P., Guillaso S., Peltzer G., Dailu R., Sun J. (2011a). « Shallow creep on the Haiyuan Fault, Gansu, China, revealed by SAR Interferometry », *International Journal in Remote Sensing*.
- Jolivet R., Lasserre C., Doin M.-P., Peltzer G., Dailu R., Sun J. (2011b). « Temporal variations of the creep rate along a millennial seismic gap on the Haiyuan fault, China », *Geophysical Journal International*.
- Jónsson S., Zebker H., Cervelli P., Segall P., Garbeil H., Mouginiis-Mark P., Rowland S. (2002). « Fault slip distribution of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake, estimated from satellite radar and GPS measurements », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 92, p. 1377-1389.

- Joughin I. R., Kwok R., Fahnestock M. A. (1998). « Interferometric estimation of three-dimensional ice-flow using ascending and descending passes », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, p. 25-37.
- Julea A., Méger N., Bolon P., Rigotti C., Doin M.-P., Lasserre C., Trouvé E., Lazarescu V. (2011). « Unsupervised Spatiotemporal Mining of Satellite Image Time Series Using Grouped Frequent Sequential Patterns », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 4, p. 1417-1430, April.
- Julea A., Méger N., Rigotti C., Doin M.-P., Lasserre C., Trouvé E., Bolon P., Lazarescu V. (2010). « Extraction of Frequent Grouped Sequential Patterns from Satellite Image Time Series », *Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2010)*, Honolulu, Hawaii, USA, p. 3434-3437.
- Longepe N., Allain S., Ferro-Famil L., Pottier E., Durand Y. (2009). « Snowpack Characterization in Mountainous Regions Using C-Band SAR Data and a Meteorological Model », *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 47, no. 2, p. 406-418, Feb.
- Lopez-Quiroz P., Doin M.-P., Tupin F., Briole P., Nicolas J.-M. (2009). « Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry », *Journal of Applied Geophysics*.
- Maître H. (2001). *Traitement des images de RSO*, HERMES Science Publications edn.
- Massonnet D., Feigl K. (1988). « RADAR interferometry and its application to changes in the Earth's surface », *Rev. Geophys.*, vol. 36, no. 4, p. 441-500.
- Mattar K. E., Vachon P. W., Geudtner D., Gray A. L., Cumming I. G., Brugman M. (1998). « Validation of alpine glacier velocity measurements using ERS tandem-mission SAR data », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, p. 974-984.
- Michel R., Avouac J., Taboury J. (1999). « Measuring ground displacements from SAR amplitude images : application to the Landers Earthquake », *Geophysical Research Letters*, vol. 26, no. 7, p. 875-878.
- Nagler T., Rott H. (2000). « Retrieval of wet snow by means of multitemporal SAR data », *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 38, no. 2, p. 754-765, mar.
- Nakamura K., Doi K., Shibuya K. (2007). « Estimation of seasonal changes in the flow of Shirase glacier using JERS-1/SAR image correlation », *Polar Science*, vol. 1, no. 2-4, p. 73-83.
- Nicolas J. (2002). « Introduction aux statistiques de deuxième espèce : applications des Log-moments et des Log-cumulants à l'analyse des lois d'images radar – Introduction to second kind statistics : application of Log-moments and Log-cumulants to SAR image distribution analysis », *Traitement du Signal*, vol. 19, no. 3, p. 139-167.
- Okada Y. (1985). « Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space », *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 75, p. 1,135-1,154.
- Pascal F., Foster P., Ovarlez J., Lazarbal P. (2008). « Performance Analysis of covariance Matrix Estimates in Impulsive Noise », *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 6, p. 2206-2216.
- Pathier E., Fielding E. J., Wright T. J., Walker R., Parsons B. E., Hensley S. (2006). « Displacement field and slip distribution of the 2005 Kashmir earthquake from SAR imagery », *Geophysical Research Letters*.

- Pedersen R., Sigmundsson (2004). « InSAR based sill model links spatially offset areas of deformation and seismicity for the 1994 unrest episode at Eyjafjallajökull volcano, Iceland », *Geophysical Research Letters*, vol. 31, p. L14610, doi :10.1029/2004GL0202368.
- Pei J., Han J., Wang W. (2007). « Constraint-based sequential pattern mining : the pattern-growth methods », *Journal of Intelligent Information Systems*, vol. 28, no. 2, p. 133-160.
- Rott H., Cline D., Duguay C., Essery R., Haas C., Macelloni G., Malnes E., Pulliainen J., Rebhan H., Yueh S. (2008). « CoReH2O : A Ku- and X-Band SAR Mission for Snow and Ice Monitoring », *Proc. EuSAR*, p. 1-4, june.
- Serafino F. (2006). « SAR image coregistration based on isolated point scatterers », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 3, no. 3, p. 354-358.
- Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K., M. T., Miller H. (2007). *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Technical report, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Strozzi T., Luckman A., Murray T., Wegmuller U., Werner C. (2002). « Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 11, p. 2384-2391.
- Trouvé E., Vasile G., Gay M., Bombrun L., Grussenmeyer P., Landes T., Nicolas J., Bolon P., Petillot I., Julea A., Valet L., Chanussot J., Koehl M. (2007). « 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, p. 905-923.
- Wright T. J., Parsons B. E., Lu Z. (2004). « Towards mapping surface deformation in three dimensions using InSAR », *Geophysical Research Letters*. doi :10.1029/2003GL018827.
- Yan Y., Mauris G., Trouvé E., Pinel V. (2012). « Fuzzy uncertainty representations of coseismic displacement measurements issued from SAR imagery », *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (to appear).
- Yan Y., Trouvé E., Pinel V., Mauris G., Pathier E., Galichet S. (2011). « Fusion of D-InSAR and sub-pixel image correlation measurements for coseismic displacement field estimation : Application to the Kashmir earthquake (2005) », *International Journal of Image and Data Fusion*, vol. To Appear, p. DOI :10.1080/19479832.2011.577563.
- Zadeh L. A. (1978). « Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility », *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 1, no. 1, p. 3-28.
- Zitová B., Flusser J. (2003). « Image registration methods : a survey », *Image and Vision Computing*, vol. 21, no. 11, p. 977-1000.



**Emmanuel Trouvé**, Professeur des Universités en 2008 à l'Université de Savoie, enseigne à Polytech Annecy-Chambéry et fait partie du Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC). Ses travaux de recherche portent sur le traitement des images radar et les applications en géosciences.



**Jean-Marie Nicolas** est actuellement Professeur au département TSI de Télécom ParisTech, Paris, France et fait partie du Laboratoire de Traitement et Communication de l'Information (LTCI). Ses travaux de recherche concernent principalement l'imagerie radar.



**Laurent Ferro-Famil**, Professeur des Universités en 2011, à l'Université de Rennes 1, fait partie du groupe de recherche en télédétection radar polarimétrique de l'Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes. Ses activités en matière d'enseignement concernent l'électronique analogique, les communications numériques, les microondes, le traitement du signal et la télédétection radar. Il s'intéresse particulièrement au traitement du signal SAR polarimétrique, à la théorie de la polarimétrie radar, ainsi qu'à la télédétection d'environnements naturels à partir de données SAR polarimétriques et interférométriques multi-bases, avec des applications en classification, modélisation de la diffusion électromagnétique, estimation de paramètres géo-physiques, analyse temps-fréquence et pour la reconstruction 3-D d'environnements.



**Michel Gay**, depuis 2004, est Ingénieur de Recherche CNRS au laboratoire Grenoble Image Parole Signal Automatique, à Saint-Martin-d'Hères. Ses travaux de recherche portent sur le traitement des images Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO), appliqués à la surveillance des glaciers.



**Virginie Pinel**, depuis 2004, est Chargé de Recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Ses principaux axes de recherche concernent l'application des données SAR à l'étude des déformations du sol en région volcanique ainsi que la modélisation du transport et du stockage de magma.



**Marie-Pierre Doin**, ancienne élève de l'Ecole Normale Supérieure (Ulm) en 1992, est spécialisée en sciences de la Terre. Depuis 1996, elle travaille comme chercheur CNRS au Laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure (Ulm, Paris). Ses intérêts de recherche ont longtemps porté sur la structure thermique de la lithosphère, la subsidence des bassins océaniques et continentaux, l'interaction convective entre lithosphère et asthénosphère, et la déformation de la lithosphère dans les zones de subduction. Elle développe maintenant des méthodes d'analyse en série temporelle de données interférométriques RSO afin de contraindre le comportement mécanique de la lithosphère en réponse à des sollicitations anthropiques ou autour de failles.



**Nicolas Méger** est, depuis 2005, Maître de Conférences à l'Université de Savoie, au Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC). Son activité de recherche concerne la fouille de données temporelle, spatiotemporelle et le traitement d'images satellitaires.



**Cécile Lasserre** est Chargée de Recherche au CNRS depuis 2002, au Laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure de Paris jusqu'en 2008, et maintenant à l'Institut des Sciences de la Terre de Grenoble (Université Joseph Fourier). Ses travaux de recherche portent sur l'étude des failles actives pour l'estimation de l'alea sismique et la compréhension du cycle sismique, en s'appuyant sur les observations tectoniques et géodésiques (GPS, InSAR).



**Gilles Mauris** est actuellement Maître de Conférences à l'IUT d'Annecy et au Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC) de Polytech Annecy-Chambéry Université de Savoie. Ses travaux de recherche concernent le développement et la mise en œuvre de méthodes floues et possibilistes pour la représentation et la fusion d'informations.



**Flavien Vernier**. Depuis septembre 2006, il occupe un poste de Maître de Conférences au laboratoire LISTIC de l'université de Savoie, France. Ses domaines de recherches portent sur le calcul parallèle et distribué, l'algorithmique numérique et le traitement d'images.



**Renaud Fallourd** est actuellement en thèse de doctorant à l'Université de Savoie, Polytech Annecy-Chambéry, au Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC) en collaboration avec le Laboratoire Traitement et Communication de l'Information (LTCI), Telecom ParisTech. Ses thèmes de recherche sont le traitement d'image SAR et la photogrammétrie appliqués au suivi des glaciers alpins.



**Yajing Yan** est en thèse actuellement au Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC) en collaboration avec le laboratoire ISTERre (Institut des Sciences de la Terre), Université de Savoie. Elle travaille sur la fusion de mesures de déplacement et la modélisation géophysique. Ses axes de recherches comprennent le traitement d'images SAR, la fusion de mesures de déplacement dans les systèmes linéaire et non linéaire, la gestion de l'incertitude, et la modélisation géophysique.



**Olivier Harant** est actuellement en thèse dans l'équipe SAR, Polarimétrie, Holographie, Interférométrie et Radargrammétrie (SPAHIR) à l'Institut d'Electronique et Télécommunication de Rennes et en collaboration avec le laboratoire Grenoble Image, Parole, Signal et Automatique (GIPSA-lab). Ses domaines de recherche sont la modélisation de données polarimétriques RSO et le suivi des glaciers.



**Romain Jolivet** est actuellement en thèse. Ses travaux portent sur l'étude des variations spatiales et temporelles des déformations interismiques le long d'un décrochement majeur situé au nord-est du plateau tibétain à l'aide d'interférométrie SAR, sous la direction de Andrea Walpersdorf et Cécile Lasserre. Cette étude lui a permis de s'intéresser aux développements méthodologiques en interférométrie pour la mesure de petits déplacements.