

Document public



Potentiel de l'interférométrie radar en matière de détection et de suivi de mouvements de terrain de grande ampleur sur l'île de La Réunion Etude de faisabilité à partir d'images RADARSAT

BRGM/RP-52091-FR
Février 2003

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche 2002-RIS-R10

D. RAUCOULES, C. CARNEC, M. CRUCHET
Avec la collaboration de
C. Delacourt, S. Le Mouelic

89 3740 46 625 5



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Potential de l'interférométrie radar pour la détection et le suivi de mouvements de terrain de grande ampleur sur l'île de La Réunion

Mots clés : mouvements de terrains, interférométrie radar, Radarsat, Ile de La Réunion, France.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

D. Raucoules, C. Carnec, M. Cruchet avec la collaboration de C. Delacourt, S. le Mouelic (2003) – Potentiel de l'interférométrie radar en matière de détection et de suivi de mouvements de terrain de grande ampleur sur l'île de La Réunion - Etude de faisabilité à partir d'images RADARSAT. Rapport BRGM/RP-52091-FR. 28 pages. 15 figures. 3 tableaux.

Potential de l'interférométrie radar pour la détection et le suivi de mouvements de terrain de grande ampleur sur l'île de La Réunion

Synthèse

Ce rapport décrit les résultats d'une étude par interférométrie radar visant à détecter les mouvements de terrain de grande ampleur sur l'île de La Réunion à partir d'images radar acquises entre 1999 et 2002 par le satellite canadien RADARSAT.

Des signatures de déformations ont pu être mises en évidence sur plusieurs secteurs de l'île, notamment à proximité de la rivière des Remparts, sur le Piton de la Fournaise, ainsi que sur les cirques de Salazie et Mafatte. Néanmoins, compte tenu de la faible cohérence des interférogrammes et de forts artefacts atmosphériques, les mouvements détectés sur le secteur des cirques resteront à confirmer au cours des étapes suivantes du projet.

Parallèlement, un test de corrélation sub-pixelique sur les images d'intensité radar est en cours avec le corrélateur du logiciel Gamma. Si les limitations de cet outil pour la détection de glissements de terrains à partir d'images radar sont manifestes, en revanche la corrélation d'images haute résolution optique, spatiale (SPOT V) ou aérienne, reste prometteuse, en particulier pour la cartographie des déplacements horizontaux.

Forts de ces premiers constats, d'autres pistes sont envisagées, notamment la génération de produits interférométriques à partir de radar à plus basse fréquence offrant un pouvoir de pénétration du couvert végétal plus adapté au contexte environnemental de l'île.

SOMMAIRE

1. Introduction	7
2. Données acquises et combinaisons interférométriques générées	8
3. Modèles Numériques de Terrain nécessaires au traitement - limites géographiques	9
4. Produits interférométriques	10
4.1. Image d'intensité	10
4.2. Image de cohérence	11
4.3. Interférogrammes (images des phases)	13
4.4. Analyse des résultats	16
5. Secteur des cirques	17
5.1. Identification des signatures de phase	17
5.2. Analyse des résultats	22
6. Tests de corrélation	24
6.1. données	24
6.2. Analyse des résultats	25
7. Conclusion et perspectives	28

Liste des illustrations

FIGURES

Fig. 1 : image d'intensité moyenne	11
Fig. 2 : cohérence de la paire 29198(08/06/2001)-29884(26/07/2001)	12
Fig. 3 : interférogramme 29198(08/06/2001)-29884(26/07/2001)	14
Fig. 4 : interférogramme 19594(06/08/1999)-21995(21/01/2000)	15
Fig. 5 : agrandissements sur le secteur de la rivière des Remparts.....	16
Fig. 6 : interférogramme 29198(08/06/2001)-29884(26/07/2001) et ortho-photo	18
Fig. 7 : extrait de l'interférogramme 29198(08/06/2001)-29884(26/07/2001).	19
Fig. 8 : interférogramme 19594(06/08/1999)-21995(21/01/2000) et ortho-photo	20
Fig. 9 : interférogramme 28855(15/05/2001)-31599(23/11/2001) et ortho-photo	21
Fig. 10 : interférogramme 24053(13/06/2000)-29198 (21/01/2000) et ortho-photo	22
Fig. 11 : secteur SW de Mafatte (A)	23
Fig. 12 : secteur Piton des Neiges (F)	23
Fig. 13 : moyenne des 3 plus anciennes images d'intensité et des 3 plus récentes.....	25
Fig. 14 : décalages - fenêtres de corrélation de 64 pixels	26
Fig. 15 : décalages - fenêtres de corrélation de 128 pixels	27

TABLEAUX

Tableau 1 : Images acquises et combinaisons interférométriques produites.	8
Tableau 2 : localisation des signatures de mouvements observées.	17
Tableau 3 : statistiques sur les résultats de corrélation	25

1. Introduction

La prévention des mouvements de terrain est l'une des préoccupations majeures en matière de sécurité civile et de protection de l'environnement. De part leurs caractéristiques exceptionnelles et la complexité des phénomènes qui les régissent, l'étude des glissements de terrain requiert d'élargir les moyens d'investigation usuels. L'amélioration des techniques spatiales répond de mieux en mieux à ces questions.

L'accès aux images issues des récents systèmes Haute Résolution et de leurs produits topographiques numériques dérivés (MNT) de type SPOT 5 devraient permettre, par une approche quantitative, l'amélioration de la détection des indices morphologiques d'instabilité du milieu naturel. Dans le domaine de la cartographie des déplacements de surface à grande échelle, plusieurs expérimentations réalisées au cours de ces dix dernières années ont révélé le formidable potentiel de l'interférométrie SAR (Synthetic Aperture Radar : Radar à Synthèse d'Ouverture) pour détecter et quantifier des déplacements centimétriques affectant des zones étendues.

Cependant, les techniques spatiales ne peuvent pas toujours être exploitées du fait d'un certain nombre de contraintes d'application. Ainsi, bien que les données radar apportent des éléments de compréhension sur les phénomènes en cours d'évolution, l'opérationnalité de l'interférométrie SAR pour l'étude des glissements de terrain apparaît difficilement envisageable dans des conditions standards d'observation à partir des radar spatiaux actuels. De plus, les mouvements provoquent généralement une perturbation importante des états de surface et peuvent entraîner une perte de cohérence rédhibitoire pour leur étude. L'arrivée de nouveaux instruments aux configurations plus adaptées (multi-incidence, répétitivité accrue, enregistreur de bord,...) pourrait offrir de nouvelles perspectives d'utilisation. Parallèlement, des techniques émergentes de corrélation sub-pixelique d'images optiques ou radar sont susceptibles de compléter utilement les moyens d'investigation habituels, en particulier pour cartographier les déplacements horizontaux. Les techniques de corrélation d'images optiques, plus précises, ne sont en revanche applicables qu'en l'absence de couverture nuageuse.

L'enjeu à terme serait d'insérer ces techniques dans la panoplie des systèmes de surveillance de risques naturels.

Dans cette perspective, l'étude décrite dans ce rapport correspond à la première étape d'un projet de recherche portant sur les mouvements de terrain de grande ampleur sur l'île de La Réunion et concerne l'apport des données issues du satellite canadien Radarsat. Les satellites ERS-1 et ERS-2 plus adaptés à la technique interférométrique n'étant pas en visibilité de station de réceptions sur le secteur de l'île de La Réunion, il n'était pas possible d'effectuer des tests interférométriques à partir de ces satellites. L'arrivée de nouvelles plates-formes équipées d'enregistreurs de bord permet de palier cette contrainte. La première partie du rapport présente les résultats obtenus par la technique interférométrique.

Un test de corrélation d'images d'intensités SAR a été également effectué dans le but d'estimer des déplacements horizontaux : les résultats sont présentés au chapitre 6.

2. Données acquises et combinaisons interférométriques générées

Pour cette étude, nous avons sélectionné 15 images issues de l'instrument SAR du satellite canadien Radarsat acquises entre janvier 1999 à janvier 2002. Le mode S3 (angle de visée : 33° ; échantillonnage au sol : approximativement 20 m x 5 m) qui a été choisi offrait un plus grand nombre d'images accessibles et une couverture complète de l'île.

Parmi les combinaisons possibles, nous avons généré les 17 paires décrites dans le tableau 1.

date	orbite	16850	18908	19594	21652	21995	22338	23710	24053	25768	26797	28855	29198	29884	31599	32285
	orbite															
26/01/1999	16850										225					
13/07/1999	18908															
06/08/1999	19594					85						235				
28/12/1999	21652						190									
21/01/2000	21995			168									115	82		
14/02/2000	22338				48											
20/05/2000	23710															
13/06/2000	24053										360		260			
11/10/2000	25768															280
22/12/2000	26797	696							192							
15/05/2001	28855			648											68	
08/06/2001	29198					480			360					35		
26/07/2001	29884					528							48			
23/11/2001	31599											192				
10/01/2002	32285									440						

Tableau 1 : Images acquises et combinaisons interférométriques produites. L'écart inter-orbital exprimé en mètre dans la partie supérieure du tableau représente la longueur de base entre les passages du satellite. La fiabilité de la combinaison radar générée est en partie dépendante de cette grandeur. L'écart (en jour) entre les dates d'acquisition est indiqué dans la partie inférieure (en italique gras).

Le choix de ces combinaisons a été fait de façon à optimiser les résultats des traitements interférométriques. Si les propriétés intrinsèques des cibles sont modifiées entre les dates de prises de vue (ex : l'humidité de surface, modification de la végétation), l'indicateur de fiabilité des mesures de phase, encore appelée cohérence, sera faible. Ceci se traduit par l'apparition d'un bruit de phase considéré localement comme additif et dit « blanc ». Il peut rendre inexploitable des surfaces importantes de l'image interférométrique ou *interférogramme*. Pour limiter le niveau de bruit, il faut d'une part sélectionner des couples ayant des orbites très proches pour que les cibles soient observées dans de bonnes conditions géométriques de visée. D'autre part, il est souhaitable de réduire l'intervalle de temps entre les dates d'acquisition et ce d'autant plus que la zone d'intérêt est caractérisée par un couvert végétal important ou rapidement évolutif (ex : zones agricoles, forêts...)

3. Modèles Numériques de Terrain nécessaires au traitement - limites géographiques

Les produits issus du traitement interférométrique des images SAR ont été corrigés des distorsions induites par la prise de vue radar oblique, et redressés en géométrie cartographique. Cette opération, appelée *géocodage*, permet l'interprétation des résultats sous Système d'Information Géographique et la comparaison directe avec des données de terrain. La correction a été réalisée par le biais d'un MNT produit par l'IGN avec un pas de 25 m (projection Gauss-Laborde). De plus, le MNT permet de modéliser et soustraire la composante topographique de la phase (section 4.3). Pour les besoins du traitement, le MNT a été rééchantillonné à 3.10^{-4}° (soit environ 30 m) (projection géographique – longitude / latitude -WGS 84) pour les produits couvrant l'ensemble de l'île et à 10^{-4}° (soit environ 10 m) pour le secteur couvrant les cirques (tableau 2).

	Totalité de l'île de la Réunion	Cirques
Coordonnées du premier point (en haut à gauche)	20,8724 S	20,9435 S
	55,2165 E	55,2165 E
Nombres de colonnes et lignes	2068 ; 1726	3454 ; 2682
Pas d'échantillonnage	0,0003°x0,0003°	0,0001°x0,0001°

Tableau 2 : caractéristiques des MNT utilisés

4. Produits interférométriques

Les produits issus du traitement interférométrique des images SAR sont de trois types :

- images d'intensité ;
- images de cohérence ;
- images de phase (ou interférogrammes).

4.1. IMAGE D'INTENSITE

Le canal d'intensité a un rôle important au cours du traitement, notamment en ce qui concerne le calage des 2 images SAR initiales et le géocodage. Il permet, de plus, de situer la zone d'étude et certaines caractéristiques topographiques de façon analogue à une restitution photographique.

Les images d'intensité sont intrinsèquement bruitées (phénomène de speckle) ; le speckle est un bruit dû aux interférences entre les signaux provenant des différents éléments réfléchissants répartis à l'intérieur d'une cellule de résolution ou pixel. Ces réflecteurs étant à des distances légèrement différentes du capteur, le signal provenant d'un pixel résultera d'interférences constructives ou destructives qui donneront à l'image d'intensité un aspect « poivre et sel » caractéristique de l'imagerie radar. Afin de réduire ce bruit, un filtrage spatial (procédé « multivue ») peut être appliqué ; il réduit néanmoins la résolution spatiale de l'image.

La moyenne d'images d'intensité individuelles, prises à des dates différentes, permet également de réduire les effets du speckle sans dégradation de la résolution, mais en modifiant l'information contenue.

La Figure 1 a été obtenue en moyennant les différentes images d'intensité. L'image ainsi produite facilite la localisation de la zone d'étude sur l'image des phases ou interférogramme.

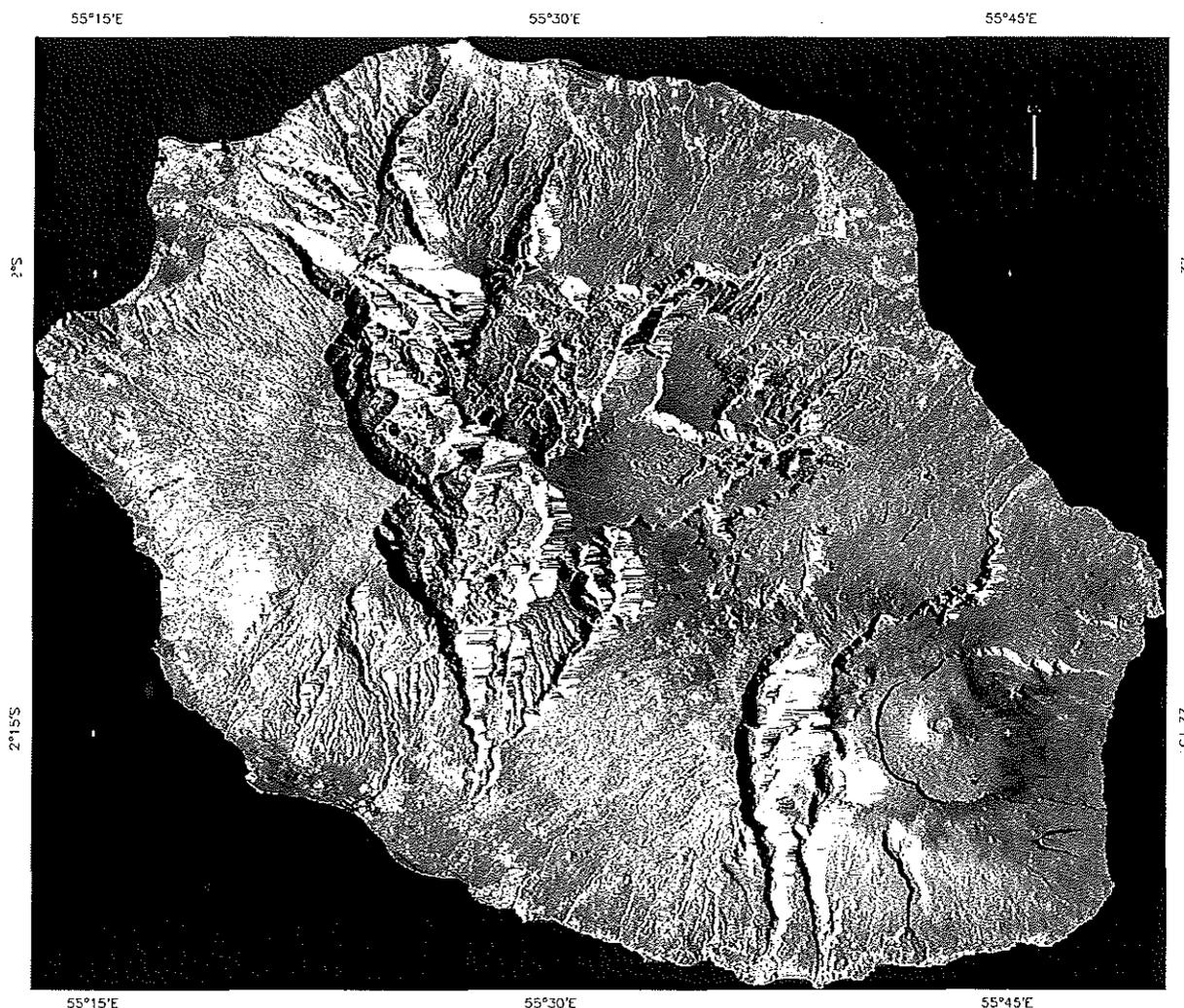


Figure 1 : image d'intensité moyenne réalisée à partir de 10 scènes acquises entre 1999 et 2002

4.2. IMAGE DE COHERENCE

La cohérence de l'interférogramme (ou amplitude de l'interférogramme complexe normalisé) fournit une information sur la fiabilité de la mesure de phase. Sa valeur est comprise entre 0 (noir sur les images de cohérence) et 1 (blanc).

Une perte de cohérence (valeurs proches de 0) relève de modifications des propriétés géométriques et physiques (rugosité, caractéristiques diélectriques, mouvements relatifs,...) des réflecteurs à l'intérieur des pixels, au cours de la période séparant les deux prises de vue. Elle se traduit par un bruit blanc additif sur la phase.

Les secteurs qui présentent des éléments rétrodiffusants stables, tels que les structures de type génie-civil, seront caractérisés par des valeurs de cohérence élevées. Le tissu urbain et les zones dévégétalisées (telles que le Piton de la

Fournaise et le Grand Benare) apparaissent ainsi en blanc sur la figure 2. A l'inverse, les zones à fort couvert végétal ou agricole, présentent un niveau de cohérence faible.

L'image de cohérence moyenne révèle des niveaux globalement très faibles sur l'ensemble de l'île et laisse présager les difficultés d'interprétation des mesures de phase.

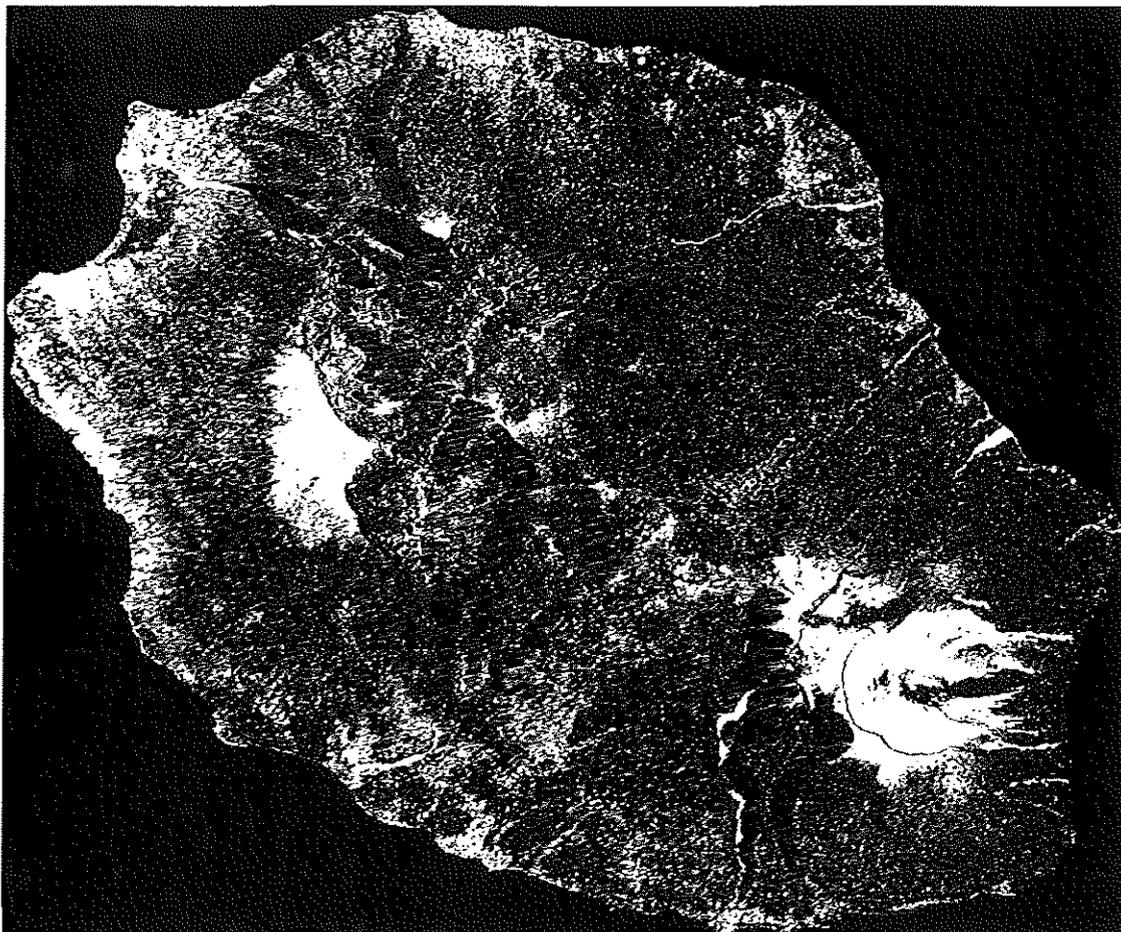


Figure 2 : cohérence de la paire 29198(08/06/2001)-29884(26/07/2001) – en raison du faible écart inter-orbital (35m) et d'un faible écart de prise de vue (48 jours) cette combinaison est celle qui offre la meilleure cohérence moyenne.

Statistiques sur la cohérence de l'interférogramme 29198 (08/06/2001) - 29884 (26/07/2001) :

moyenne : 0,34
écart-type : 0,21
maximum : 0,99

Les interférogrammes les moins bruités sont ceux qui présentent les intervalles de temps les plus faibles. Au delà de quelques mois, la décorrélation du signal radar, compte tenu du fort couvert végétal, est trop importante, i.e. le niveau de cohérence est trop faible. L'analyse de couples interférométriques est rendue très délicate et ne

permet pas de faire un suivi sur tous les secteurs végétalisés. Par ailleurs, les conséquences des fortes perturbations climatiques (pluviométrie, vent) sont également susceptibles de provoquer en surface des remaniements importants, des changements de structure (modifications de surface, éboulements, boues, arbres arrachés...) sur des secteurs sur lesquels il devient alors impossible d'estimer toute variation altimétrique de la surface.

4.3. INTERFEROGRAMMES (IMAGES DES PHASES)

La phase interférométrique est la différence des phases des images SAR entre deux acquisitions. Elle contient l'information altimétrique que l'on cherche à extraire (topographie + variations altimétriques éventuelles entre les dates de prise de vue).

Une fois retirée la composante topographique de la phase, une variation de phase de 2π radians ou *frange* correspond à un déplacement d'une demi longueur d'onde dans la direction du satellite (soit 28 mm dans le cas du satellite Radarsat). Dans le cas de mouvements verticaux, une frange correspond ainsi à environ 3,3 cm de déplacement entre les dates d'acquisitions, l'incidence du capteur en mode S3 étant d'environ 33°. En plus de la perte de cohérence due essentiellement au couvert végétal, cette information est dégradée par des effets atmosphériques dont la signature est très semblable à celle de mouvements. Un artefact atmosphérique se traduira donc par une « fausse détection de mouvement ». Ces effets atmosphériques ne se reproduisant généralement pas à l'identique d'une image à l'autre, la persistance d'une signature sur plusieurs interférogrammes permet de confirmer la détection de mouvement par comparaison d'une série.

Il faut néanmoins noter que :

- le nombre d'interférogrammes utilisables est réduit sur les secteurs où la cohérence moyenne de l'ensemble des combinaisons est faible. Les possibilités de comparaison y sont donc relativement limitées. Ainsi, une signature de mouvement pouvant être observée sur un interférogramme dont les caractéristiques orbitales et de dates de prises de vues font que sa cohérence est nettement meilleure que celle des autres combinaisons, peut ne pas être validée, ou réfutée faute d'interférogrammes suffisamment cohérents pour effectuer une telle comparaison ;
- le climat tropical (températures et taux d'humidité élevés) est associé à des fluctuations plus importantes de la quantité d'eau atmosphérique qu'en climat tempéré ou froid. Les effets atmosphériques y sont donc plus importants [Carnece et Raucoules, 2000] ;
- compte tenu du relief important de l'île, et de particularités topographiques (telles que les remparts), des phénomènes atmosphériques récurrents pourraient donner des signatures similaires sur des interférogrammes distincts.

Dans un premier temps, les interférogrammes ont été générés avec des facteurs multi-vues 2 (sous-échantillonnage en distance) et 5 (sous-échantillonnage en azimut) : soit une résolution des interférogrammes avant géocodage d'environ 40m x 25m. L'objectif était d'obtenir des produits couvrant la totalité de l'île, pour fournir une vision à l'échelle régionale.

Les interférogrammes présentés ont été filtrés [Goldstein et Zebker, 1998] (coefficient de filtrage 0,6 , fenêtres 64x64 pixels) afin d'améliorer leur qualité visuelle.

Les figures 3 et 4 montrent les interférogrammes les plus significatifs en terme de détection de mouvement parmi la série produite.

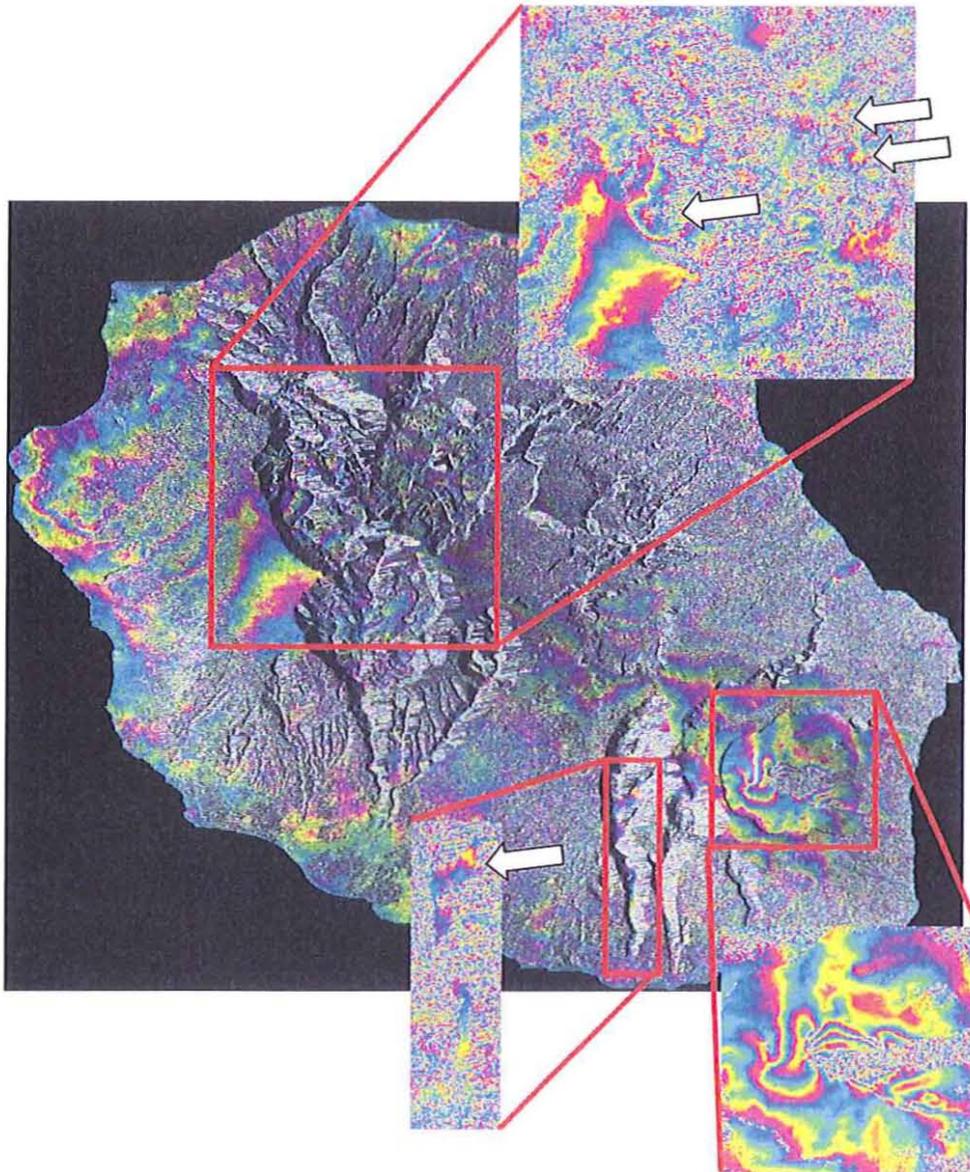


Figure 3 : interférogramme orbite 29198 (08/06/2001)- orbite 29884 (26/07/2001) superposé à l'image d'amplitude moyenne. Les zones d'intérêt (cirques, Piton de la Fournaise et rivière des Remparts) sont signalées par les agrandissements de l'image de phase. Les flèches indiquent de possibles détections de mouvement à l'intérieur des cirques de Mafatte et Salazie ainsi que sur le secteur de la rivière des Remparts. Une frange (cycle complet de couleur) correspond à une déformation de 28 mm suivant la ligne de visée du satellite.

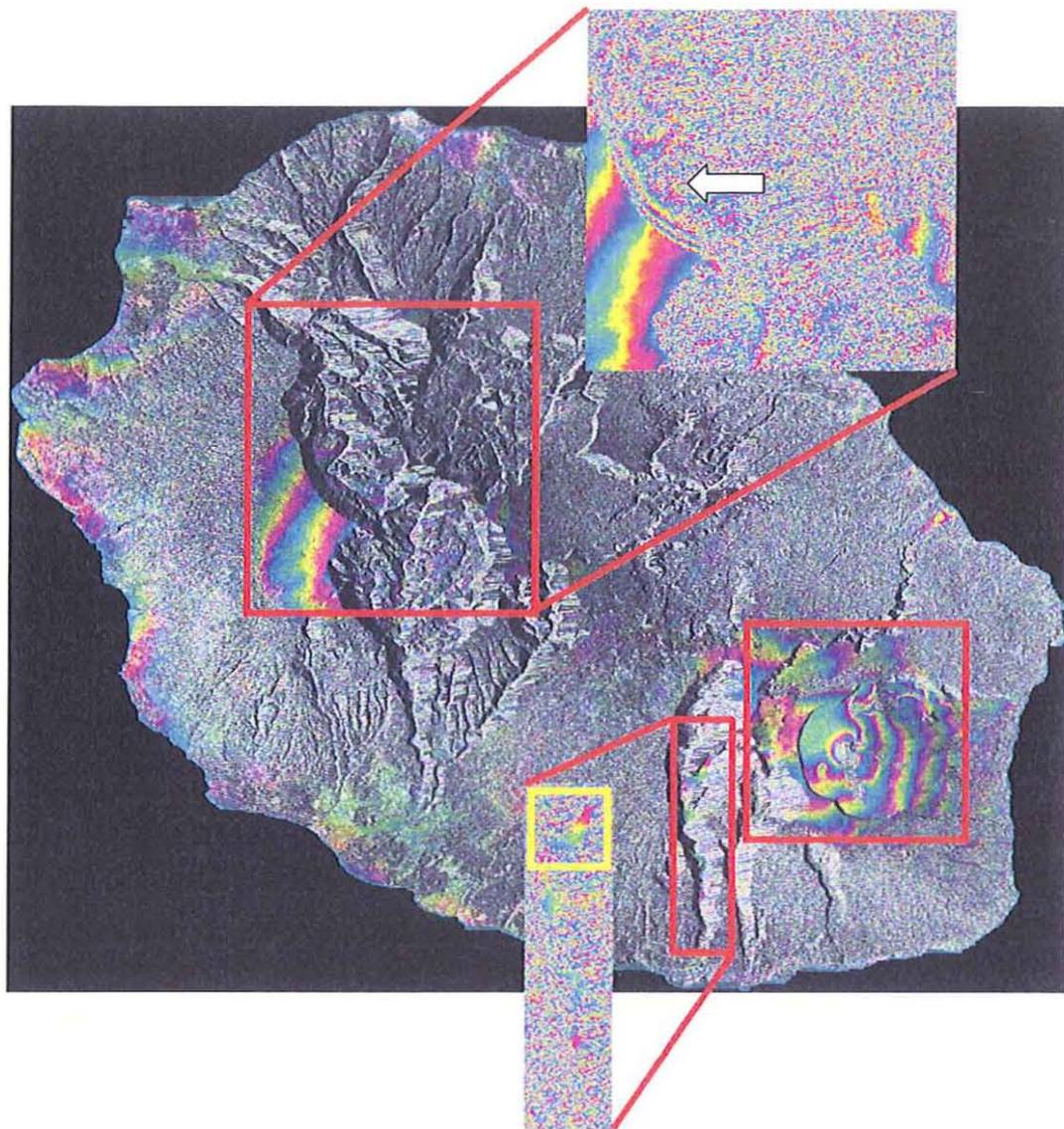


Figure 4 : interférogramme orbite 19594 (06/08/1999) - orbite 21995 (21/01/2000) superposé à l'image d'amplitude moyenne. Cet interférogramme est nettement plus bruité que celui présenté figure 3; l'écart temporel est ici de 175 jours contre 35 jours pour la figure 3. La signature sur le cirque de Mafatte persiste. Le rectangle jaune signale une déformation possible sur le secteur de la rivière des Remparts (cf Figure 5).

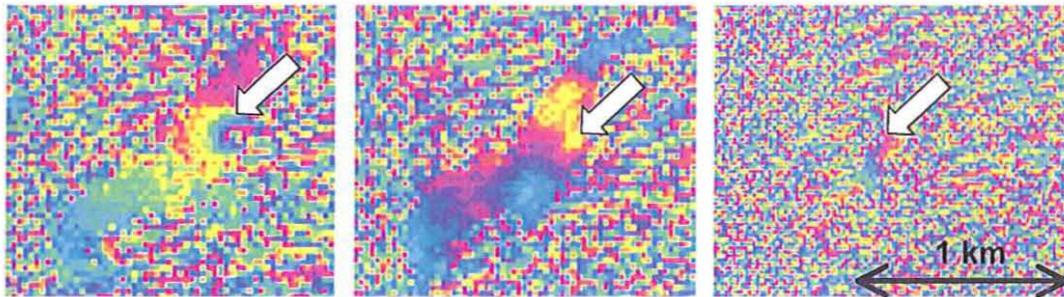


Figure 5 : agrandissements sur le secteur de la rivière des Remparts pour différents couples interférométriques réalisés entre 2000 et 2001. Gauche : combinaison 28855 (15/05/2001)-31955 (23/11/2001) ; Centre : combinaison 29198(08/06/2001)-29884(26/07/2001) ; Droite : combinaison 21955(21/01/2000)-29884(26/07/2001). La redondance de la signature permet de rejeter l'éventualité d'un artefact atmosphérique.

4.4. ANALYSE DES RESULTATS

Trois secteurs révèlent des signatures de déformation du sol et ressortent de cette étude préliminaire à grand échelle : le Piton de la Fournaise (dont l'étude de la déformation ne fait pas l'objet de ce rapport), le secteur de la rivière des Remparts et le secteur des cirques de Mafatte et Salazie. Les cirques feront l'objet d'une analyse détaillée en section 5.

La Figure 5 montre une signature de mouvement sur la rivière des Remparts d'amplitude supérieure à 2 franges (soit 6 cm suivant la ligne de visée) sur une période incluse dans l'intervalle janvier 2000 – novembre 2001. La présence de la signature sur trois interférogrammes distincts tend à rejeter l'éventualité d'artefact atmosphérique et confirme la présence d'une déformation. Cette déformation est à relier à un mouvement d'ensemble du fond de la vallée qui fait suite à des glissements antérieurs déjà recensés. On observe un effet de compaction et de glissement dans le sens de la pente. La perte de cohérence observée sur les interférogrammes couvrant des périodes importantes (tel que la combinaison 21955-29884), est probablement due à la situation à l'intérieur du lit de la rivière des Remparts et donc soumise à des modifications de l'état de surface en période de crue.

Les coordonnées de la signature sont :

Latitude : 21°15'45,72" S
Longitude : 55°37'26,04" E
Etendue approximative : 800 m

5. Secteur des cirques

Afin de vérifier les hypothèses de détection évoquées précédemment, une étude plus approfondie a été effectuée sur le secteur des cirques. Dans ce but, le traitement a été réalisé avec un facteur multi-vue 1 en distance, 2 en azimut – soit une résolution des interférogrammes avant géocodage d'environ 20mx10m – et le MNT rééchantillonné au pas de 10^{-4} degré. Dans le but de faciliter la localisation, les interférogrammes ont été superposés à des extraits de la BD-Ortho 10m (photographies aériennes orthorectifiées de 10 m de résolution).

5.1. IDENTIFICATION DES SIGNATURES DE PHASE

L'analyse visuelle de la série d'interférogrammes (Figure 6, Figure 7, Figure 8, Figure 9 et Figure 10) permet de localiser des signatures possibles de mouvements. En effet, certaines signatures n'étant en raison du fort niveau de bruit (i.e. faible cohérence) observables que sur la paire orbitale 29198-29884, elles ne peuvent pas être confirmées sur d'autres combinaisons et estimer ainsi l'éventualité d'artefacts atmosphériques sur la période d'observation radar.

Signature	longitude	Latitude	Mouvement estimé sur combinaison interférométrique 29198-29884 (08/06/2001 - 26/07/2001)
A	21°5'16,08"	55°24'9,36"	~6cm
B	21°1'34,32"	55°23'55,32"	~4cm (pas observable sur les autres interférogrammes)
C	21°2'34,80"	55°25'16,68"	~3cm (pas observable sur les autres interférogrammes)
D	21°1'39,00"	55°29'42,00"	~2cm (pas observable sur les autres interférogrammes)
E	21°2'31,20"	55°31'12,00"	~3cm (pas observable sur les autres interférogrammes)
F	21°5'21,84"	55°29'0,96"	~2cm

Tableau 2 : localisation des signatures de mouvements observés. Les noms sont reportés sur la Figure 6.

Un réseau de surveillance par GPS préexistant est situé sur deux glissements connus correspondants aux signatures notées D et E. Il s'agit respectivement des secteurs de Grand Ilet et Mare à Poule d'Eau. La Figure 7 montre un extrait de l'interférogramme 29198-29884 sur lequel sont indiquées les positions des points du réseau GPS. La comparaison entre les données de nivellement ponctuelles et l'image issue du traitement radar est rendue difficile, compte tenu de la forte variabilité de phase sur ces secteurs. Il semble toutefois que la signature référencée D soit plus en accord avec la position du glissement déjà cartographié que la signature référencée E.

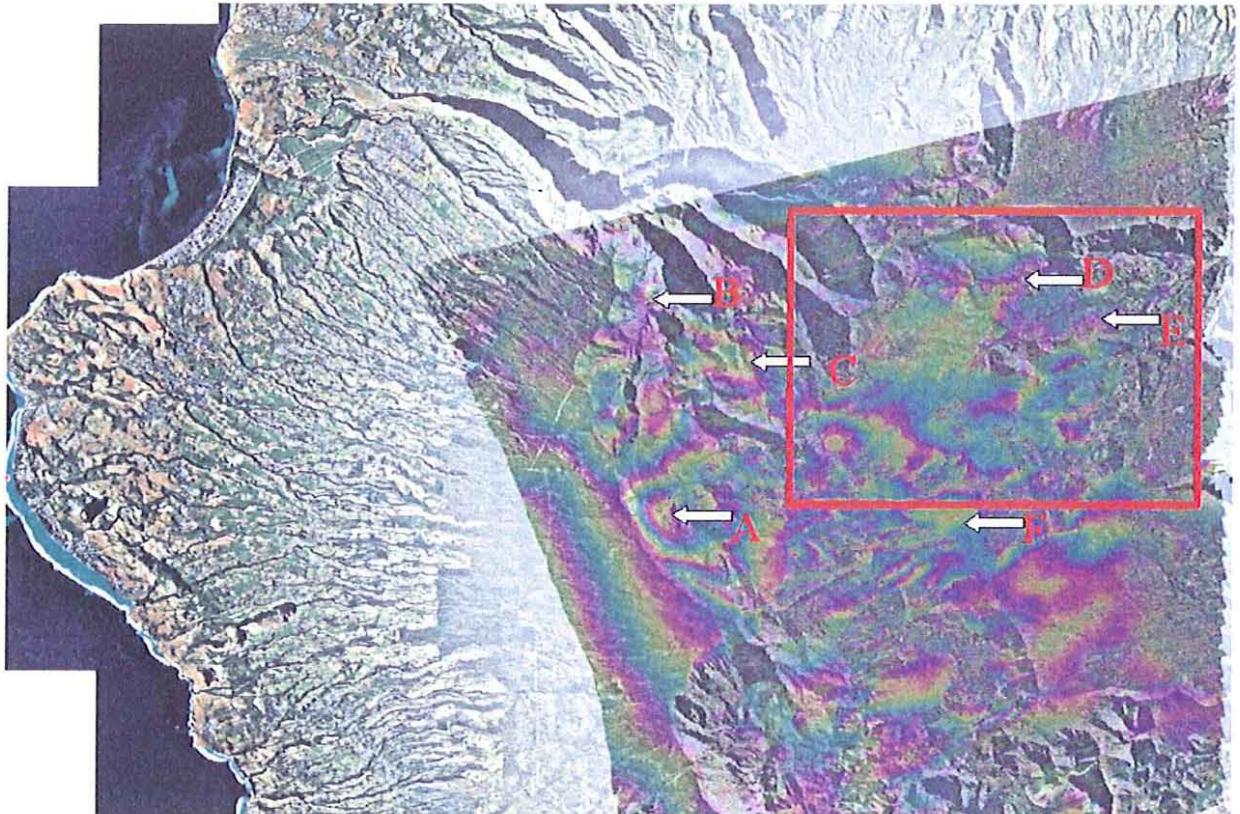


Figure 6 : superposition de l'interférogramme 29198 (08/06/2001)-29884 (26/07/2001) et de l'ortho-photo à 10m de résolution (source IGN) sur les cirques de Mafatte, Salazie et Cilaos . Le cadre rouge indique les limites de l'image de la Figure 7. Les flèches indiquent les positions des signatures de mouvements identifiés.

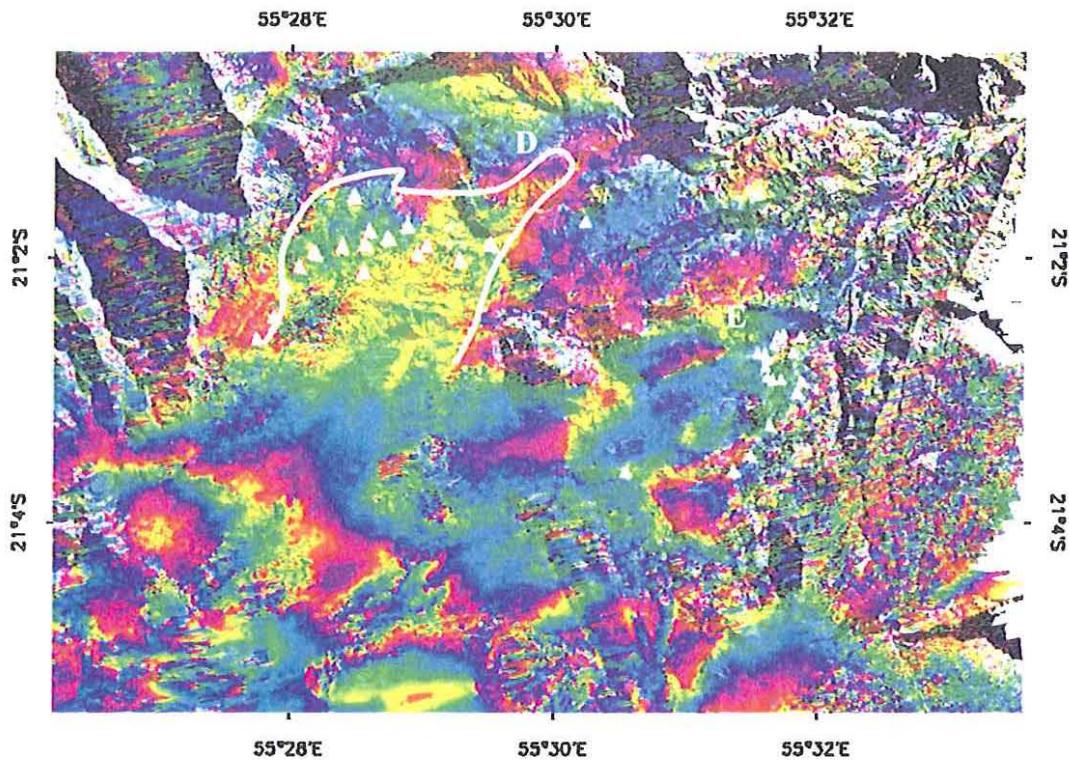


Figure 7 : extrait de l'interférogramme 29198(08/06/2001)-29884(26/07/2001) sur le cirque de Salazie. Les triangles blancs indiquent les positions des points du réseau de nivellement. L'emprise de la signature D est représentée par un contour blanc : on observe quelle contient une partie importante du réseau implanté sur le glissement. En revanche, compte tenu de la forte fluctuation de la phase sur l'ensemble de l'image, les limites de la signature E ne sont pas reportées sur cette figure.

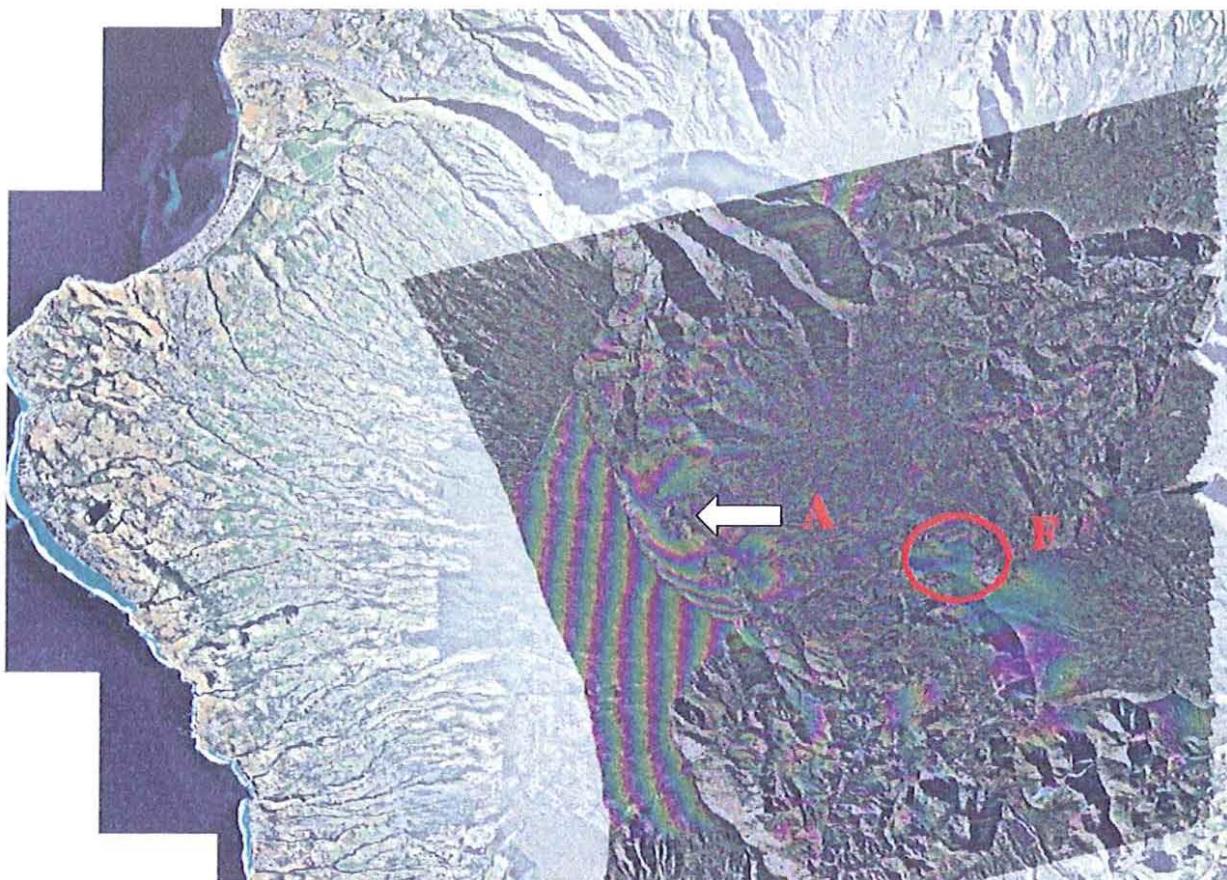


Figure 8 : superposition de l'interférogramme 19594 (06/08/1999)-21995 (21/01/2000) et de l'ortho-photo à 10m de résolution (source IGN) sur les cirques de Salazie, Mafatte et Cilaos .

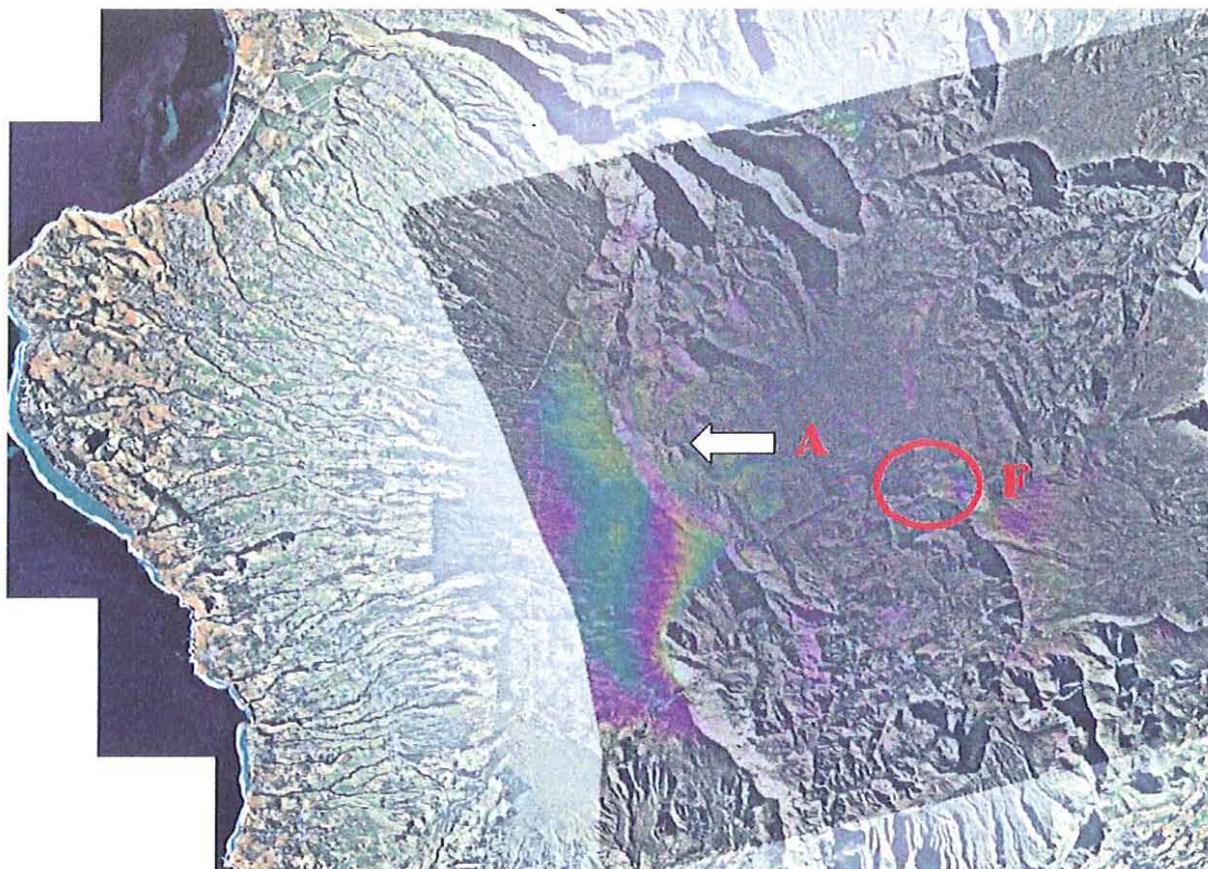


Figure 9 : superposition de l'interférogramme 28855 (15/05/2001)-31599 (23/11/2001) et de l'ortho-photo à 10m de résolution (source IGN).

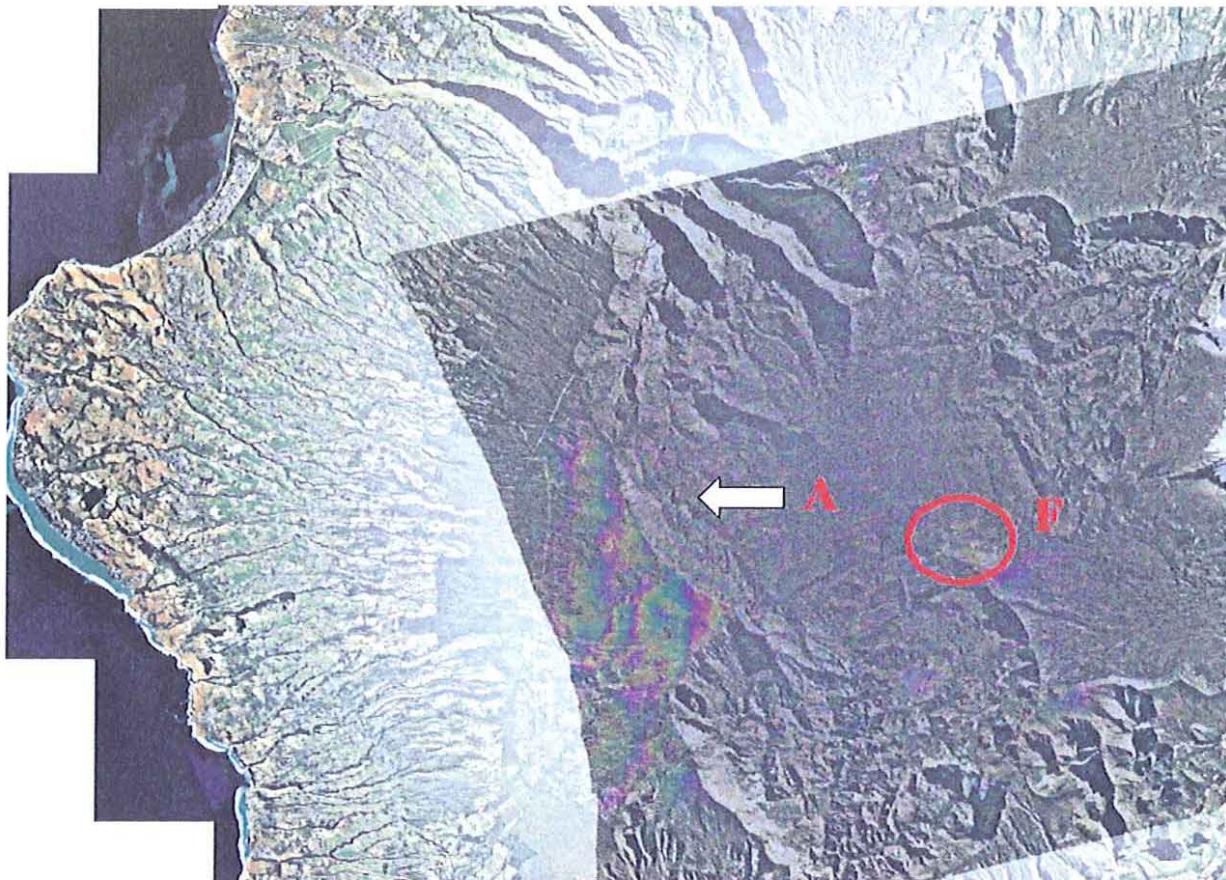


Figure 10 : superposition de l'interférogramme 24053 (13/06/2000)-29198 (21/01/2000) et de l'ortho-photo à 10m de résolution (source IGN).

5.2. ANALYSE DES RESULTATS

Une comparaison plus fine des interférogrammes amène à reconsidérer la réalité des mouvements détectés (signatures A et F). En effet, la signature A localisée au niveau du cirque de Mafatte, est observable sur les interférogrammes 19594(06/08/1999)-21995(21/01/2000) et 29198(08/06/2001)-29884(26/07/2001) mais ne l'est pas sur l'interférogramme 28855(15/05/2001)-31599(23/11/2001) dont l'intervalle de temps contient pourtant celui de 29198-29884. De plus, cette signature apparaît inversée sur l'interférogramme 24053-29198 (13/06/2000-08/06/2001). C'est contradictoire (Figure 11).

Il se pourrait donc que l'on soit confronté à un artefact atmosphérique récurrent sur deux interférogrammes indépendants. Un tel problème est très rare en interférométrie radar où l'on suppose que l'état de l'atmosphère est décorrélé dans le temps. Il est probablement dû à la spécificité de la topographie du cirque.

Quant au secteur F (Piton des Neiges), la signature est présente sur les trois interférogrammes (Figure 12). Néanmoins sur la combinaison interférométrique élaborée entre 1999 et 2000 (orbites 19594 et 21995), le sens de la déformation est inversé par rapport aux deux autres combinaisons. Dans ce cas, les périodes des

interférogrammes ne se chevauchent pas, aussi se pose la question de l'éventualité d'un mouvement irrégulier n'ayant pas eu le même sens sur la période 08/1999-01/2000 et 05/2001-11/2001. Toutefois compte tenu des forts dénivelés aux alentours du Piton des Neiges, il semble plus vraisemblable que la signature soit due à une mauvaise correction de la composante topographique en raison d'une estimation insuffisamment précise de l'altitude d'ambiguïté. D'autres informations géodésiques, ou interférogrammes supplémentaires, seraient nécessaires pour confirmer ou infirmer cette hypothèse.

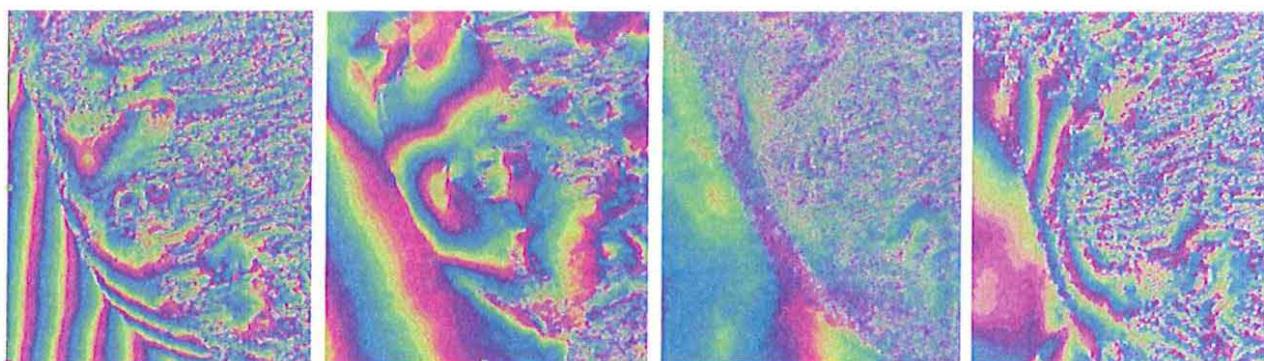


Figure 11 : secteur SW de Mafatte (signature référencée A). de gauche à droite : 19594 (06/08/1999)-21995 (21/01/2000) , 29198 (08/06/2001)-29884 (26/07/2001), 28855 (15/05/2001)-31599 (23/11/2001) et 24053-29198 (13/06/2000-08/06/2001)

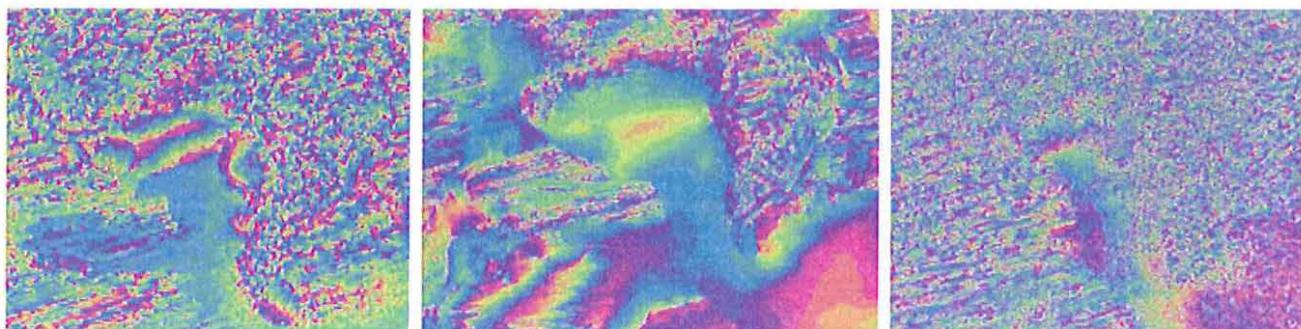


Figure 12 : secteur Piton des Neiges (signature référencée F). Gauche : 19594(06/08/1999)-21995(21/01/2000) ; Centre : 29198 (08/06/2001)-29884 (26/07/2001) ; Droite : 28855 (15/05/2001)-31599 (23/11/2001)

6. Tests de corrélation

La corrélation d'images d'intensité peut être une alternative pour évaluer les déplacements planimétriques, en estimant les décalages locaux entre deux images. Une telle démarche est complémentaire de l'interférométrie, plus sensible à la composante verticale. Compte tenu de l'ampleur des mouvements de terrains que l'on cherche à cartographier (généralement de l'ordre de plusieurs dm/an, rarement supérieur au m/an) et de la résolution du capteur (~20m x 5m), les corrélateurs utilisés doivent offrir des performances proches du dixième de pixel. En effet, l'étude couvrant la période 1999-2001, de telles performances sont nécessaires à la mise en évidence de mouvements de quelques décimètres par an.

En prévision de l'acquisition prochaine du logiciel de corrélation Médicis du CNES, un test a été effectué avec le corrélateur du logiciel interférométrique Gamma. La raison d'être de ce corrélateur est de permettre le recalage des images SAR prises à partir d'orbites proches et donc de déterminer une déformation simple (polynôme de degré < 5 des indices de lignes et colonnes) à appliquer à l'une des images. Si le modèle de déformation obtenu doit avoir une précision proche du dixième de pixel pour permettre la génération d'interférogrammes, il n'est pas nécessaire que les estimations des décalages individuels visant à évaluer le modèle soient d'une telle précision. Ce test permettra de se faire une idée des performances de l'outil pour le calcul des décalages locaux entre images d'intensité.

6.1. DONNEES

Afin d'améliorer la radiométrie des images nous utiliserons la moyenne des trois plus anciennes images d'intensité (16850,18908,19594 – année 1999) et la moyenne des trois plus récentes (29884,31599,32285 – années 2001 et début 2002), Figure 13. Les images ont été recalées au cours du traitement interférométrique par le biais d'un polynôme de degré 4 qui prend en compte les effets des différences de paramètres orbitaux. Les décalages résiduels locaux que l'on calculera ne devrait plus ainsi relever que des déplacements du terrain.

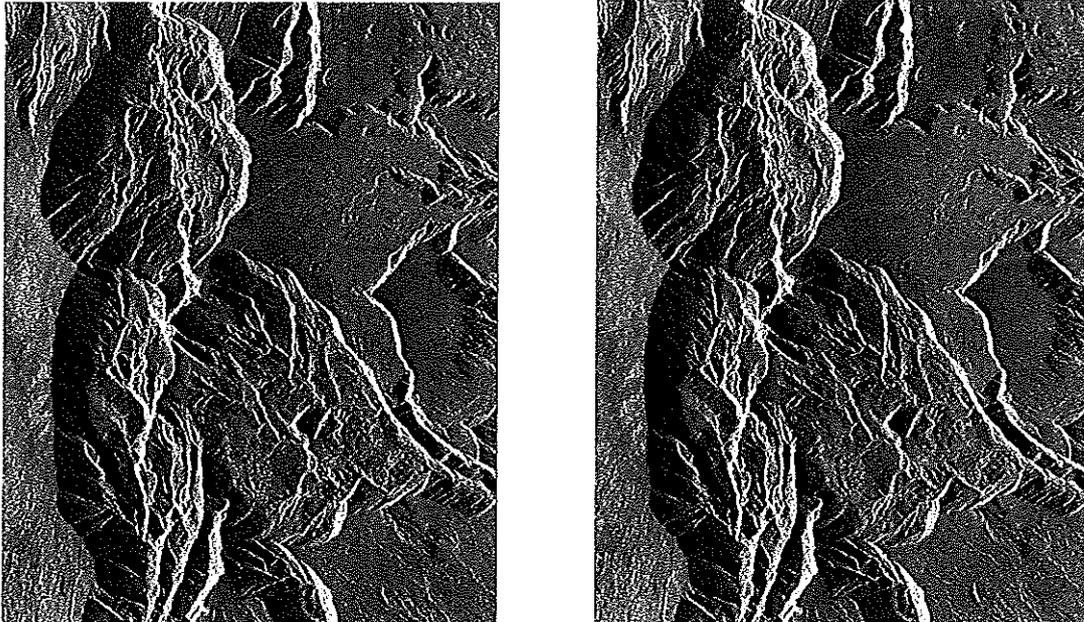


Figure 13 : moyenne des 3 plus anciennes images d'intensité (gauche) et moyenne des 3 plus récentes (droite)

6.2. ANALYSE DES RESULTATS

Les résultats obtenus pour deux tailles (64 pixels et 128 pixels) de fenêtres de corrélation (Figure 14 et Figure 15) sont peu probants. Les raisons sont liées d'une part à l'incapacité d'utilisation d'une grande partie de l'image, compte tenu de mesures de décalages peu fiables (valeurs de SNR <9), et d'autre part aux valeurs élevées des décalages et à une forte variabilité (Tableau 3) qui semblent incompatibles avec la réalité.

Taille de la fenêtre de corrélation (en pixel)	64	128
Moyenne	5,5 m	4,6m
Ecart type	5,7 m	3,4m

Tableau 3 : statistiques sur les résultats de corrélation

Le corrélateur du logiciel Gamma est donc insuffisamment précis pour mettre en évidence des mouvements de terrain à partir d'image d'intensité SAR.

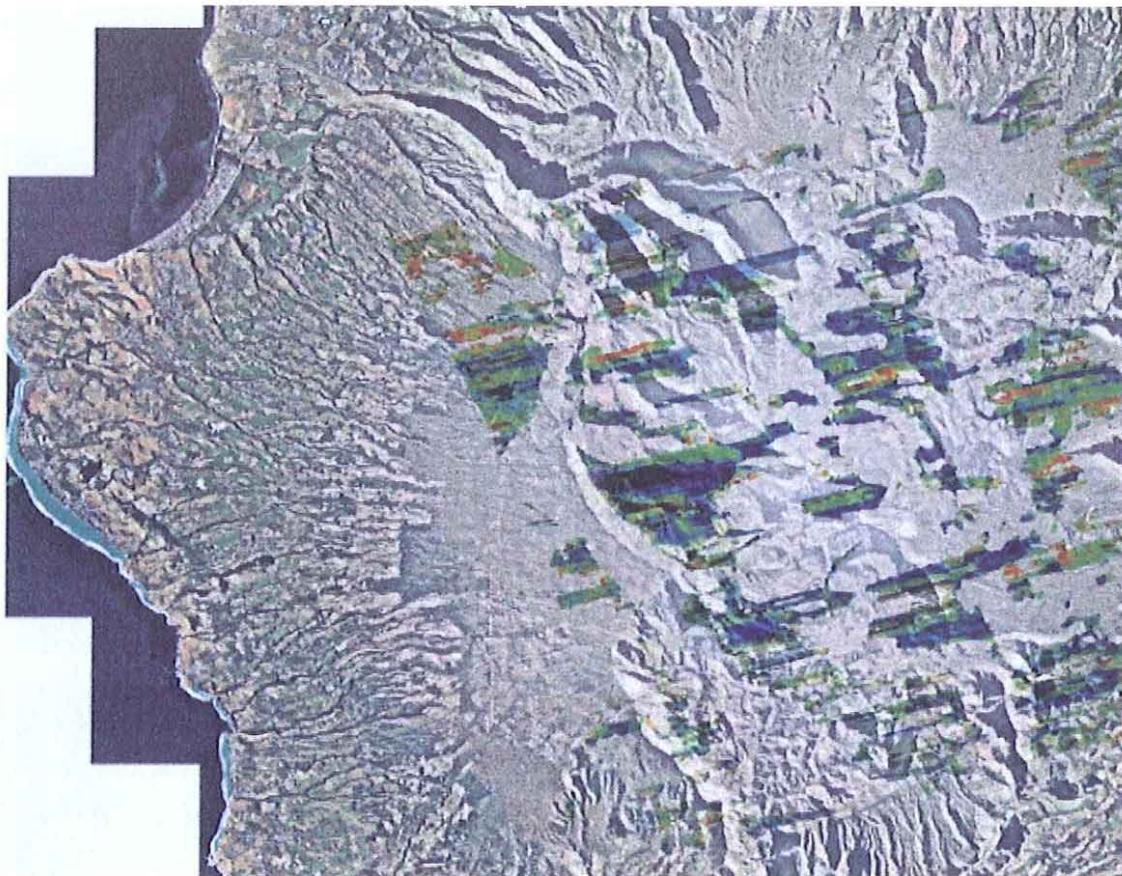


Figure 14 : décalages estimés en utilisant des fenêtres de corrélation de 64 pixels superposés à l'ortho-photo 10m. Les valeurs affichées vont de 0 (bleu) à 10m (rouge)

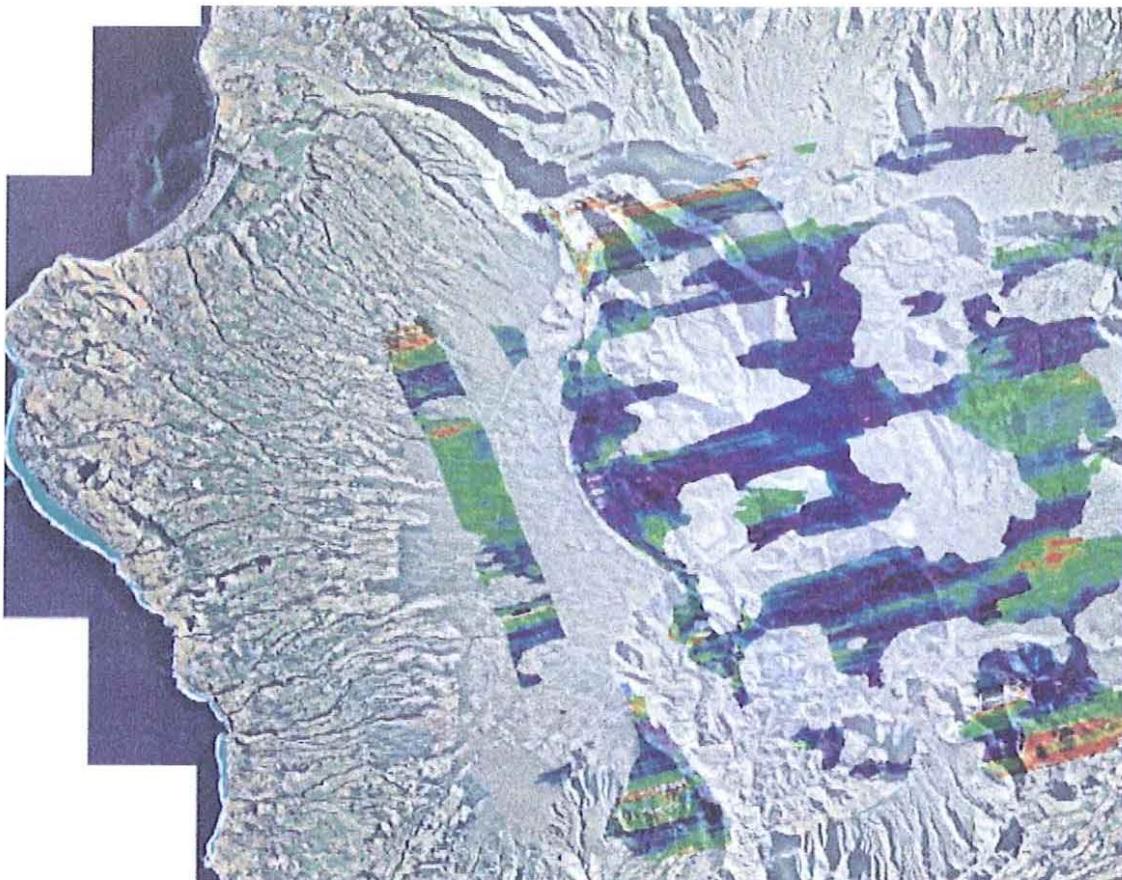


Figure 15 : décalages estimés en utilisant des fenêtres de corrélation de 128 pixels superposés à l'ortho-photo 10m. Les valeurs affichées vont de 0 (bleu) à 10m (rouge)

7. Conclusion et perspectives

L'étude interférométrique radar, conduite dans le cadre de ce projet Mouvements de Grande Ampleur, a permis de mettre en évidence des signatures de déformations sur plusieurs secteurs de l'île de la Réunion, notamment dans le secteur de la rivière des Remparts et sur le Piton de la Fournaise. En revanche, l'interprétation des résultats sur les secteurs des cirques sur lesquels l'essentiel des mouvements était attendu s'est avérée beaucoup plus délicate. D'une part en raison de forts effets atmosphériques susceptibles d'être confondus avec des signatures de mouvements, et d'autre part en raison de la faible cohérence. La perte de cohérence limite le nombre d'interférogrammes utilisables et donc les possibilités d'inter-validation des combinaisons nécessaires à lever l'ambiguïté sur d'éventuels effets atmosphériques.

Le traitement d'images radar issues des satellites JERS1 et Envisat qui sera effectué dans la seconde étape de ce projet pourrait pallier, en partie, les contraintes révélées par cette étude de faisabilité, dans la mesure où nous disposerons d'un jeu de combinaisons interférométriques plus important. L'opportunité d'un capteur tel que JERS1 en bande L offre un indice de pénétration de la végétation plus adapté au contexte local et devrait permettre d'envisager une meilleure cohérence sur les interférogrammes produits.

Le test de corrélation sur les images d'intensité effectué avec le corrélateur du logiciel Gamma a révélé des performances insuffisantes de l'algorithme pour détecter des déplacements de terrains, compte tenu de la résolution des images.

Un test sera effectué avec le logiciel Medicis du CNES dont les performances devraient être nettement supérieures. Une estimation des déplacements horizontaux, avec une sensibilité décimétrique à métrique est envisageable, et serait une information complémentaire de l'interférométrie radar.

Enfin, d'autres pistes sont à envisager à partir d'images haute-résolution optiques. Il s'agit notamment de l'estimation des volumes de masses rocheuses, réalisable par différenciation de modèles numériques de terrain calculés à partir de couples stéréoscopiques d'images aériennes acquises au cours des dernières décennies, ou à partir de SPOT V depuis avril 2002.

BRGM
SERVICE AMENAGEMENT ET RISQUES NATURELS
Unité Mécanismes des Aléas et Simulation
BP 167-117 Avenue de Luminy- 13276 MARSEILLE Cédex 9-France
Tél. : (33) 04.91.74.77. Fax : (33) 04.91.17.20.40.