Mesure des déformations sur la surface de la Terre à partir de techniques de télédétection spatiales

Daniel Raucoules

▶ **To cite this version:**

Daniel Raucoules. Mesure des déformations sur la surface de la Terre à partir de techniques de télédétection spatiales. Autre. Université d'Orléans, 2011. tel-00601459

HAL Id: tel-00601459
https://theses.hal.science/tel-00601459

Submitted on 17 Jun 2011

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

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

Mémoire présenté en vue de l'obtention de

l'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

à **l'Université d'Orléans**

par **Daniel Raucoules**

spécialité

Sciences de l'Univers

Mesure des déformations sur la surface de la Terre à partir de techniques de télédétection spatiales

présenté le 10/05/2011 devant le jury composé de :

Jean Philippe Avouac	Caltech	Rapporteur
Pierre Briole	ENS	Examinateur
Laurent Jolivet	Université d'Orléans	Président
Didier Massonnet	CNES	Rapporteur
Rémi Michel	CEA	Rapporteur
Gilles Grandjean	BRGM	Examinateur

Remerciements

Je tiens à remercier tous les co-auteurs (ainsi que leurs organismes d'origine) des articles inclus dans ce document pour les fructueuses collaborations qui ont abouti aux travaux de recherches résumés dans ce mémoire.

Par ailleurs, je souhaite remercier les directeurs des thèses sur lesquelles j'ai pu intervenir, à savoir : Geoffrey Ewdards directeur de thèse de Frédéric Vincent ; Benoit Deffontaines directeur de thèse de Yann Gueguen ; Pierre Briole directeur de thèse de Marcello de Michele ; Fabrice Cotton directeur de thèse de Guillaumes Bacques.

Je remercie également Laurent Jolivet pour avoir soutenu ma candidature auprès de l'Université d'Orléans ainsi que les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ces travaux.

Et finalement l'"équipe" d'interférométrie radar actuelle de BRGM/RNSC (Claudie Carnec et Marcello de Michele) et passée (Stéphane Le Mouélic, Elisabeth Simonetto et Denis Feurer) sans qui cette activité de recherche n'aurait pas été possible. Les travaux de recherche présentés ont reçu le soutien de la Direction de la Recherche du BRGM.

Résumé

Ce document résume les travaux de recherche effectués au BRGM depuis la fin de ma thèse dans la thématique de la mesure de la déformation de la surface du sol à partir de techniques de télédétection spatiales. Les applications de ces techniques s'inscrivaient dans la perspective d'une contribution à l'évaluation de risques naturels ou anthropiques et par conséquent ciblaient les phénomènes entrant dans ces domaines (tels que subsidence urbaine et minière, glissement de terrains, séismes,...). Nous avons principalement utilisé des techniques d'interférométrie radar satellitaires (conventionnelle et *persistent scaterrers*) et de corrélation d'images. Ces techniques peuvent apporter une alternative ou un complément aux techniques de surveillance au sol nécessaires au suivi de ces phénomènes. Le document présente notre contribution à cette thématique aussi bien sur le plan méthodologique (évaluation et amélioration des techniques) que des applications (analyses en termes de phénomènes ou de conséquences en terme de risques). Les publications les plus représentatives parmis celles qui ont découlé de ses travaux sont incluses dans le document.

Abstract

This document summarizes the research activity carried out at BRGM since the end of my PhD in the domain of the measurement of the ground surface displacement by the means of Remote Sensing spaceborne techniques. The application of these techniques was thought as contributions to the assessment of natural and anthropogenic risks and therefore targetted related phenomena (urban and mining subsidence, landslides, earthquakes,...). We mainly used spaceborne radar interferometry techniques (conventional and *persistent scaterrers*) and image correlation. These techniques may be an alternative or a complement to the current ground based techniques for monitoring the concerned phenomena. This document presents our contribution to this thematics concening the methodology (assessment and improvement of the techniques) and applications (phenomena and consequences in terms of hazards). Among our published articles related to this research activity, the more relevant were included in the document.

Table des matières

1 Introduction **8**
- 1.1 Nécessité de détecter et mesurer les déplacements de la surface du sol . . . 8
- 1.2 Un sujet transverse du point de vue thématique . . . 9

2 Techniques **11**
- 2.1 Interférométrie . . . 11
  - 2.1.1 Interférométrie radar différentielle conventionnelle . . . 11
  - 2.1.2 Contribution des travaux de recherche présentés à la technique interférométrique différentielle conventionnelle . . . 17
  - 2.1.3 Principe des techniques PSI (interférométrie sur points persistants) . . . 18
- 2.2 Corrélation d'images . . . 22

3 Applications **25**
- 3.1 Affaissements urbains et miniers. . . . 25
- 3.2 Glissements de terrain . . . 26
- 3.3 Déformation sur les failles actives . . . 30
- 3.4 Volcanisme . . . 36
- 3.5 Retrait Gonflement - Evaluation du potentiel des techniques PSI . . . 37

4 Perspectives **40**
- 4.1 Imagerie radar Haute Résolution et répétitivité . . . 40
- 4.2 Densification du réseau de point PS . . . 40
- 4.3 Possibilité d'extraire une information atmosphérique sur la phase interférométrique à partir d'informations issues de la focalisation . . . 40
- 4.4 Application aux mesures de vitesse des vagues . . . 41
- 4.5 Autres applications opérationelles des techniques . . . 41
- 4.6 radar au sol . . . 42

5 Réferences de la synthèse (hors publications de l'auteur) **46**

6 Participation à des projets de Recherche **48**
- 6.1 Projets de recherches à financement principalement externe . . . 48
  - 6.1.1 RESUM (2000-2001, financement Ministère de la Recherche/CNES) . . . 48
  - 6.1.2 TERRAFIRMA stage 1 (2002-2005 - financement GMES/ESA) . . . 48
  - 6.1.3 MVTERRE (2002-2007 - Financement FEDER/FIDOM/Région) . . . 48
  - 6.1.4 "déroulement de franges interférométriques" (2004-2005 - financement CNES) . . . 49
  - 6.1.5 PSIC-4 (2004-2006, financement ESA) . . . 49
  - 6.1.6 Safeland - area 4 (2009-2012 , financement Européen 7ème PCRD) . . . 49
  - 6.1.7 PERPETUATE (2009-2012, financement Européen 7ème PCRD) . . . 49
  - 6.1.8 Retrait Gonflement (2009-2010, financement Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable) . . . 50
  - 6.1.9 Etudes à la demande de partenaires industriels . . . 50
- 6.2 Projets de recherche principalement financés par la Direction de la Recherche du BRGM . . . 50
  - 6.2.1 projets de recherche BRGM . . . 50
- 6.3 Autres contributions à des projets de Recherche et Développement . . . 51

7 Participation à l'encadrement de Thèses **52**
- 7.1 Enseignement et participation à l'encadrement de stagiaires . . . 55

8 PUBLICATIONS **57**

8.1 Rang A 57

8.2 Rang B 59

8.3 Autres 59

8.4 Thèse et Mémoire 60

8.5 Communications 60

8.6 Rapports 64

9 Sélection d'Articles **67**

Table des figures

1 Déroulement de franges. l'objectif est de reconstituer la continuité de la phase des interférogrammes obtenus modulo 2π. D'après Gueguen, 2008. 16

2 influence du gradient de déformation sur la qualité de la phase (d'après Chastenet,2001). Cette simulation illustre le fait que la "lisibilité" des franges décroit fortement avec le gradient de phase et ceci d'autant plus que la phase est bruitée. 17

3 Comparaison de résultats issus de l'empilement d'interférogrammes (a) et PSINSAR™ (b). Raucoules et al. 2009 - Résultats obtenus dans le cadre du projet Terrafirma 20

4 Utilisation conjointe d'interférométrie conventionnelle en bande L (données ALOS/PALSAR) et de PSI en bande C (EnviSat/ASAR) sur un phénomène de subsidence (Raucoules 2010, non publié) sur un secteur à couvert agricole (le manque d'indication quant à la localisation du site est délibéré). Un empilement de 3 interférogrammes ALOS/PALSAR a permis de délimiter le phénomène (d'environ 1 km d'étendue) et d'estimer une vistesse de déformation moyenne sur la période 2008-2010. L'utilisation de PSI (Envisat/ASAR) sur des points PS sur le secteur urbanisé en limite de la "cuvette" a fourni une indication quant à l'évolution du mouvement sur la période 2003-2009 avec notamment une forte subsidence en juin 2006 à mettre en rapport avec des désordres observés en surface. 21

5 Un résultat du projet PSIC-4 : nivellement et résultats PSI le long d'un profil de nivellement sur lequel a été identifié à la fois une déformation importante (20 cm sur 10 ans) et un secteur à faible déplacement (moins de 2 cm). Déformation cumulée 1995-2001. On notera l'écart entre équipes sur la zone plutôt stable et la sous-estimation sur le secteur à fort déplacement. 23

6 Estimation des disparités à partir de calcul de corrélation locale (d'après Leprince et al., 2009). i_1 et i_2 sont les contenus des 2 images dans les fenêtres (centrées sur le pixel de coordonnées x et y) à corréler que l'on suppose presque identiques mais localement décalées l'une par rapport à l'autre, I_1 et I_2 leurs TF, $\Delta_x$et Δ_y, les disparités à estimer. 23

7 Stack d'interférogrammes à partir de données provenant des satellites ERS 1 et 2 mettant en évidence un soulèvement de la surface du sol au cours de l'été 1998 au Sud de la gare Saint Lazare. 1 frange correspond à 3 mm de déplacement en ligne de visée. (Le Mouelic et al., 2002) 26

8 Déformation par interférométrie radar (d'après de données des satellites ERS 1 et 2) sur le bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais a) : représentation de l'interférogramme 23/06/1993–31/05/1996. b) : profils Est-Ouest de déformation cumulée (Gueguen et al., 2009) 27

9 Déformation sur la mine de sel (exploitée par dissolution) de Vauvert par interférométrie sur la période 1993-1999. En noir et blanc le réseau de nivellement. En bleu une proposition d'extension du réseau. (Raucoules et al., 2003) 28

10 Affaissement de Roncourt observé par PSINSAR. Séries temporelles pour 3 PS localisés sur la photo aérienne. Les courbes de niveaux sur la photo aérienne correspondent à l'interpolation de mesures de nivellement. 29

11 Pseudo-interférogramme (somme de 3 interférogramme JERS-1) sur le site de Hellbourg couvrant la période janvier 1997-mai 1997. Les points en rouge représentent des mesures GPS aillant mis en évidence des mouvements significatifs. (Delacourt et l., 2009) 30
12 Exemple de calcul de décalages en azimut sur le glissement de Hellbourg (Salazie, La Réunion) sur la période du 13 octobre 2010 au 1er janvier 2011 à partir de deux images radar Haute Résolution COSMO-SKYMED. a) moyenne des 2 images (géométrie radar) b) décalages en azimut (unité pixel ~ 30 cm) en utilisant Gamma (taille de la FFT=128 pixels) c) décalages en azimut en utilisant Cosicorr (taille de la FFT=128 pixels). Les résultats sont sensiblement équivalents même si cosicorr semble donner une résolution plus fine avec en contrepartie plus de pertes (ces différences peuvent probablement être réduites en ajustant les paramètres du traitement). Compte tenu de la durée encore faible entre acquisitions (moins de 4 mois) et de la possibilité de biais (notamment topographiques), ce résultat est difficilement interprétable. Suite à l'acquisition de l'ensemble de l'archive et un cumul de plusieurs résultats, une cartographie plus interprétable du mouvement pourra être proposée. 31
13 Déplacement co-sismique en champ proche obtenu à partir de corrélation d'images PALSAR (ascendant) et ASAR (descendant). A partir de 4 composantes (2 mesures suivant les lignes de visée et 2 suivant les azimuts) les 3 composantes (Est-Ouest, Nord-Sud, verticale) ont été restituées par une procédure par moindres carrés. 32
14 Reconstitution de la déformation résultant du séisme de Machazé (22/02/2006) à partir de l'interférogramme correspondant aux acquisitions du 06/04/2004 et du 07/05/2006 et d'un modèle de déformation basé sur l'inversion de l'interférogramme tenant compte des caractéristiques du séisme et de la géométrie en partie déduite de l'observation de la position de la rupture sur la déformation post-sismique 33
15 Déformation sur le séisme de Haiti (12/01/2010) obtenue par corrélation à partir d'images radar du capteur TerraSAR-X. Contribution du BRGM dans le cadre de la "Cellule d'Intervention d'Expertise Scientifique et Technique". 34
16 Déformation sur le secteur de Parkfield vu par interférométrie radar sur la période 1993-2004 (d'après de Michele et al., 2010b). Vitesse de déformation a) à l'échelle de l'image, b) le long de la faille et comparaison à des mesures au sol. 35
17 Mouvement post-sismique sur le secteur de Machazé (Mosambique) à partir de données ALOS/PALSAR (décembre 2006-mars 2008). (Raucoules et al., 2010b) 36
18 Déformations du Piton de la Fournaise à partir de données Radarsat-1 sur la période 1999-2002 (d'après Carnec et al., 2003). 1 frange correspond à 2.8 cm en ligne de visée. Le tableau joint indique les dates et écarts orbitaux (par rapport à la première image) de chaque acquisition. . . 37
19 Semi-amplitude saisonière PSINSAR à partir de données Envisat ASAR et carte d'aléa (en haut) sur le site de Nogent-sur-Marne. Résultats obtenus dans le cadre d'une étude sur la cartographie de l'aléa Retrait-Gonflement. 39
20 Réflecteurs persistants et réflecteurs diffus - d'après TRE, 2009 41
21 Comparaison de vitesses de déplacement de vagues obtenues à partir de corrélation des bandes panchro et XS1 d'images SPOT 5 (d'après M. de Michele et al., 2010 - non publié) et de vitesses de déplacements issues du modèle SWAN sur un secteur de l'Île de la Réunion. (utilisation de données issues de la base de donnée Kalideos) 42
22 Déplacement vertical pour une injection de 1Mt/an à 1500m de profondeur en fonction de la distance au puits pour différentes durées après le début de l'injection pour un site ayant des caractéristiques du sous-sol comparables au Bassin Parisien (d'après J. Rohmer, 2011 - non publié). Nous voyons que malgré la quantité importante de gaz injecté, la déformation reste faible (il faut en effet ente 5 et 10 ans d'injection pour avoir des déplacements de l'ordre du cm). La technique utilisée (ainsi que la durée pendant laquelle la technique va être utilisée) et le site à surveiller devront faire l'objet d'un choix tenant compte de ces observations. 43
23 Mesure vibrométrique à partir de radar (bande Ka, échantillonage 100Hz) sur un bâtiment sur la commune de Font Romeu. Collaboration IG/BRGM) 43
24 Série temporelle obtenue à patir des mesures vibrométrique radar (mesures et traitement G. Luzi et M. Crosetto). La fréquence correspondant au pic (2.72 Hz) est proche (écart inférieur à 1%) du résultat issu de la modélisation du bâtiment. 44

Liste des tableaux

2 relation entre les composantes de la phase et les caractéristiques des acquisitions 14

1 Introduction

Ce mémoire présente une synthèse des travaux de recherche que j'ai menés ou auxquels j'ai participé dans le domaine de la mesure de la déformation de la surface du sol à partir de données de télédétection satellitaires. Ces travaux s'inscrivaient dans un perspective de contribution à l'évaluation de géorisques (subsidence, glissements de terrains, séismes). Ces travaux (exceptés ceux relatifs à la thèse de F. Vincent soutenue à l'Université Laval, Qc) ont été effectués au BRGM (actuellement au Service de Risques Naturels et Sécurité du stockage de CO2) que j'ai rejoint en 1999, ce qui justifie cet intérêt spécifique pour les thématiques *risque*.

Cette synthèse vise à présenter les techniques (principalement l'interférométrie radar et la corrélation d'images satellitaires) et leur intérêt pour ces thématiques. Des applications et développements que nous avons menés à bien sont décrits et finalement une présentation des publications qui en résultent est faite.

1.1 Nécessité de détecter et mesurer les déplacements de la surface du sol

La surface de la Terre est soumise à différents types de phénomènes pouvant entraîner des déformations. Leurs caractéristiques en termes d'amplitude et d'échelle peuvent varier considérablement suivant le type de phénomène. Dans les domaines des risques naturels et anthropiques, les déformations auxquelles nous pouvons avoir à faire, correspondent à des phénomènes dont l'extension peut aller de plusieurs centaines de km (sismotectonique) à des phénomènes très localisés (affaissements, retrait gonflement, etc.).

Pour une meilleure connaissance de ces aléas ou anticiper leurs conséquences, il peut souvent être nécessaire d'effectuer un suivi de ces déplacements. La cartographie des déplacements ainsi que la connaissance de leur évolution peut fournir une information utile pour la modélisation (ainsi dans le cas des séismes, la confrontation des modèles et des mesures de déformations de surface permet par exemple d'affiner les modèles de déplacement en profondeur) mais aussi la connaissance de la déformation de surface permet de mieux comprendre l'évolution future de phénomènes et leurs conséquences en termes de dommages (par exemple dans le cas d'affaissement miniers).

Des techniques avec instrumentation au sol géodésiques ou géotechniques pour la surveillance de tels phénomènes sont utilisées couramment et permettent une surveillance des phénomènes, il s'agit notamment de nivellement, de l'utilisation de théodolites, GPS, extensomètres (ou fissuromètres) ou inclinomètres. Le choix de l'outil dépend des caractéristiques du phénomène en termes d'échelle et amplitude. L'implantation de ce type d'outils présente néanmoins certaines limitations, notamment : le coût, la nécessité d'installer du matériel de façon permanente (nécéssitant par conséquent une maintenance) ou de matérialiser des points de mesures récurrents. Par ailleurs, dans de nombreux cas, ce type d'outil n'est installé qu'après la constation d'un évènement (séisme, glissement, bâtiments fissurés, etc.). Ils ne permettent alors pas de fournir une description complète du phénomène car une partie majeure de la déformation n'a pu être mesurée.

Les techniques de télédétection spatiale (utilisant des données issues de satellites d'observation de la Terre) permettent de remplacer ou completer l'information issue des mesures au sol. L'intérêt de ce type de dispositif est multiple :

- il offre la possibilité d'effectuer des études *a posteriori* fournissant un historique de la déformation. En effet, la rétro-analyse des images d'archives (en ce qui concerne l'interféométrie radar, l'archive de données des satellites ERS permet de remonter à 1992), permet de suivre un mouvement antérieurement aux manifestations qui ont permis sa détection. On notera néanmoins que certains capteurs actuels (par exemple Radarsat 2, Cosmo-Skymed, TerraSAR X, ...) nécessitant une programmation des acquisitions ne permet que partiellement de repondre à cette utilisation.

- les précisions des mesures résultant de ses techniques sont variables et dépendent des techniques utilisées (interférométrie conventionnelle, interférométrie avec traitement multitemporel de jeux de don-

nées importants, correlation d'images) et des capteurs utilisés (résolution, longueur d'onde). Néanmoins, suivant le contexte, elle peuvent être équivalentes aux précisions des mesures au sol.

- la couverture spatiale des capteurs satellitaires permet d'une part d'étudier la plupart des zones affectées par un risque associé à de la déformation ; d'autre part, la taille des images (de l'ordre de la dizaine à la centaine - voire quelques centaines - de km) permet un traitement de l'échelle locale à régionale à partir de jeux pas trop volumineux d'images.

- la répétitivité des acquisitions (de quelques jours pour COSMO-SKYMED à 35 jours pour ERS et EnviSAT) permet une surveillance avec un échantillonage adapté au type de phénomène (notamment adapté à la vitesse du déplacement).

- ces techniques ne nécessitent pas (sauf cas spécifiques utilisant des dispositifs au sol tels que des *cornets réflecteurs* ou *transpondeurs*) une intervention au sol. On peut ainsi s'affranchir d'une des principales limitations des techniques de surveillance au sol.

- suivant la technique utilisée, le résultat se présente souvent sous forme d'image. Ceci fournit directement une vision synoptique de la déformation (et donc une carte) alors que les méthodes au sol produisent un réseau de points de mesure dont la densité est souvent limitée du fait des possibilités des opérateurs.

Ces techniques spatiales présentent toutefois de nombreuses limitations pour leur utilisation. Elles font l'objet du chapitre 2.

1.2 Un sujet transverse du point de vue thématique

Il faut signaler que dans le domaines des risques, différents aléas se traduisent par des phénomènes de déformations de surface. Nous nous intéresserons aux suivants :

Les risques anthropiques :

- les risques liés à la présence de mines ou d'ouvrages souterrains : une déformation importante peut se produire durant l'activité de la mine (ou la construction de l'ouvrage) et fait généralement l'objet de suivis au sol qui peuvent être complétés par des techniques de télédétection. Le suivi de déformations résiduelles présente également un intérêt important dans le cadre de la surveillance après-mine. En effet, il permettrait dans certains cas d'anticiper d'éventuels dommages ; un suivi (généralement par des mesures au sol) peut faire l'objet d'obligations réglementaires.

- les pompages : l'extraction (ou l'injection) de fluides (eau, pétrole, gaz, ...) peut se traduire par une subsidence (ou un gonflement). Dans les deux cas, les techniques de télédétection satellitaires peuvent aider à déterminer la localisation de la déformation ainsi que son évolution. Ces informations ont un intérêt en termes de prévention mais également dans le but de distinguer les causes anthropiques des causes naturelles des éventuels dommages occasionnés au bâti sur une zone à risques et ainsi mieux en identifier les responsabilités respectives.

Le risque sismique :

- la cartographie des mouvements asismiques le long des failles permet d'indentifier les zones de blocages et d'accumulation de contrainte dans la perspective d'une meilleure connaissance de l'aléa.

- les techniques interférométriques permettent de cartographier les déformations (de surface) co-sismiques. Pour cette application, il n'y a pas d'équivalent parmi les techniques au sol pour ce qui est de la capacité de l'interférométrie différentielle à établir une cartographie de la déformation (hors champ proche pour les séismes de magnitude élevée pour lesquels la technique peut s'avérer limitée) sur une étendue de plusieurs dizaines de km. En effet, l'utilisation d'outils géodésiques au sol, impliquerait la présence d'un réseau de mesure dense avant que le séisme ait eu lieu.

Les risques liés aux mouvements gravitaires :

- la surveillance de glissements de terrains actifs sur des sites à enjeux est nécessaire dans une perspective d'alerte. La vitesse (parfois élevée) du glissement et les changements des caractéristiques de surface produits peuvent être toutefois des facteurs limitants pour l'utilisation de techniques de télédétection (interférométrie radar ou corrélation optique) satellitaires qui peuvent avoir des répétitivités trop faibles pour des mouvements rapides.

- la détection de mouvements non répertoriés (en particuliers les glissement lents n'ayant pas été repérés en raison de l'absence de manifestation aisemment observable) ou de mouvements sur des glissements considérés comme inactifs est une autre application de techniques satellitaires.

Autres thématiques :

Bien que secondaires par rapport aux travaux de recherches que nous avons menés, on peut citer les deux autres sujets suivants :

- les mouvements de glaces : l'interférométrie radar permet de suivre les déformations des glaces (écoulement de glaciers, déformation de glaces de rivières), sujet qui peut concerner le domaine des risques liés au climat mais aussi la surveillance des fleuves navigables (plaques de glace, embâcles)

-les déplacements à la surface de l'océan (vagues) : les caractéristiques de la houle (le mouvement des vagues pouvant dans certaines conditions être accessibles par des techniques de télédétection) peuvent être en effet utiles en ce qui concerne le risque côtier et en particulier l'action de l'océan sur le trait de côte.

2 Techniques

2.1 Interférométrie

Au cours des 11 années sur lesquelles s'étendent les projets de recherche décrits, les capteurs satellitaires radar et les techniques de traitement de données ont évolués. Alors qu'au début des années 2000, les archives ERS étaient la principale source de données (avec occasionnellement des données Radarsat-1 et JERS-1), actuellement une vaste gamme d'outils est diponible (différentes longueurs d'ondes, résolutions, répétitivités, polarités) mais fournissant parfois une archive disparate du fait d'un nombre de modes importants pour chaque capteur.

De même, les chaînes de traitement ont évolué avec notamment l'apparition de techniques type PSI (Persistent Scatterer Interferometry). Il faut noter que cette évolution s'est faite en parallèle à l'évolution des outils informatiques disponibles pour des équipes de recherche comme la notre. A titre d'exemple, les traitements sur Montceau-les-Mines (décrits par la suite notamment dans Raucoules et al., 2007) ont été effectuées sur une machine Sun Sparc 5 ne disposant que de 4 Go de Disque Dur, nous imposant (du fait de ces performances réduites) de traiter des images ERS découpées sur les zones d'intérêt afin de minimiser le coût en termes de temps de calcul et d'espace disque. Les données étaient par ailleurs fournies sur bande magnétique, ce qui était une contrainte importante dans la perspective d'automatisation du traitement. Les machines actuellement disponibles permettent un traitement rapide de dizaines d'images et des traitement sophistiqués requis pour le PSI.

La présentation de la technique interférométrique ci-dessous est adaptée de Raucoules et al. (2003 et 2007) principalement basés (en ce qui concerne les aspects théoriques généraux) sur Massonnet et al. (1992 et 1998) et Ferretti et al. (2000 et 2001).

2.1.1 Interférométrie radar différentielle conventionnelle

historique

C'est une technique consistant à utiliser des jeux d'images Radar à Synthèse d'Ouverture (SAR, Synthetic Aperture Radar) afin d'extraire une information à partir de laquelle ont accède à une mesure géométrique (hauteur ou déformation). Des développements et utilisations de l'interférométrie radar ont déjà étaient menés à bien dans les années 70 (notamment Graham 1974 pour des applications aéroportées visant à produire des MNT) et 80 avec notamment le satellite SeaSAT (Gabriel et al., 1989 s'interesse déjà à l'utilisation de l'interférométrie radar pour la mesure de déformation du sol). C'est avec le lancement du satellite Européen ERS-1 (1992-1996) que l'interférométrie radar différentielle a pris son essor. En effet, la capacité à produire une archive homogène et des caractéristiques orbitales favorables (écart orbitaux relativement faibles) à l'interférométrie ont été des éléments importants pour le développement de cette technique. Parallèment des chaînes de traitements appropriées (en particulier, Diapason (CNES,1992), Gamma (Gamma-RS,1997), Roi-Pac(JPL, 2000)) ont été développées. Elles ont par la suite incorporé des méthodes de traitement et post-traitement notamment de type PSI (PSINSAR^{TM}(TRE), IPTA (GAMMA), StamPS (Université de Stanford), SPN (Altamira), etc...). Actuellement, il existe des outils performants et de nombreux capteurs, couvrant différents longueurs d'ondes et résolutions.
L'équipe du BRGM dispose depuis 1999 de licences Gamma (MSP/ISP/DIFF puis IPTA depuis 2004) permettant une utilisation commerciale des produits, outil à partir duquel la plupart des résulats présentés ont été produits.

Principe de l'interférométrie radar

L'interférométrie radar en tant qu'outil de télédétection est basée sur la combinaison de 2 images radar (ce principe a été exposé dès 1974 par Graham). Il permet soit d'extraire la topographie locale

(production de Modèles Numériques de Terrain) soit de détecter et quantifier la déformation du sol ayant eu lieu entre deux acquisitions d'images SAR. Le SAR est un système actif (il émet sa propre radiation) embarqué sur une plateforme se déplaçant (en particulier des satellites). La plupart des capteurs utilisés en télédétection spatiale travaillent en bande X (~3cm), C(~ 5.6 cm) ou L (~23cm). Toutefois d'autres longueurs d'ondes sont envisagées (notamment bande P avec le projet satellitaire *Biomass* en cours d'évaluation par l'ESA). Ces fréquences traversant les nuages, les capteurs SAR peuvent être utilisés indépendamment des conditions météorologiques. Les sytèmes SAR enregistrent (pour un élément de résolution donné) un signal codé sous forme d'une matrice de nombres complexes (généralement amplitude et phase, noté $S = Ae^{i\phi}$) qui constitue l'image SAR.

L'image SAR est échantillonnée en azimut (abscisse curviligne sur l'orbite) et distance entre le capteur et les élements rétrodiffusant au sol. L'amplitude caractérise la façon dont le champ électromagnétique est rétro-diffusé par des cibles situées dans chaque cellule de résolution (pixel) de l'image SAR. La phase, qui correspond à la différence de phase entre le signal émis et reçu (définie à 2π près), est reliée à la distance entre l'antenne radar et les cibles incluses dans la zone au sol correspondant au pixel de l'image.
La phase s'exprime comme $\phi = \frac{4\pi}{\lambda} R \ [2\pi]$ où λ est la longueur d'onde et R la distance capteur-cible. Cette phase est très sensible à la variation de distance : une variation de phase de 2π correspond à un déplacement de la moitié de la longueur d'onde λ. Pour les capteurs fonctionnant en bande C (ERS, EnviSat/ASAR, RadarSat), $\lambda/2$=$2.8\ cm$. Les données radar sont échantillonnées en distance suivant la ligne de visée (LOS - *line of sight*), c'est-à-dire suivant la direction reliant le capteur aux cibles imagées. La phase d'une cellule de résolution est la phase de la somme cohérente des contributions des différentes cibles qu'elle contient. La distribution de ces cibles nous étant inaccessible, la phase mesurée ne nous permet pas d'accéder directement à une information sur la distance capteur-cible.

En effectuant une différence de phase (qu'on appelle interférogramme) entre deux images radar (par convention, une des images sera choisie comme référence appelée *maitresse*, et l'autre *esclave*) obtenues à des dates différentes mais avec des géométries d'acquisitions tres proches, l'interférométrie permet de nous affranchir de cette contribution intrinsèque à la phase. En effet, on suppose que le phenomène de diffusion est resté le même (la cellule de résolution contient la même distribution de cibles sur les 2 images), aussi la différence élimine cette contribution intrinsèque. On notera que cette supposition correspond à une absence de ce que l'on définit par la suite comme de la décorrélation temporelle : en effet, si la distribution des cibles a évolué entre les deux acquisitions, de l'information a été en partie perdue.
Dans le cas favorable, la phase interférométrique peut alors s'écrire comme $\Phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}\delta R \ [2\pi]$ où δR est la différence des distances capteur-cibles entre les deux dates/positions d'acquisition.
Cette information géométrique contient à la fois une information sur la topographie (en raison du léger écart entre géométries d'acquisition) et sur le mouvement subi par les cibles. Du fait que la phase interférométrique est obtenue modulo *2π* radians, l'image représentant la phase sera constituée de franges correspondant à une variation de phase de *0* à *2π* (cycle complet de phase). Finalement, il faut signaler que la mesure ne peut être absolue, d'une part, parce que les orbites n'ont pas une précision suffisante (c'est-à-dire, du même ordre que la précision de la mesure), d'autre part en raison d'artefacts atmosphériques : la mesure sera donc relative à un point ou zone de référence de l'image que l'on suppose immobile et, de plus, l'interférogramme produit pourra être affecté de biais sous forme d'une tendance à l'échelle de l'image se superposant à la phase produite. Ce dernier point aura pour conséquence qu'il sera difficile de mesurer des déformations de longueurs d'ondes spatiales supérieures à la taille de l'image sans autre information sur les caractéristiques de cette déformation.

Nous pouvons alors représenter la phase interférométrique comme la somme de plusieurs contributions :

$$\Phi = \phi_{topo} + \phi_{def} + \phi_{tp} + \phi_{atm} + \phi_{orbit} + bruit\ [2\pi]$$

où :
$\phi_{topo} = \frac{2\pi h}{E_a}\ [2\pi]$ est la composante topographique de la phase. h est la hauteur de la cible par rapport au point de référence.

$E_a = \frac{\lambda R \sin i}{B_\perp}$ est l'altitude d'ambiguïté (Massonnet, 1992). $B_\perp$ est la composante perpendiculaire de l'écart orbital, R la distance satellite-cible, i est l'angle d'incidence estimé sur le secteur.

$\phi_{def} = \frac{4\pi}{\lambda}\delta r\ [2\pi]$ est la composante de déformation. δr est le déplacement de la cible entre les 2 acquisitions.
Dans le cas de mouvements à vitesse constante (V) on aura $\phi_{def} = \frac{4\pi}{\lambda} V\, \delta T\ [2\pi]$ où δT est la durée entre les deux acquisitions. Du fait de cette formulation simple (mouvement défini par un seul paramètre V), les mouvements linéaires seront des cas plus favorables pour les techniques visant à traiter des séries temporelles d'images (notamment PSI).

ϕ_{tp} est le terme de terre plate. Il correspond au fait que les orbites ne coïncidant pas exactement, la surface de la terre (hors topographie) a une signature en termes de phase.

ϕ_{atm} est la composante (ou artefact) atmosphérique. Ce terme est explicité à la section suivante.

ϕ_{orbit} lié a des erreurs sur l'information orbitale.

le terme de bruit est principalement lié au phénomène de perte de cohérence.

De façon simillaire à l'image SAR, l'interférogramme est souvent représenté sous forme d'une matrice de nombres complexes dont l'amplitude correspond à l'amplitude d'une des images SAR (ou la moyenne de deux) ou bien à la cohérence interférométrique.
Ainsi, suivant l'application envisagée on essayera d'extraire une composante plutôt qu'une autre ce qui se traduit par des choix au niveau du traitement mais également lors de la sélection des données. En effet, à titre d'exemple, pour faire du Modèle Numérique de Terrain on favorisera des δT faibles (pour limiter la perte de cohérence et l'influence de la composante de déformation) alors que pour cartographier la subsidence on aura intérêt à avoir des $B_\perp$ les plus faibles possibles (pour limiter la décorrélation spatiale et l'influence de la composante topographique). Plus généralement, les différences de comportement au niveau des corrélations des différentes composantes vis-à-vis des écarts temporel et orbitaux ainsi que leur corrélation spatiale sont valorisées par les différentes méthodes visant à séparer les composantes de la phase interférométrique. Le tableau 2 (d'après Raucoules et al. 2007) résume les corrélations entre les composantes de la phase et des caractéristiques relatives des acquisitions.

Pour extraire la déformation, la composante topographique peut être modélisée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain et soustraite de l'interférogramme. On parle alors d'interférogramme différentiel. Toutefois, les imprécisions sur le MNT et les orbites peuvent avoir pour effet qu'il y ait une composante résiduelle qui affectera la qualité de l'interférogramme différentiel.

Limitations

Les principales limitations de l'Interférométrie pour la détection de mouvements sont la perte de cohérence, les artefacts atmosphériques, des résiduelles topographiques et des limitations instrumentales

composante	Ecart temporel	Composante perpendiculaire de l'écart orbital $B_\perp$	distance entre deux points de l'image
ϕ_{topo}	*décorrélé*	*proportionalité*	*corrélation variable suivant le cas*
ϕ_{def}	*fortement corrélé (sauf cas particuliers)*	*décorrélé*	*corrélation variable suivant le cas*
ϕ_{atm}	*décorrélé*	*décorrélé*	*fortement corrélé*
ϕ_{orbit}	*décorrélé*	*décorrélé*	*fortement corrélé*
bruit	*décorrélé*	*décorrélé*	*décorrélés*

TABLE 2 – relation entre les composantes de la phase et les caractéristiques des acquisitions

telles que la répétitivité ou la taille du pixel.

– *Perte de cohérence*

La perte de cohérence étant due à la modification de la distribution de cibles ou de leurs caractéristiques à l'intérieur de la cellule de résolution entre les deux passages du capteur, deux types de phénomènes de décorrélation affectent la phase interférométrique : la décorrélation temporelle et la décorrélation spatiale. En effet, entre les deux acquisitions d'une part la distribution de cibles a été modifiée du fait de l'évolution physique et géométrique de ces cibles (parmi les causes possibles : croissance végétale, érosion, labours, présence d'eau modifiée, ...) mais, d'autre part, les cibles sont observées depuis des positions différentes du fait que les orbites ne sont pas parfaitement identiques. Ceci se traduit par une dégradation de la cohérence avec $B_\perp$ (composante perpendiculaire de l'écart orbital) et notamment par une valeur maximale $B_{\perp c} \approx \frac{\lambda R \tan\theta}{2\,dr}$ (ou dr est la résolution en distance suivant θ qui est l'angle d'incidence) pour ce paramètre au delà de laquelle la cohérence est perdue. Dans les deux cas, la contribution à la phase intrinsèque à l'élément de résolution n'est pas conservée à l'identique entre les deux acquisitions : le calcul de la phase interférométrique par différence n'élimine donc que partiellement cette contribution.

On définit pour un pixel donné la cohérence à partir des deux valeurs complexes (maitresse S1 et esclave S2) comme $\rho = \left| \frac{E[S_1 S_2^*]}{\sqrt{E\left[|S_1|^2\right] E\left[|S_2|^2\right]}} \right|$.
C'est un indice mettant en évidence la variation des caractéristiques de rétrodiffusion. A ce titre la cohérence est à la fois un indicateur de la qualité de phase interférométrique et de changements des caractéristiques de la surface du sol. Si l'objectif de la mesure interférométrique est la déformation de la surface du sol, on privilégiera des écarts orbitaux faibles et des durées entre acquisitions éventuellement faibles mais surtout compatibles avec la déformation à mesurer.

– *Artefacts atmosphériques*

Les fluctuations à l'intérieur des couches troposphériques et ionosphériques induisent, du fait des allongements dus à la réfraction des ondes dans l'atmosphère, des artefacts atmosphériques sur l'interférogramme dont l'aspect peut être simillaire à celui d'une signature de déformation (et donc induire une fausse détection ou simplement dégrader la précision de la mesure). Ceux-ci résultent de la variation de ces fluctuations entre les deux dates d'acquisition.

Par ailleurs, outre ces fluctuations, la variation entre les deux acquisitions des caractéristiques globales des couches atmosphériques (supposées stratifiées et homogènes) traversées se traduit par des artefacts proportionnels à l'altitude (Beauducel et al., 2000) et par conséquent semblables à une erreur

sur $B_\perp$. L'estimation d'un coefficient de proportionalité par régression linéaire entre l'interferogramme différentiel et un Modèle Numérique de Terrain permet une estimation à partir du MNT de cet artefact (et éventuellement d'une partie de la composante topographique résiduelle) afin de corriger l'interférogramme. On notera toutefois que l'hypothèse d'un même coefficient de proportionalité pour l'ensemble de l'image n'est pas toujours valable.

En ce qui concerne les artefacts liés aux fluctuations spatiales et temporelles de l'atmosphère, ils peuvent typiquement atteindre une frange interférométrique (pour un capteur en bande C) voire plus sur quelques kilomètres de la zone couverte par une image SAR satellitaire. Comme les distorsions de phase produites sont très dépendantes des conditions météorologiques pouvant elles-mêmes être influencées par des conditions locales, il n'existe pas de méthode efficaces permettant de les modéliser sans des données météorologiques fines. Aussi en interférométrie radar différentielle conventionnelle nous tirerons parti du fait que ces effets sont faiblement corrélés temporellement : pratiquement, on fait l'hypothèse que pour les deux dates d'acquisition (pour les cas des capteurs satellitaires actuels ou passés, les acquisitions utilisées pour la mesure de déformation sont séparées d'au moins 1 jour), les fluctuations sont décorrélées. Dans ces conditions, l'utilisation d'une série d'interférogrammes "indépendants" (c'est-à-dire n'utlisant pas d'image commune) couvrant la période au cours de laquelle le phénomène a eu lieu est utile. En effet, on peut considérer que sur cette série d'interférogrammes, la signature de déformation sera semblable (au niveau forme et localisation, mais pouvant être modulée par la durée entre acquisitions en ce qui concerne l'amplitude du déplacement) pour tous les interférogrammes alors que les artéfacts atmosphériques diffèreront.

– *Topographie résiduelle et composante orbitale résiduelle*

Cet artefact est dus à une précision insuffisante de l'information orbitale. Il comprend un terme (orbital résiduel) similaire à la composante de terre plate et un terme (topographie résiduel) dépendant de la topographie. Ce dernier terme est souvent négligable si les écarts orbitaux des interférogrammes sont faibles et/ou le relief de la zone, modéré. Il peut être toutefois utile d'utiliser des orbites précises telles que celles fournies par le Delft Institute for Earth-Oriented Space Research (DEOS) pour les utilisateurs de données ERS et ASAR. La composante orbitale résiduelle pouvant être approchée par une surface de grande longueur d'onde (par rapport à la taille de l'image), elle peut être également estimée *a posteriori* en effectuant une régression sur l'interférogramme. Par exemple, la chaîne Gamma permet d'estimer cette surface à partir d'un calcul de transformée de Fourier sur l'interférogramme complexe ; l'estimation du gradient de phase ainsi effectuée permet à la fois une correction de la composante orbitale et d'affiner l'estimation de l'information orbitale pouvant être utilisée pour une meilleure correction de la composante topographique résiduelle.

– *Autres limitations*

  – Déroulement de franges

Les phases étant obtenues modulo 2π prés (les interférogrammes se présentent sous forme d'ensemble de franges), il faut généralement - bien que les interférogrammes non déroulés peuvent dans certains cas être interpréter et fournir une information utile - reconstituer la continuïté de la phase afin de pouvoir extraire la mesure de déplacement. Nous avons donc à faire à un problème inverse consistant à produire une image de phase continue proportionnelle à la mesure physique que l'on souhaite extraire en corrigeant chaque pixel d'un nombre entier de fois 2π. Dans l'absolu, un tel problème n'a pas de solution unique. Toutefois, en se basant sur l'idée que dans l'idéal la différence de phase entre deux pixels adjacents doit avoir une valeur absolue la plus faible possible (c'est-à-dire inférieure à π) pour la plupart de l'image, une solution peut être obtenue. Les algorithmes de déroulement en 2 dimensions procèdent en minimisant les différences de phases entre pixels adjacents soit au niveau local en corrigeant l'image de proche en proche (mais en imposant certaines restrictions au parcours - p.e Goldstein et al., 1988),

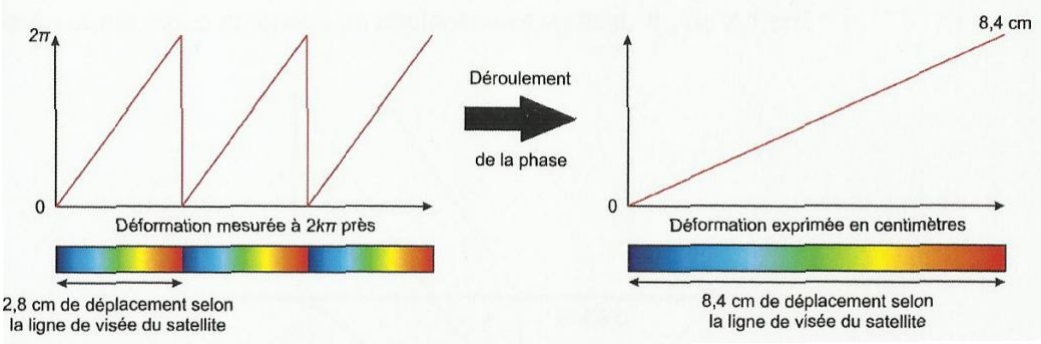

FIGURE 1 – Déroulement de franges. l'objectif est de reconstituer la continuité de la phase des interférogrammes obtenus modulo 2π. D'après Gueguen, 2008.

soit au niveau global par une procédure d'optimisation (p.e. Ghiglia et Romero, 1994). Dans certains cas, des erreurs de déroulement peuvent néanmoins se produire en présence de bruit (secteurs de l'image à faible cohérence) ou de gradients de déformation importants et se propager à toute une partie plus ou moins étendue de l'image.

– Gradient de déformation

Compte tenu du fait que la phase est définie modulo 2π, si le gradient de phase est trop important, les franges seront si ressérées qu'elles ne seront plus discernables. Mathématiquement, le problème peut être vu de façon équivalente soit du point de vue de l'échantillonage (on peut établir une relation entre le gradient de phase et la fréquence locale sur l'interférogramme complexe qui ne pourra pas être supérieure à sa fréquence de coupure) ou du déroulement de frange. Suivant ce deuxième point de vue on peut constater qu'une difference de phase entre deux pixels adjacents supérieure à π radians ne peut pas être déroulée correctement : après déroulement, le gradient obtenu serait inférieur à π rad/pixel et l'information sur la déformation perdue. Ce seuil d'une demi-frange par pixel peut être fortement abaissé en présence de bruit (perte de cohérence) sur la phase. Cette contrainte est une limite importante à la technique du fait qu'elle impose une borne supérieure à son utilisation. Pour donner un ordre de grandeur, si l'on utilise un capteur en bande C avec une incidence proche de ERS (23°) une frange correspond à environ 3 cm en cas de déplacement vertical. Si la résolution de l'interférogramme produit est d'environ 20m, on ne pourra pas mesurer (même dans un cas idéal du point de vue cohérence) de subsidence supérieure à 1,5 cm/20m entre deux acquisitions (p.e. 35 jours pour ERS). On notera que dans ces conditions des capteurs avec des résolutions plus fine peuvent permettre d'accéder à des gradients de déformation plus élevés.

– Caractéristiques du capteur

L'archive ERS débute en 1992 (et est fiable jusqu'à début 2001) - aussi on ne peut pas remonter avant cette date mais c'est déjà considérable - et fournit des images séparées par des durées de 35 jours avec un gap d'environ 1 an en 1994. A partir de 2002 et jusqu'à fin 2010, EnviSAT/ASAR fournit une archive semblable (quoique du fait de modes d'acquisition plus variés, cette archive est moins homogène). Compte tenu de la limite sur les gradients de déformation, cet écart de 35 jours va donc conditioner la vitesse maximale de déformation du sol (pour une taille de déformation donnée). D'autres satellites, tels les récents satellites Terrasar X ou Cosmo-Skymed, proposent des répétitivités de quelques jours à quelques semaines (et donc seront plus aptes à mesurer des phénomènes rapides), néanmoins actuelle-

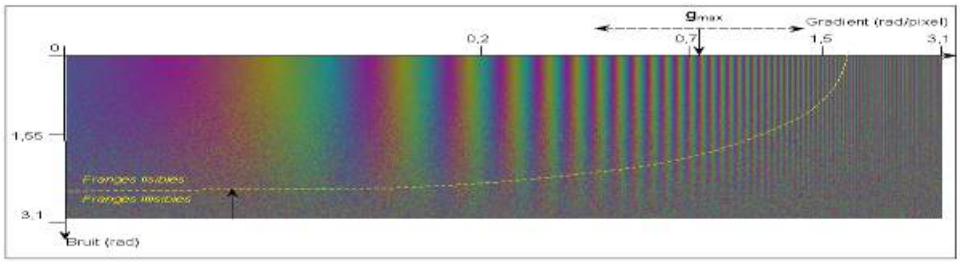

FIGURE 2 – influence du gradient de déformation sur la qualité de la phase (d'après Chastenet,2001). Cette simulation illustre le fait que la "lisibilité" des franges décroit fortement avec le gradient de phase et ceci d'autant plus que la phase est bruitée.

ment il n'y a pas d'acquisition systématique et ils nécéssitent une programmation des acquisitions.

L'angle de visée du capteur détermine le lien entre le déplacement de la surface du sol et sa mesure en ligne de visée. Ainsi, avec un angle de visée faible (par exemple 23 °) la mesure interférométrique est nettement plus sensible au déplacement vertical qu'horizontal. En revanche, avec une incidence proche de 45° on sera aussi sensible au déplacement horizontal que vertical. Il est, par ailleurs, important de remarquer que contrairement au mouvement vertical, la mesure d'un déplacement horizontal nécessite la mesure de 2 composantes. Ceci peut être obtenu en combinant des mesures interférometriques en modes ascendant et descendant (en d'autres termes, dans un cas le site d'etude est observé depuis l'Est dans l'autre cas depuis l'Ouest). Néanmoins, l'angle entre les orbites montantes et descendantes étant en général faible, on sera peu sensibles aux mouvements Nord-Sud avec des satellites à orbites quasi-polaires. On genère ainsi deux séries d'interférogrammes à partir desquelles on extrait les deux composantes horizontales du déplacement (en admettant qu'il n'y a pas de composante verticale du mouvement car un mouvement en 3 dimensions n'est pas accessible par cette méthode).

Finalement, la fréquence du capteur peut jouer un rôle important. Dans le domaine du radar, les fréquences les plus faibles sont moins sensibles à la présence de couvert végétal et pénètre mieux la couche superficielle du sol. Dans ces conditions les capteurs fonctionnant en bande L sont moins affectés par la décorrélation temporelle (en dehors des zones urbaines ou arides) que les capteurs fonctionnant en bande X ou C.

2.1.2 Contribution des travaux de recherche présentés à la technique interférométrique différentielle conventionnelle

Cette section décrit brièvement des apports à la technique interférométrique radar différentielle classique issus des travaux de recherches que j'ai menés ou auxquels j'ai participé.

Reconstitution de series temporelles d'images de phases. Inversion par moindres carrées d'interférogrammes déroulés.

Les dévelopements effectués dans ce domaine en 2001 et 2002 (Le Mouelic et al., 2005) en collaboration avec Stéphane Le Mouelic, visaient à adapter la technique d'inversion proposée par Usai (2003) pour une utilisation plus opérationnelle.

L'objectif était de resconstituer à partir d'une série d'interférogrammes déroulés obtenus à partir d'un jeu de données SAR, une séquence ordonnée d'images de phases correspondant à chacunes des dates en prenant la première date de la série comme référence. Nous avons ainsi une série temporelle d'images de phases pouvant être interpréter en termes de déformations.

Pour le choix des interférogrammes à inverser nous privilégions une sélection visuelle des interférogrammes plutôt que des procédures automatiques basée sur la cohérence ou l'écart orbital (bien que l'on peut toutefois imposer une limite sur la composante perpendiculaire de l'écart orbital). En effet, il nous est apparu relativement simple (même si nous avons une centaine d'interférogrammes) de calculer un nombre important d'interférogrammes et de les faire défiler en éliminant les plus décorrélés. Par ailleurs, en les faisant défiler, on peut indentifier des signatures communes à différents interférogrammes et rejeter certains clairement entachés d'artefacts atmosphériques (fluctuations de franges importantes). Les interférogrammes peuvent être représentés comme suit.

$\begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ ... \\ ... \\ \Phi_M \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ ... \\ \phi_N \end{bmatrix}$ où A est une matrice de N colonnes par M lignes, composée de 0, 1 et -1 de telle sorte chaque interférogramme Φ_k ($k \in [1\,,\,M]$) est la différence de deux images de phases ϕ_l et ϕ_m correspondant à deux dates d'acquisitions.

Une estimation peut être faite des images de phases à partir de la formulation par moindres carrés suivante : $\left[\hat{\phi}\right] = (A^t A)^{-1} A^t \left[\hat{\Phi}\right]$

Ce type d'outils est desormais inclus dans plusieurs chaînes interférométriques (par exemple l'outil "multi-baseline" de Gamma IPTA)

On notera qu'une fois produites les images de phases, on peut estimer une carte de vitesse linéaire et une carte d'écart à la linéarité (faisant ressortir les mouvements non linéaires) qui sont souvent plus interprétables (Le Mouelic et al. 2005) que le simple jeu d'images de phases.

Nous avons toutefois observé (Ristori, 2009 ; Raucoules et al., 2010) que l'estimation de la vitesse linéaire à partir de ces images de phase n'est généralement pas meilleure que directement à partir des interférogrammes différentiels déroulés suivant la formulation : $\widehat{V} = \frac{\sum \Delta T_i \Phi_i}{\sum \Delta T_i^2}$

2.1.3 Principe des techniques PSI (interférométrie sur points persistants)

La technique des réflecteurs persistants a été initialement développée par l'équipe du Politecnico di Milano sous l'appélation PSINSAR^{TM} interférométrie sur réfecteurs permanents). La technique se base sur des points de l'image ayant des caractéristiques en termes de radiométrie spécifiques et sur un jeu de données SAR important (typiquement un nombre N allant de 30 à 50 images). Le but est de garder un réseau de points sur lesquels les inconvénients précédemment décrits peuvent être réduits. On améliore ainsi la précision de la mesure aux dépends de la densité de points. Plus spécifiquement, il s'agira de séparer la composante de déformation des composantes topographique et atmosphérique et de faire face aux phénomènes de décorrélation géométrique et temporelle. Les points (ou PS) peuvent être sélectionnés suivant diverses méthodes. Nous nous interessons à deux qui sont celles utilisées par PSInSAR et IPTA. La premiere consiste à extraire des points dont la radiométrie est stable dans le temps suivant un critère statistique basé sur le rapport de l'écart-type de la série temporelle (valeur pour chaque acquisition) des intensités du pixel et de leur moyenne. Le but est de garder des points dont l'intensité varie peu dans le temps compte tenu de leur intensité. La seconde se base sur la diversité spectrale de la phase estimée à partir de l'intensité combinée à des valeurs élevées de rétrodiffusion (Werner et al., 2003), cette méthode est moins performante que la première (dans la mesure ou la première correspond réellement à la définition d'un PS tel que défini par Ferretti et al., 2000) mais plus fiable si le nombre d'images est faible (dans la mesure où les cartes de PS peuvent être estimées sur des images individuelles puis éventuellement fusionnées). La diversité spectrale est estimée à partir de

rapport moyenne (spatiale locale) sur ecart-type des intensités : des valeurs au dessus d'un certain seuil permettent d'identifier le point. D'autres auteurs (p.e. Agram, 2010) ont proposé des techniques de sélection par seuillage du SCR (signal to clutter ratio) dont l'estimation basée sur le rapport (à l'intérieur d'une fenêtre entourant le point à tester) des intensités des parties de la fenêtre correspondant aux lobes supposés d'une cible ponctuelle forte et du reste de la fenêtre.

Ces sélections sont basées sur l'hypothèse qu'à l'intérieur d'un pixel identifié comme un PS, une cible (ou un nombre très limité de cibles) quasi ponctuelle et stable dans le temps contribue à l'essentiel du signal rétrodiffusé. De ce fait, le pixel est peu affecté par de la décorrélation temporelle : en effet les caractéristiques physiques et géométriques de la cible évoluent peu sur l'ensemble des images. De même, la distribution des rétrodiffuseurs prépondérants à l'intérieur de l'élément de résolution étant très simple (voire limitée à un seul rétrodiffuseur), ce que nous avons précédemment appelé contribution intrinsèque de la phase est moins sensible à la géométrie d'acquisition (et donc à la composante perpendiculaire de l'écart orbital $B_\perp$) que pour les autres pixels de l'image. Les PS seront donc moins affectés par la décorrélation spatiale et permettent même d'utiliser des valeurs $B_\perp$ au dessus de la valeur théorique $B_{\perp c}$ limitante pour l'interféométrie classique.

Une fois le réseau de points PS défini, à partir des N images seront calculés N-1 interférogrammes différentiels par rapport à une des image définie comme référence. Les valeurs de phases de ces interférogrammes seront utilisées uniquement sur les PS. Une densité de PS suffisante (au moins plusieurs par km²) est nécessaire afin d'une part d'isoler la composante atmosphérique et de permettre un déroulement spatial fiable. Les PS correspondant souvent à des structures bâties ou des roches affleurantes, la densité de PS en zones végétalisées sera plutôt faible ; la technique s'avére plus performante en zone urbaine où la densité de PS peut atteindre le millier de points par km².

En se basant sur les caractéristiques (en termes de corrélation temporelle et spatiale) des composantes topographiques, atmosphériques et de déformation de la phase interférométrique. Bien qu'il existe plusieurs algorithmes différents suivant les chaînes, ces trois composantes sont globalement séparées de la façon suivante (méthode notamment utilisée par IPTA) :

- la composante topographique étant proportionelle à $B_\perp$ et dh (écart entre la hauteur du PS et le MNT de référence). La pente d'une régression linéaire de la phase par rapport à $B_\perp$ fournira une estimation de dh, d'autant plus fine que le nombre d'acquisitions sera important et les $B_\perp$variés.

- la composante de déformation linéaire est obtenue à partir d'une régression linéaire de la phase par rapport au temps (dates d'acquisitions). Une estimation de la vitesse moyenne de déplacement est ainsi calculée.

- une fois déduites ces 2 composantes des valeurs de phase, la composante atmosphérique pourra être estimée à partir de filtrages spatiaux et temporels. Le but est de garder les hautes fréquences temporelles et basses fréquences spatiales de la phase (de laquelle la topographie et le mouvement ont été retirés)

Des itérations seront éffectuées afin d'affiner les estimations et accéder à une estimation de la composante non-linéaire du déplacement.

Utilisation de techniques PSI

La technique PSI présentera un intérêt particulier (par rapport à l'interférométrie différentielle

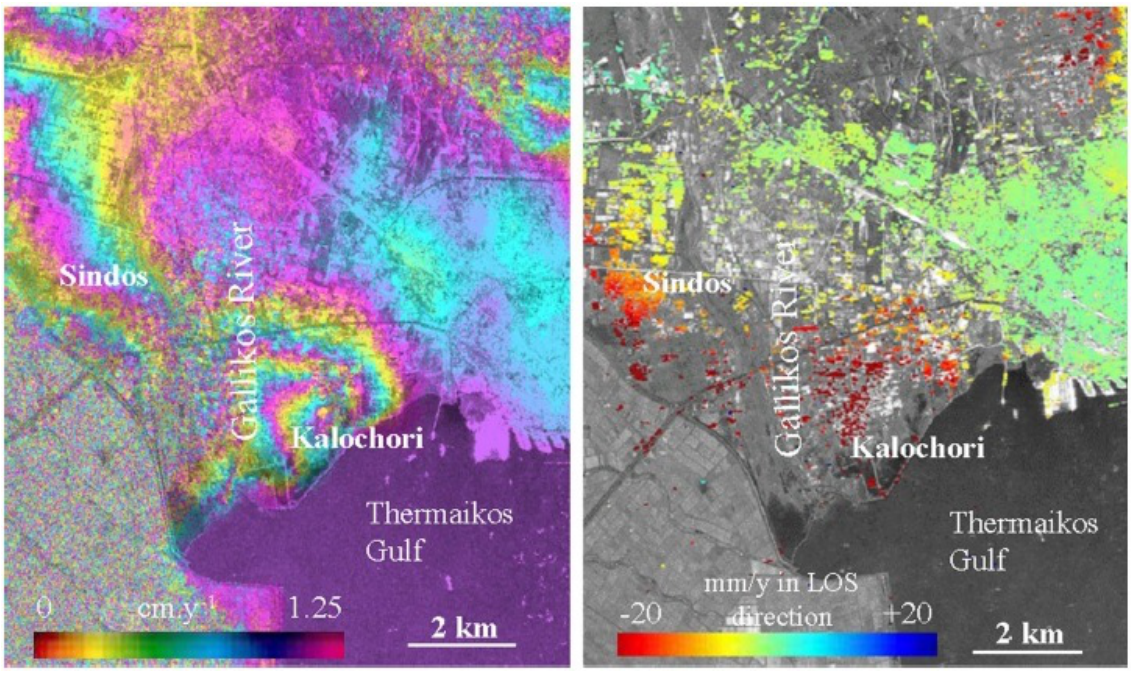

FIGURE 3 – Comparaison de résultats issus de l'empilement d'interférogrammes (a) et PSINSAR™ (b). Raucoules et al. 2009 - Résultats obtenus dans le cadre du projet Terrafirma

conventionelle ou des traitements multi-temporels plus basiques tels que décrits en 2.1.2) pour :

- les phénomènes très localisés
- les cas où il est nécessaire d'avoir une précision particulièrement fine (typiquement le mm/an). ce sera le cas pour les déformations faibles par rapport à la demi-longueur d'onde et donc difficilement discernables sur des interférogrammes individuels et pour lesquels la composante atmosphérique sera importante par rapport à la déformation à cartographier.
- les cas où des profils temporels pour des points localisés sont nécessaires à la compréhension du phénomène. Ceci peut être le cas lorsque le mouvement est non-linéaire (dans le cas contraire, il peut être entièrement décrit par la vitesse).

En ce qui concerne notre équipe, nous avons pu d'une part valoriser des résultats produits PSINSAR par TRE (Lorraine, Thessalonique, Athènes) dans le cadre de projets de recherches internationaux. La figure 3 donne un exemple sur le site de Théssalonique (Grêce - comparaison de stack d'interférogrammes et de PSInSAR). D'autre part, nous avons eu l'occasion de traiter dans un cadre plus opérationnel (études à la demande de partenaires dans le domaine de l'après-mine ou de la subsidence minière) des résultats PSI à partir de la chaîne IPTA. Un exemple (non publié) d'utilisation conjointe de traitement DInSAR conventionnel et IPTA est montré en figure 4. Dans ce cas, l'objectif était de fournir une délimitation de la subsidence à partir d'interférométrie en bande L (plus adaptée au couvert agricole de la zone) et une évolution de la déformation passée à partir de l'étude de quelques points PS sur les bâtiments en limite de la subsidence (donc subissant une déformation plus faible que la zone centrale de la subsidence).

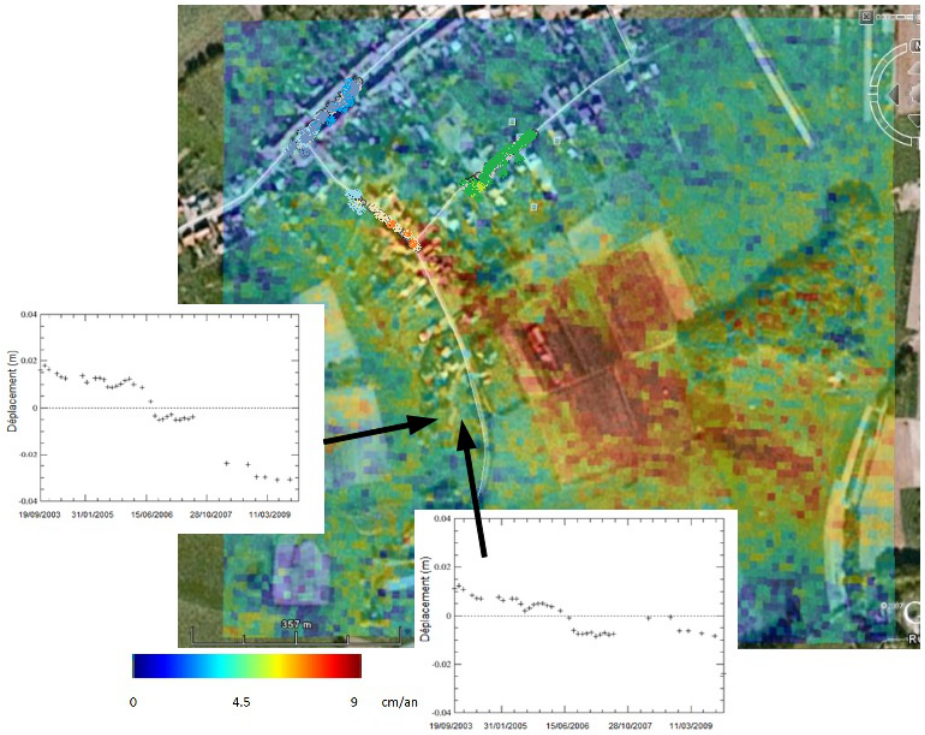

FIGURE 4 – Utilisation conjointe d'interférométrie conventionnelle en bande L (données ALOS/PALSAR) et de PSI en bande C (EnviSat/ASAR) sur un phénomène de subsidence (Raucoules 2010, non publié) sur un secteur à couvert agricole (le manque d'indication quant à la localisation du site est délibéré). Un empilement de 3 interférogrammes ALOS/PALSAR a permis de délimiter le phénomène (d'environ 1 km d'étendue) et d'estimer une vistesse de déformation moyenne sur la période 2008-2010. L'utilisation de PSI (Envisat/ASAR) sur des points PS sur le secteur urbanisé en limite de la "cuvette" a fourni une indication quant à l'évolution du mouvement sur la période 2003-2009 avec notamment une forte subsidence en juin 2006 à mettre en rapport avec des désordres observés en surface.

Contribution à la validation de la technique PSI (projet PSIC- 4)

Le projet PSIC-4 (Persistent Scatterer Interferometry Codes Cross Comparison and Certification for long term differential interferometry) a été l'occasion pour notre équipe d'apporter une contribution particulière au domaine de l'interférométrie PSI. En effet, à la demande de l'Agence Spatiale Européenne, notre rôle (en collaboration avec TNO, BGS et IG) était de proposer et d'appliquer un protocole de validation de différentes techniques PSI. Nous avons proposé comme site test, le site Minier de Gardanne (PACA) sur la période 1993-2004.

Ce site présentait des caractéristiques variées de couvert (à la fois urbain et végétalisé) et de déformation (allant du cm à environ 40 cm, mouvements pouvant être irréguliers ; les étendues des cuvettes d'affaissement étaient de l'ordre du km à quelques km) et de disposer d'un réseau de nivellement géré par Charbonnages de France (et actuellement par le département après-mine du BRGM). Huit équipes spécialisées dans le traitement PSI ont produit des résultats de déformation à partir d'un même jeu de données sans information *a priori* sur les caractéristiques de la déformation. L'objectif de notre travail de validation était à la fois de comparer les techniques entre elles afin d'avoir une estimation de la précision intrinsèque de la technique et par rapport aux mesures de nivellement afin de mettre en évidence de possibles biais pour estimer la justesse des résultats.

Une réflexion a du être menée sur les méthodes d'interpolation à utiliser de façon à associer des types de mesures différentes en ce qui concerne l'échantillonage spatial et temporel. Le choix qui a été retenu a consisté à effectuer une interpolation spatiale des mesures PSI situées dans un rayon de 50m autour d'un point de nivellement afin d'obtenir une série temporelle PSI en ce point. Les données de nivellement ont été à leur tour rééchantillonées afin d'obtenir des valeur de mesures de nivellement aux dates d'acquisitions radar. Les interpolations ont été effectuées par kriggeage afin de tenir compte de la variabilité spatiale et temporelle du phénomène estimée à partir des données de nivellement.

Les résultats d'intercomparaison ont mis en évidence des écart-types de différences entre mesures de vitesses obtenues par les différentes équipes allant de 0,6 à 1,9 mm/an. La comparaison avec le nivellement donne des écart-types de 5 à 7 mm/an, ce qui apparait comme important au vu des applications ciblées par la technique. Par ailleurs, il a été mis en évidence que l'erreur de mesure augmentait fortement avec l'amplitude de la déformation et devenait rédibhitoire dès que l'on a un déplacement supérieur à 2 cm entre deux acquisition SAR. Ceci met en évidence une utilisation incomplète des possibilités de déroulement spatial et temporel (pour certaines cuvettes, les déformations maximales pouvaient en effet être aisemment estimée visuellement sur des interférogrammes différentiel classiques). Il est toutefois vrai que nous avons à faire (sur certaines parties de la zone) à des déformations non-linéaires allant jusqu'à plusieurs cm/an et de ce fait compliquant le déroulement temporel. Dans le contexte du site test, il s'est avéré que les performances des techniques étaient moindres qu'attendues : ce projet a ainsi permis d'identifier des limitations et permis aux équipes d'améliorer les perfomances de leurs outils.

2.2 Corrélation d'images

Dans le but de produire une cartographie de déplacements à partir de techniques de corrélation, nous utilisons principalement deux outils, le corrélateur de GAMMA (qui est plus adapté au traitement d'images SAR) et CosiCORR (développé par le Caltech). L'outil de la chaîne Gamma se base principalement sur la corrélation d'images d'amplitude et est initialement conçu pour effectuer la co-registration des images, mais peut être adapté à la mesure de déplacements en jouant sur la taille de la grille de décalages à produire et la taille des fenêtres de FFT utilisées. Le but est d'estimer, par corrélation locale, des disparités que l'on pourra identifier à des mouvements (une fois éliminée la composante topographique) sur deux images acquises à des dates différentes ayant subi une première co-régistration globale grossière (translation et rotation). La mesure des disparités est basée sur des calculs de corrélation : à

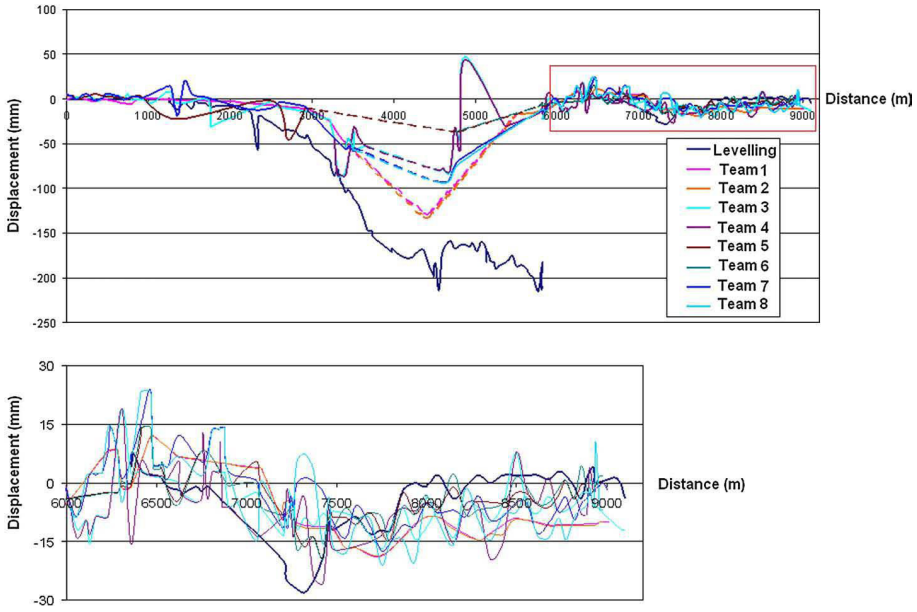

FIGURE 5 – Un résultat du projet PSIC-4 : nivellement et résultats PSI le long d'un profil de nivellement sur lequel a été identifié à la fois une déformation importante (20 cm sur 10 ans) et un secteur à faible déplacement (moins de 2 cm). Déformation cumulée 1995-2001. On notera l'écart entre équipes sur la zone plutôt stable et la sous-estimation sur le secteur à fort déplacement.

$$i_2(x,y) = i_1(x-\Delta_x, y-\Delta_y) \Rightarrow I_2(\omega_x,\omega_y) = I_1(\omega_x,\omega_y)e^{-j(\omega_x\Delta_x+\omega_y\Delta_y)}$$

$$\mathcal{F}^{-1}\left\{\frac{I_1(\omega_x,\omega_y)I_2^*(\omega_x,\omega_y)}{|I_1(\omega_x,\omega_y)I_2^*(\omega_x,\omega_y)|}\right\} = \mathcal{F}^{-1}\left\{e^{j(\omega_x\Delta_x+\omega_y\Delta_y)}\right\} = \delta(x+\Delta_x, y+\Delta_y)$$

FIGURE 6 – Estimation des disparités à partir de calcul de corrélation locale (d'après Leprince et al., 2009). i_1 et i_2 sont les contenus des 2 images dans les fenêtres (centrées sur le pixel de coordonnées x et y) à corréler que l'on suppose presque identiques mais localement décalées l'une par rapport à l'autre, I_1 et I_2 leurs TF, $\Delta_x$et Δ_y, les disparités à estimer.

l'intérieur de petites fenêtres se correspondant sur chacunes des images on estimera le décalage relatif des données contenues dans les fenêtres qui permet de maximiser la corrélation entre les informations contenues dans les 2 fenêtres (dont la taille est une puissance de 2). La corrélation est estimée par transformée de Fourier (TF) des contenus des 2 fenêtres. Le produit de l'un par le conjugué de l'autre donne directement la corrélation après TF inverse. La figure 6 résume comment on peut accéder aux disparités à partir des transformées de Fourier des images.

Cosicorr, partant de ce principe, se base sur la corrélation de phase. Une description détaillée de la méthode est donnée dans Leprince et al. 2007. La pente de la phase du produit d'une des deux TF par le conjugué de l'autre est directement liée au décalage (voir figure 6). L'ajustement de la phase de ce produit des TF par une fonction bilinéaire permet alors d'extraire la valeur de la pente et donc directement le décalage. Il faut noter qu'en procédant ainsi on n'accède qu'à des déplacements subpixelliques inférieurs au demi-pixel. Aussi, la technique utilisée doit être capable d'extraire également des décalages plus élevés afin de supprimer cette ambiguïté (voir Leprince et al., 2007 pour une analyse sur cette question). N'étant pas dépendant de l'amplitude des TF, cette méthode pourrait permettre

d'avoir un résultat moins sensible aux variations de radiométrie des images.

Avec ce type de méthode, la précision des mesures est typiquement du dixième au vingtième de pixel (dans des conditions favorables).

Si jusqu'à il y a peu de temps, le radar avait une résolution faible (environ 4 m en azimuth pour les capteurs généralement utilisés), l'intérêt du radar par rapport à l'optique pour ce type d'applications vient du fait que les capteurs radar permettent d'acquérir indépendamment des conditions météorologiques aussi bien en mode ascendant que descendant (fournissant donc 2 points de vues et 4 composantes du déplacement). Les capteurs de ce type (ERS, ASAR, PALSAR) sont donc utiles pour la cartographie de déplacements métriques (glissements de terrains, séismes importants). On notera que les écarts orbitaux faibles de séries d'acquisitions radar dans des conditions "interférométriques" permettent d'avoir généralement une faible contribution de la topographie aux mesures de décalages. De Michele et al., 2010a et 2010b donnent un exemple de restitution des déformations 3D à partir de données ASAR et PALSAR appliquée au séisme du Sichuan. L'obtention des 3 composantes du déplacement à partir des 4 mesures de décalages s'est faite en utilisant une formulation par moindres carrés.

Avec l'arrivée de capteur hautes résolution (COSMO-SKYMED, par exemple, atteint des résolutions de 30 cm en azimut), les techniques de corrélation d'images radar deviennent très performantes voire comparables (au niveau précision) à l'interférométrie différentielle conventionnelle. L'utilisation de jeux de données importants permettront par ailleurs d'envisager des traitements multi-temporels. Cet aspect est développé en section 3.2. On notera toutefois que les coûts actuels (en dehors d'applications de recherche pouvant faire l'objet de tarifs préférentiels) des données issues de ce type de capteurs sont actuellement une limitation (qui pourrait néanmoins évoluer) à l'utilisation de la technique. Par ailleurs, de même que pour l'interférométrie, l'absence de mode d'acquisition "par défaut" pour ces nouveaux capteurs qui permettrait de constituer une archive homogène, empêche l'utilisation de la méthode pour des rétro-analyses de phénomènes antérieurs à la mise en place de l'étude. Cette utilisation des données SAR haute résolution reste néanmoins très prometteuse en ce qui concerne la cartographie de la déformation de la surface du sol.

Une utilisation très spécifique des outils de corrélation appliquée aux données SAR est proposée dans Raucoules et al. 2010a et encore en développement. Elle utilise le lien entre les décalages en azimut mesurés sur un couple d'images SAR et la dérivée suivant l'azimut de la composante sur l'interférogramme produit à partir de ces images (déjà décrit dans Meyer et al., 2006). En effet l'image de décalage en azimut est affectée par un artefact sous forme de bandes plus ou moins complètes. Sur le cas test (Séisme du Sichuan) et données (PALSAR) étudiés, nous avons observé que ces artefacts-bandes (bien que d'amplitudes variables) avaient une orientation privilégiée qui était clairement identifiable (et probablement liée aux caractéristiques du champ géomagnétique sur la zone) sur l'ensemble des paires d'images SAR (y compris de tracks différentes). Cette caractéristique nous a permis de proposer une méthode simple pour estimer (pour le site test en question) cette composante ionosphérique sur les décalages et obtenir une approximation de la correction de la composante ionosphérique à appliquer à la phase interférométrique.

3 Applications

Dans la perspective de cartographie d'aléas, la cartographie de la déformation de surface va concerner les aspects suivants :

-l'identification et localisation de mouvements inconnus

-la délimitation plus précise de zones en mouvement éventuellement connues

-l'évolution de la déformation passée : ceci permet une meilleure compréhension du phénomène et dans certains cas une prédiction du mouvement (accélération ou ralentissement, extension de la zone, etc.).

-l'importance du mouvement

L'efficacité des techniques présentées pour ces objectifs dépendront du contexte d'acquisition (type de capteur, écart de dates d'acquisition, occupation du sol, etc.) des données et du type phénomène observé (ampleur et régularité du mouvement, étendue de la déformation).

Il faut considérer que dans la perspective de la compréhension des phénomènes et la cartographie de l'aléas, ces techniques fournissent une information utile et parfois inaccessible par d'autres moyens mais ne constituent pas la base unique d'une cartographie d'aléas. En effet, la mesure de la déformation passée seule ne suffit pas pour anticiper les phénomènes futurs et donc l'occurence d'événements ayant une incidence sur les éléments exposés. Une carte de déformation obtenue par des moyens de télédétection, n'est donc pas équivalente à une carte d'aléas.

Les sections suivantes présentent des exemples d'applications de la technique à différents types de phénonèmes (affaissements ; glissements de terrain ; déformations sismiques ; volcanisme). Nous insisterons sur les spécificités de chacun des types de mouvements par rapport aux techniques proposées.

3.1 Affaissements urbains et miniers.

Cette thématique a longtemps été la thématique principalement ciblée pour l'interférométrie radar au BRGM du fait qu'elle cadrait avec les priorités du BRGM dans le domaine des risques entre la fin des années 1990 et le début des années 2000. Ainsi, elle était notamment l'objet du réseau technologique RESUM (financement MRT) du projet TERRAFIRMA (financement ESA) et de collaborations avec Charbonnages de France.

Les déformations en zones urbaines concernent d'une part des zones à forts enjeux. Par ailleurs, du point de vue interférométrie radar, les zones urbaines présentent une cohérence interférométrique élevée (par rapport aux zones végétalisées). Il s'agit donc d'une application de l'interférométrie radar présentant un intérêt en termes de gestion de risques et des conditions favorables pour sa mise en oeuvre. Les causes des déformations peuvent être de différentes natures : pompages (par exemple sur la ville de Mexico [Carnec et al. 2000] ou de Prato [Raucoules et al., 2003]), des travaux souterrains (comme par exemple l'incidence de la construction de la ligne de métro Eole sur Paris [Le Mouelic et al., 2002 et 2005] ou la construction d'un tunnel autoroutier sur Lyon [Simonetto et al., 2005])

Les déformations d'origine minière font l'objet de surveillance parfois imposées par la règlementation. Dans ce cadre, l'interférométrie radar peut être un outil intéressant en complément des mesures au sol. Généralement, ce type de déformations ne se situent que partiellement en zones non urbaine. La végétation ou la présence de terrains agricoles sera donc une limitation pour l'utilisation des techniques d'interférométrie radar. Le suivi de la déformation peut concerner la période d'activité de la mine (sachant que sur le territoire métropolitain, la dernière mine de charbon a fermé en 2004) comme sur la Lorraine (Raucoules et al., 2006 ou Colesanti et al., 2005) mais également la surveillance Après-Mine qui demande un suivi plusieurs dizaines d'années après la fin de l'exploitation. Il peut s'agir de subsidence (basin minier du Nord Pas de Calais - Raucoules et al., 2008 ; Gueguen et al., 2009) ou de soulèvement

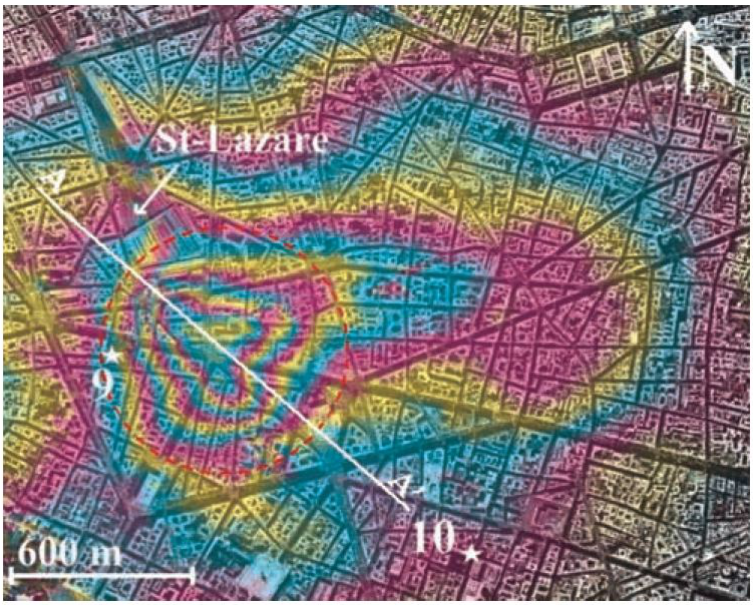

FIGURE 7 – Stack d'interférogrammes à partir de données provenant des satellites ERS 1 et 2 mettant en évidence un soulèvement de la surface du sol au cours de l'été 1998 au Sud de la gare Saint Lazare. 1 frange correspond à 3 mm de déplacement en ligne de visée. (Le Mouelic et al., 2002)

lié à la remontée du niveau piézométrique en raison de l'arrêt des pompages suite à l'arrêt de l'exploitation. Nous signalerons que les travaux sur le bassin minier du Nord Pas de Calais ont fait l'objet d'une thèse (soutenue en 2008) faisant l'objet d'une collaboration entre l'Université Marne-la-Vallée, Charbonnages de France, l'Inéris et le BRGM.

L'Interférométrie différentielle conventionnelle a par ailleurs permis de mettre en évidence dans plusieurs des cas étudiés (soulèvement sur le site minier de Montceau-les-Mines [Raucoules et al., 2007], mine de sel de Vauvert [Raucoules et al., 2003] et le bassin Houiller du Nord-Pas de Calais [Raucoules et al., 2009]) que les points de référence des réseaux de nivellement implantés pour la surveillance des sites étaient soumis à de la déformation. Les interférogrammes produits étant une information sur l'étendue et la géométrie de la cuvette, ils permettent d'identifier les zones stables et ainsi permettre une meilleure optimisation du réseau de surveillance au sol.

L'utilisation de techniques PSI peut s'avérer utile lorsqu'on s'interesse à des déformations d'étendues réduites ainsi que lorsqu'on cherche à mettre en évidence l'évolution temporelle du déplacement de points spécifiques. Dans Colesanti et al., 2008 nous nous sommes intéressés à l'affaissement de Roncourt. Le suivi de points en bordure de la cuvette d'affaissement a permis de comprendre l'évolution de la déformation sachant qu'à proximité du maximum de déformation, le déplacement était trop important pour être suivi par interférométrie. Il est important de noter que le système de surveillance au sol (nivellement) a été mis en place en février 1999 suite à la constatation de dommages sur les bâtiments alors qu'*a posteriori*, le PSI a mis en évidence le fait que la déformation avait débuté 10 mois auparavant.

3.2 Glissements de terrain

Les glissements de terrain sont un autre domaine pour lequel les mesures de déformations à partir de techniques satellitaires s'avèrent utiles. Deux cas de figure peuvent se présenter :

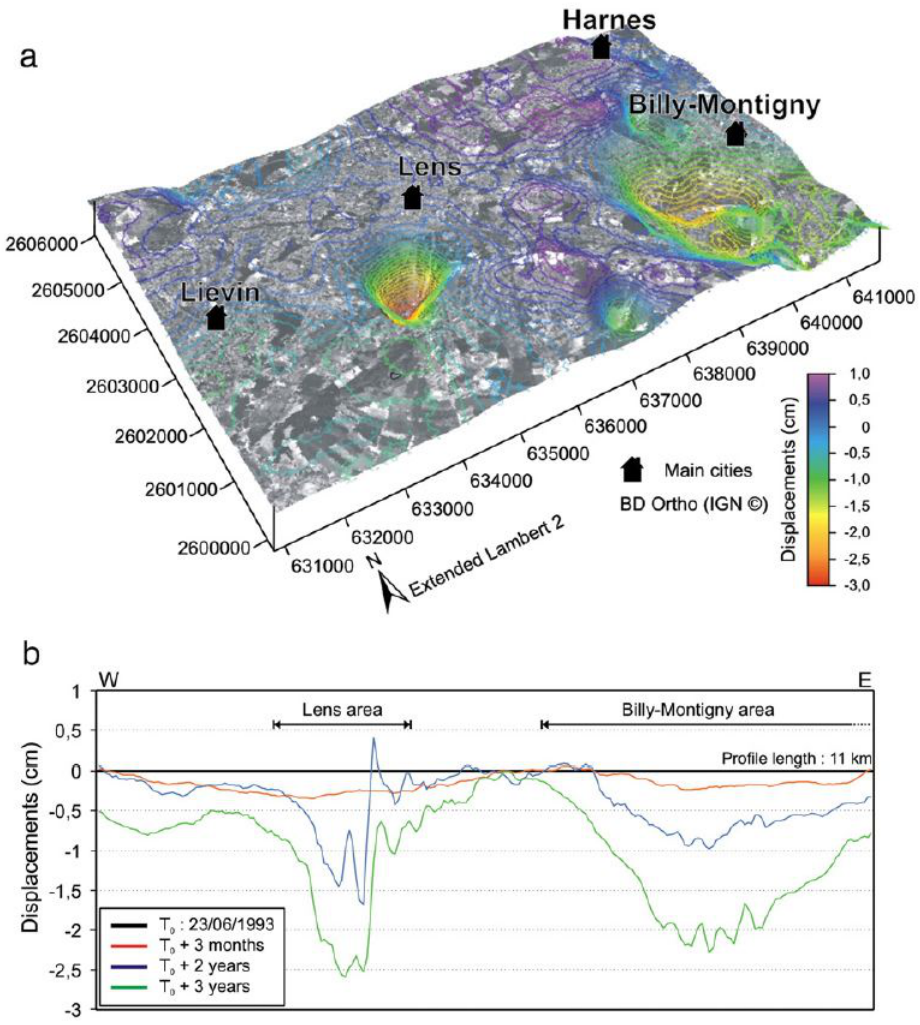

FIGURE 8 – Déformation par interférométrie radar (d'après de données des satellites ERS 1 et 2) sur le bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais a) : représentation de l'interférogramme 23/06/1993–31/05/1996. b) : profils Est-Ouest de déformation cumulée (Gueguen et al., 2009)

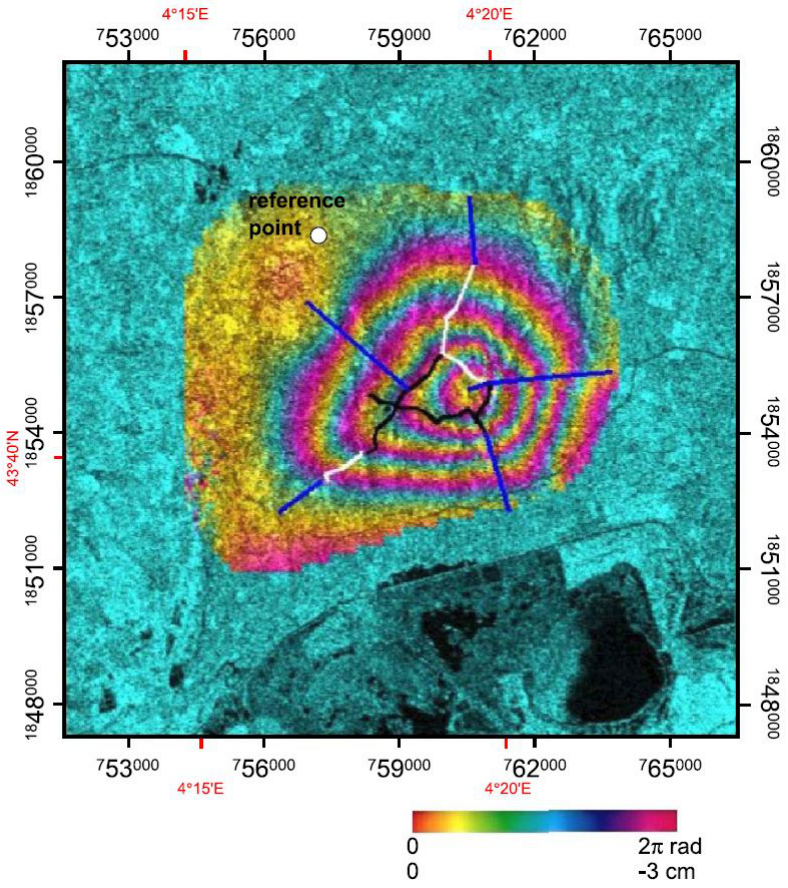

FIGURE 9 – Déformation sur la mine de sel (exploitée par dissolution) de Vauvert par interférométrie sur la période 1993-1999. En noir et blanc le réseau de nivellement. En bleu une proposition d'extension du réseau. (Raucoules et al., 2003)

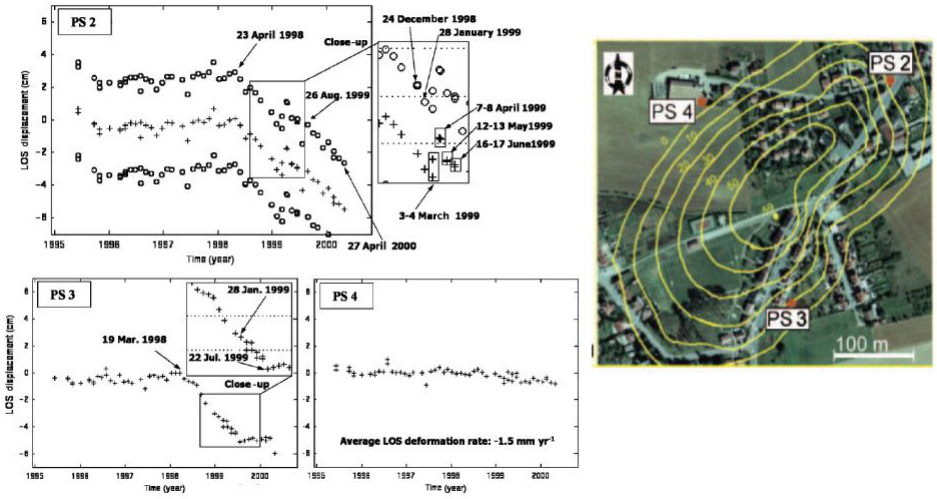

FIGURE 10 – Affaissement de Roncourt observé par PSINSAR. Séries temporelles pour 3 PS localisés sur la photo aérienne. Les courbes de niveaux sur la photo aérienne correspondent à l'interpolation de mesures de nivellement.

- en présence d'un ou plusieurs glissements préalablement identifiés on cherchera à préciser sa délimitation, sa vitesse et son évolution au cours du temps

- sur une zone donnée on cherchera à identifier des glissements inconnus à partir des deplacements de surface observés.

Les difficultés auxquelles on fait face sont les suivantes. Pour l'interférométrie, contrairement aux phenomènes de subsidence/soulèvement, nous avons à faire à un déplacement plus complexe qu'un simple mouvement vertical et qui nécessite donc la mesure des 3 composantes du déplacement. Si l'interférométrie qui ne mesure qu'une composante de la déformation (ligne de visée) permet de délimiter le phénomène, d'autres informations seront donc nécessaires pour totalement apréhender la déformation. Ce peut être des interférogrammes d'images acquises suivant des orbites descendantes puis suivant des orbites ascendantes afin d'avoir une deuxième composante du déplacement, des mesures au sol (GPS) ou des hypothèses sur la direction du mouvement basées sur l'analyse de la topographie. L'interférométrie est toutefois limitée par le fait que les glissements se situent souvent sur des zones à couvert végétal qui limite la cohérence et que les déplacements peuvent être trop rapides.

Dans le cadre du projet MvTERRE sur les mouvements de terrain de grande ampleur sur l'île de la Réunion (à financement Européen et régional - 2001), nous avons appliqué l'interférométrie (bande C et L) au glissement de Hellbourg (Delacourt et al. 2009) subissant un mouvement régulier d'environ 50 à 60 cm/an. Nous avons également utilisé de l'imagerie optique (SPOT 5 et aérienne) afin d'estimer les déplacements horizontaux par corrélation.

Suite à ces premiers résultats et dans le cadre de la suite au projet MvTERRE, un jeu de 40 images COSMO-SKYMED (environ 40 cm de résolution) et 25 TerraSAR X (environ 3 m de résolution) sont en cours d'acquisition sur les glissements de terrains de Hellbourg et Grand Ilet. Le but est de produire à la fois des résultats interférométriques (conventionnels et PSI) et de corrélation. Compte tenu des répétitivités des acquisitions (1 à 2 acquisitions par mois pour TerraSAR X, tous les 8 jours

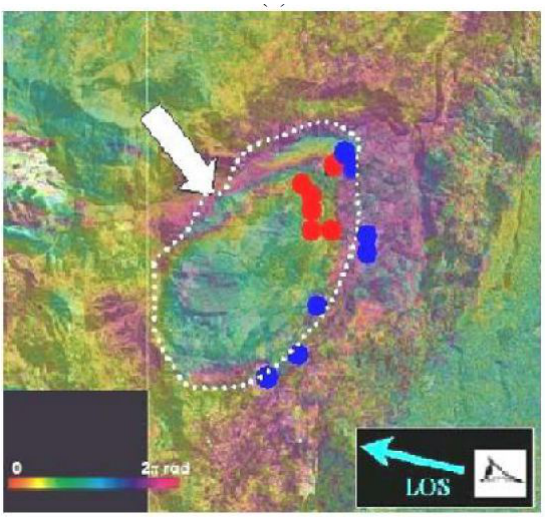

FIGURE 11 – Pseudo-interférogramme (somme de 3 interférogramme JERS-1) sur le site de Hellbourg couvrant la période janvier 1997-mai 1997. Les points en rouge représentent des mesures GPS aillant mis en évidence des mouvements significatifs. (Delacourt et l., 2009)

pour COSMO-SKYMED) et de la haute résolution des données on peut s'attendre à des mesures de déplacements suffisament précises pour décrire le mouvement au cours de l'année en cours et notamment identifier des changements de régimes en relation avec la saison des pluies.

3.3 Déformation sur les failles actives

L'utilisation de l'interférométrie pour la cartographie de déformations co-sismiques est une des applications les plus anciennes de l'INSAR pour la mesure de déplacement (Massonnet et al., 1993). Ceci est dû au fait que pour l'étendue de la déformation (dizaines à centaines de km) l'interferométrie permet une cartographie avec une résolution compatible avec l'étude du phénomène alors que les réseaux d'instruments au sol sont souvent inexistants ou fournissent une densité et distribution de points ne permettant pas une cartographie complète de la déformation. Néanmoins, on notera que les séismes de magnitude Mw < 5 induisent généralement des déplacements trop faibles pour être observés et que pour les séismes induisant de forts déplacements, le champ proche est souvent inaccessible (le gradient de déformation important se traduit par une perte de cohérence). Par ailleurs, l'inversion du glissement en profondeur à partir d'un interférogramme peut s'avérer complexe et non unique à partir d'une seule composante de la déformation (ligne de visée). Ainsi, en présence d'une géométrie complexe telle que le séisme du Sichuan (2009) plusieurs modèles de glissements de caractéristiques très différentes (p.e 1 ou 2 failles) ont été proposés fournissant des déformations compatibles avec la mesure obtenue. Pour le cas du Séisme du Sichuan, l'utilisation conjointe d'interférométrie et de corrélation d'images (radar) nous (de Michele et al., 2010 a et b) a permis dans un premier temps d'identifier les ruptures en surface (sur les failles de Beichuan et Guanxian) et la combinaison des différentes composantes mesurées par corrélation d'images de restituer une estimation du champ proche.

Une autre façon d'accéder au champ proche dans le cas du séisme de Machazé a consisté à fusionner l'interférogramme avec une simulation issue d'un modèle de déplacement. Le point important dans ce cas a été à nouveau l'identification de la rupture en surface qui a été effectuée à partir de la cartographie de la déformation post-sismique (et l'hypothèse que celle-ci était localisée de part et d'autre

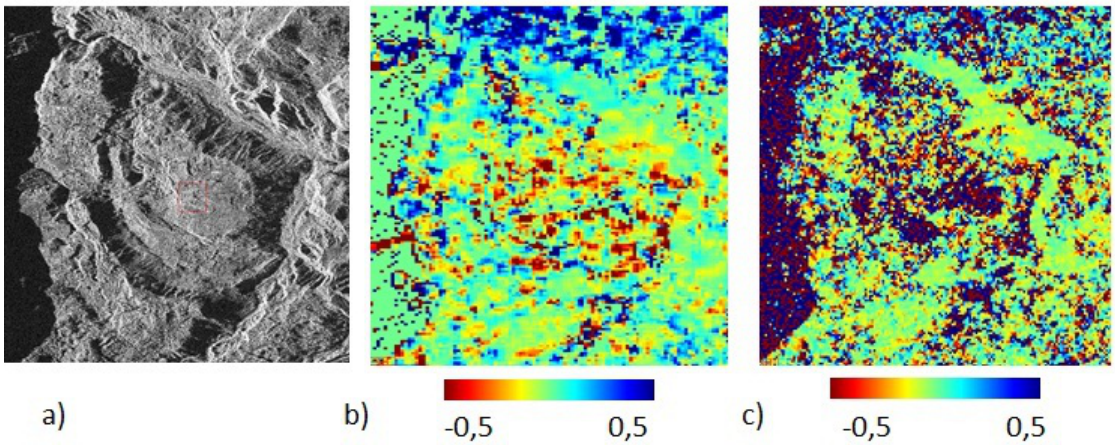

FIGURE 12 – Exemple de calcul de décalages en azimut sur le glissement de Hellbourg (Salazie, La Réunion) sur la période du 13 octobre 2010 au 1er janvier 2011 à partir de deux images radar Haute Résolution COSMO-SKYMED. a) moyenne des 2 images (géométrie radar) b) décalages en azimut (unité pixel ~ 30 cm) en utilisant Gamma (taille de la FFT=128 pixels) c) décalages en azimut en utilisant Cosicorr (taille de la FFT=128 pixels). Les résultats sont sensiblement équivalents même si cosicorr semble donner une résolution plus fine avec en contrepartie plus de pertes (ces différences peuvent probablement être réduites en ajustant les paramètres du traitement). Compte tenu de la durée encore faible entre acquisitions (moins de 4 mois) et de la possibilité de biais (notamment topographiques), ce résultat est difficilement interprétable. Suite à l'acquisition de l'ensemble de l'archive et un cumul de plusieurs résultats, une cartographie plus interprétable du mouvement pourra être proposée.

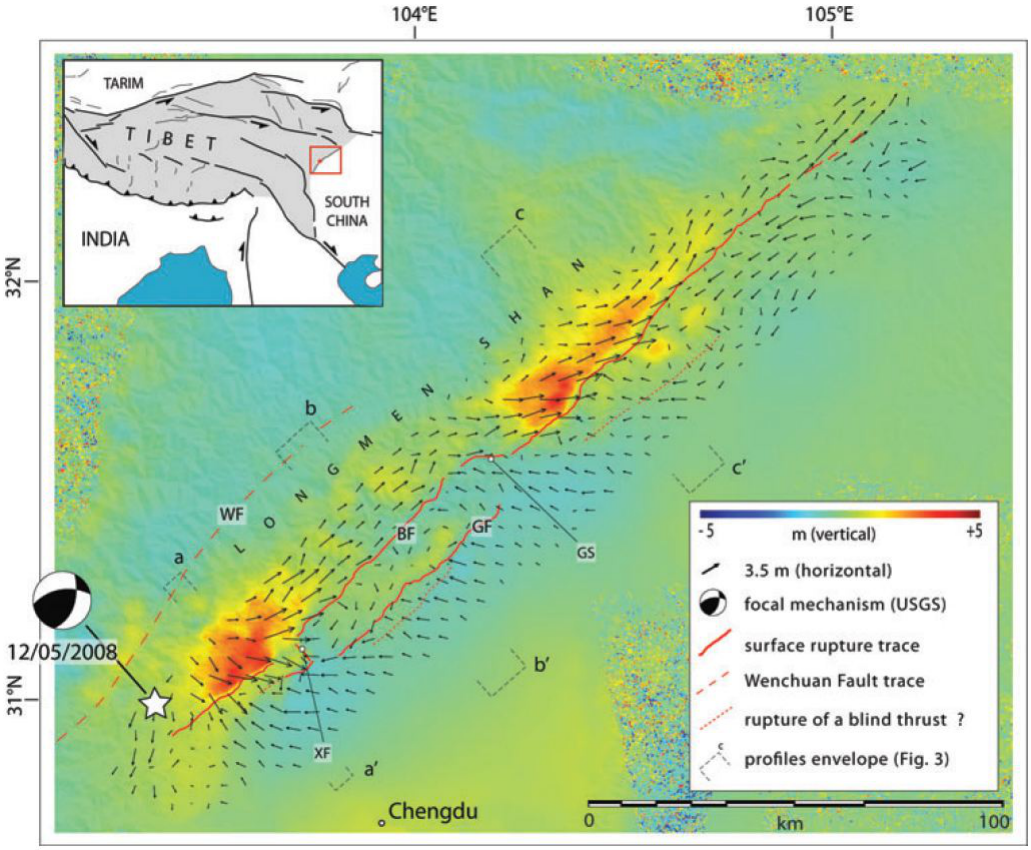

FIGURE 13 – Déplacement co-sismique en champ proche obtenu à partir de corrélation d'images PALSAR (ascendant) et ASAR (descendant). A partir de 4 composantes (2 mesures suivant les lignes de visée et 2 suivant les azimuts) les 3 composantes (Est-Ouest, Nord-Sud, verticale) ont été restituées par une procédure par moindres carrés.

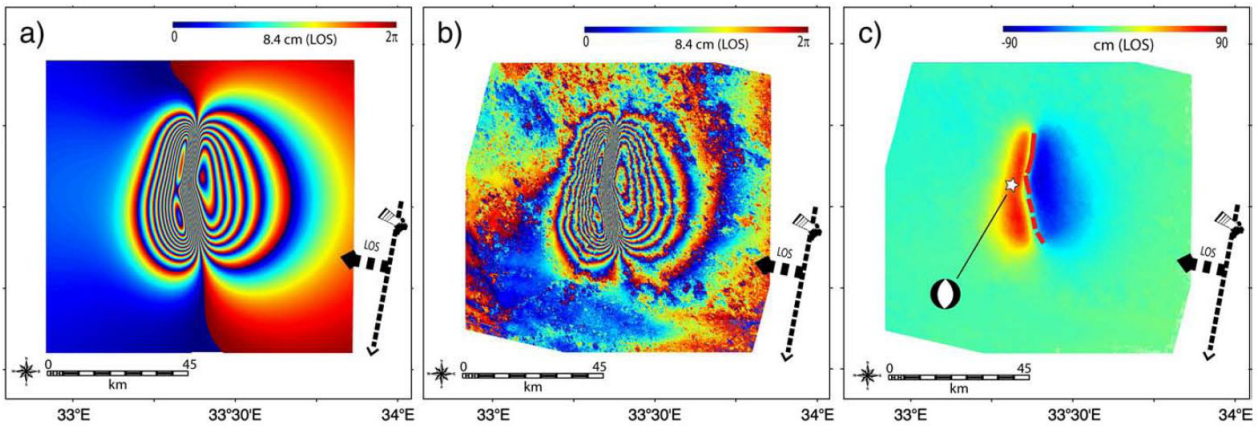

FIGURE 14 – Reconstitution de la déformation résultant du séisme de Machazé (22/02/2006) à partir de l'interférogramme correspondant aux acquisitions du 06/04/2004 et du 07/05/2006 et d'un modèle de déformation basé sur l'inversion de l'interférogramme tenant compte des caractéristiques du séisme et de la géométrie en partie déduite de l'observation de la position de la rupture sur la déformation post-sismique

de la rupture) qui a ainsi permis d'avoir une géométrie réaliste pour notre modèle. Cette estimation est certes peu précise mais présente un intérêt du fait de l'absence de toute mesure au sol (exceptées quelques mesures très localisées de la rupture).

La figure 15 montre un résultat obtenu par corrélation d'image d'amplitude de Haute Résolution (TerraSAR X) sur le séisme de Haiti (12/01/2010) produite par le BRGM dans le cadre de la "Cellule d'Intervention d'Expertise Scientifique et Technique".

Un autre domaine d'étude concerne les mouvements asismiques. Au cours des 5 dernières années, nous nous sommes intéressés (dans cette perspective) principalement à deux sites d'études. Nous avons ainsi étudié les mouvement antérieurs en postérieurs aux séismes de Machazé (Mosambique) et de Parkfield (Californie).

Les objectifs étaient de deux natures. Pour les déformations antérieures au séisme (Parkfield, de Michele et al., 2010b), il s'agissait d'identifier la variation spatiale du creep en surface, le long de la faille. Ceci, afin de mettre en évidence des zones de ralentissements et bloquages pouvant être associés à des accumulations de contraintes dont la connaissance pourraient permettre de mieux localiser les zones succeptibles de se déplacer lors d'un séisme. On peut ainsi par exemple constater que la localisation du séisme de 2004 est proche de la portion (section de Cholame) apparaissant bloquée sur les résultats interférométriques issus de l'archive ERS antérieure à la date du séisme. Par ailleurs, de Michele et al. (2010b) a mis en évidence un lien entre la sismicité au cours de cette période et l'ampleur du mouvement observé (les zones bloquées n'ont pas subi de séisme au cours de la période correspondant à l'archive radar). Une tentative de mettre en évidence un lien entre les variations dans les mouvements et les dates d'événements sismiques a été faite mais n'a pas permis de conclure, probalement parce que les variations de vitesses attendues sont dans la limite de sensibilité de la méthode et donc difficilement interprétables.

En ce qui concerne les déformations post-sismiques (figure 17 ; du moins le phénomène post-sismique suivant les premiers mois postérieurs au séisme, le début du mouvement post-sismique n'ayant

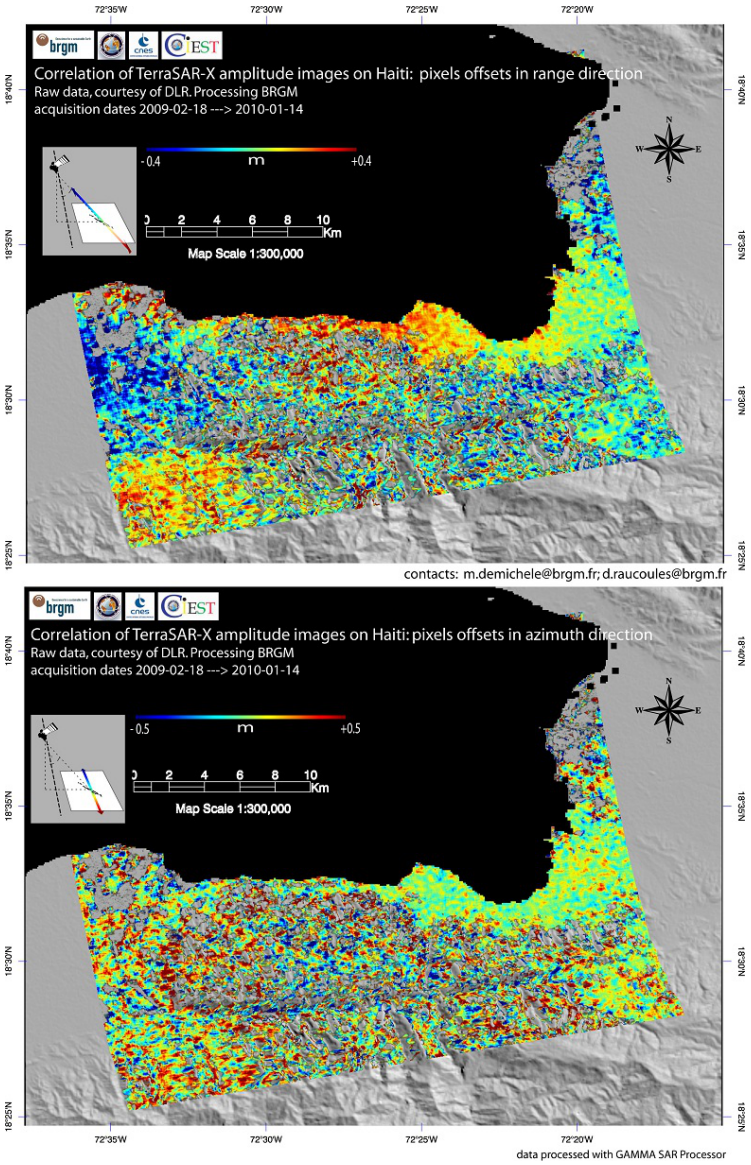

FIGURE 15 – Déformation sur le séisme de Haiti (12/01/2010) obtenue par corrélation à partir d'images radar du capteur TerraSAR-X. Contribution du BRGM dans le cadre de la "Cellule d'Intervention d'Expertise Scientifique et Technique".

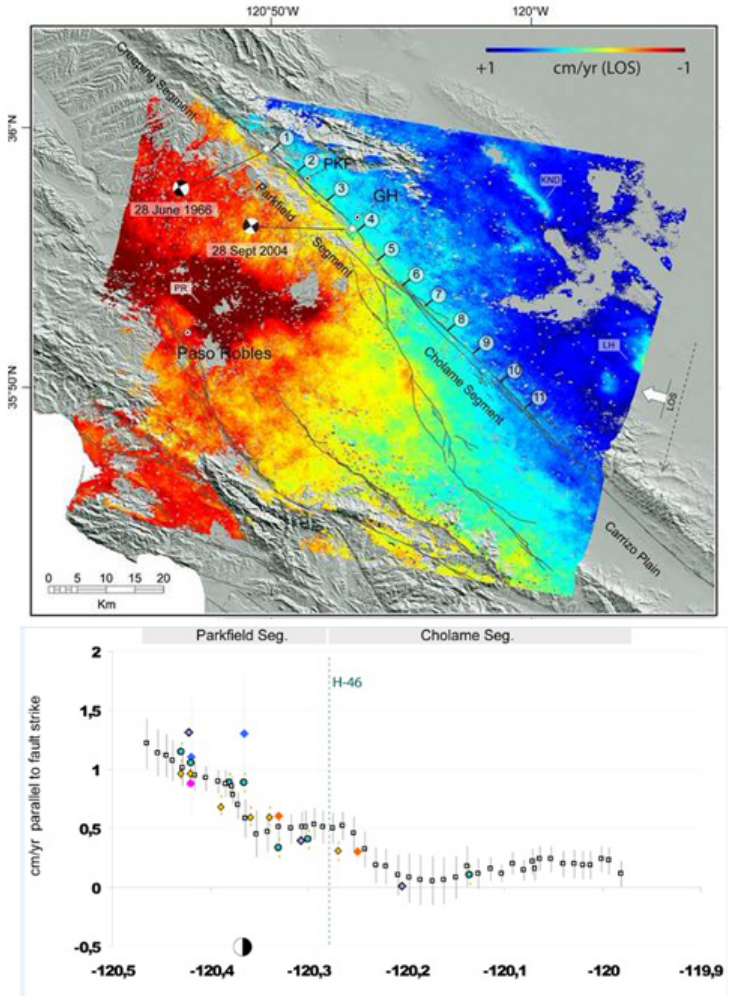

FIGURE 16 – Déformation sur le secteur de Parkfield vu par interférométrie radar sur la période 1993-2004 (d'après de Michele et al., 2010b). Vitesse de déformation a) à l'échelle de l'image, b) le long de la faille et comparaison à des mesures au sol.

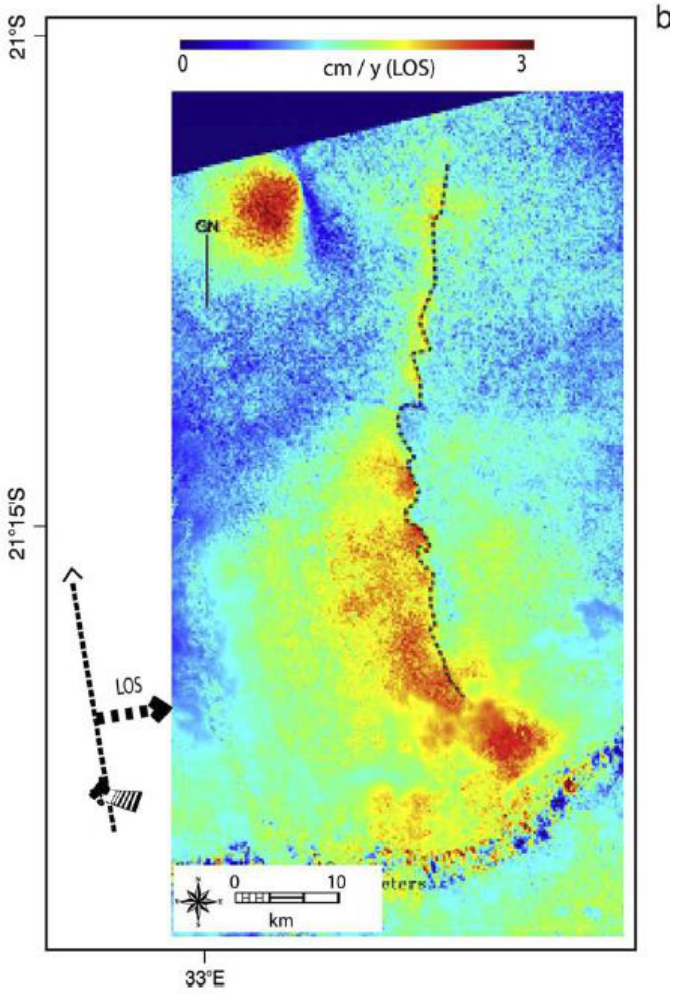

FIGURE 17 – Mouvement post-sismique sur le secteur de Machazé (Mosambique) à partir de données ALOS/PALSAR (décembre 2006-mars 2008). (Raucoules et al., 2010b)

pu être cartographié à partir de données ALOS), l'étude sur le séisme de Machazé (février 2006) a mis en évidence un mouvement post-sismique persistant de façon quasi régulière au moins 2 ans après le séisme. Par ailleurs, un phénomène de subsidence dont le déclenchement semble avoir eu un lien avec le séisme a été mis en évidence et devra faire l'objet d'une étude approfondie.

3.4 Volcanisme

Le suivi des déformations de la surface du volcan permet de mieux comprendre les éruptions en cours et une modélisation plus complète de la chambre magmatique et de la déformation de l'édifice volcanique. Par conséquent, ce type de mesures peut apporter une information utile pour la prévention du risque volcanique. Dans ce cadre, l'interférométrie radar est un outil qui est actuellement fréquemment utilisé (p.e. Massonnet et al., 1995) pour cartographier ce type de déformations dans la mesure où le couvert végétal couvrant les volcans est souvent favorable à l'utilisation de l'interférométrie ainsi que les caractéristiques des déformations elles-mêmes (gradients de déformation souvent en dessous de

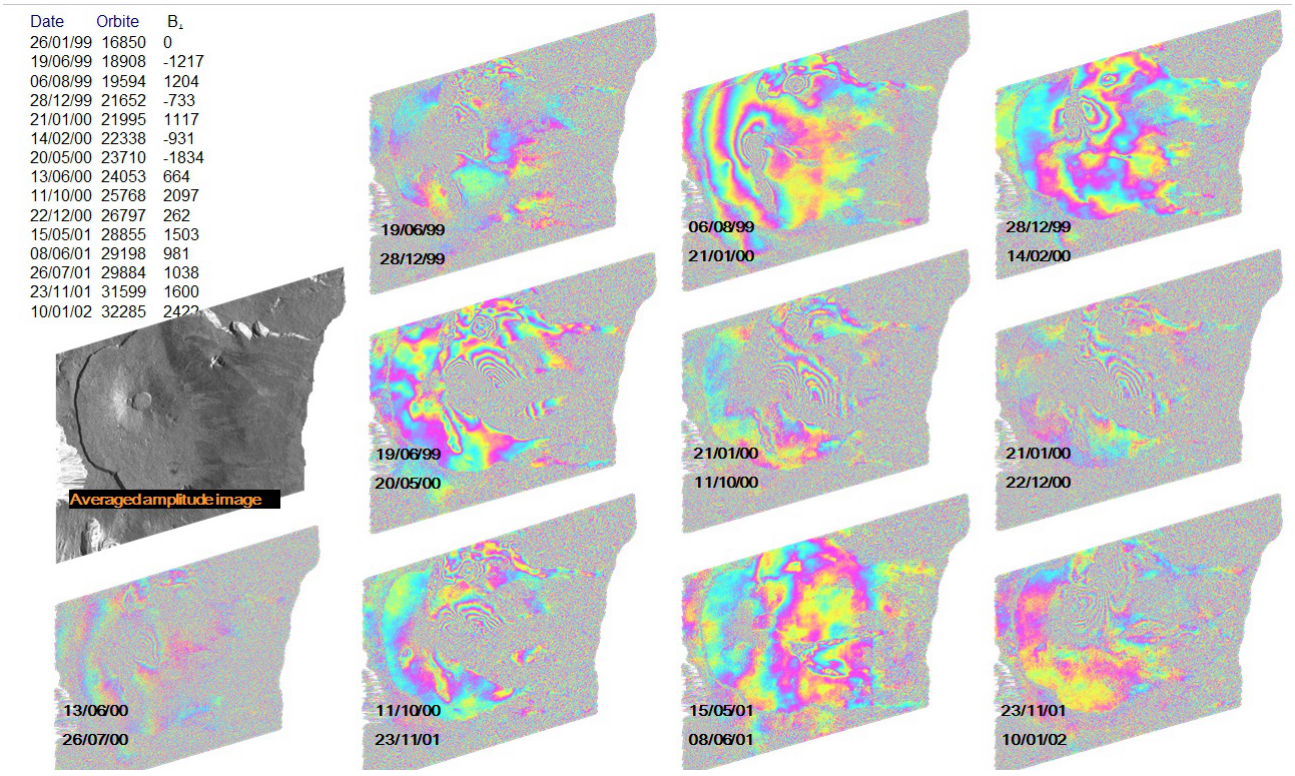

FIGURE 18 – Déformations du Piton de la Fournaise à partir de données Radarsat-1 sur la période 1999-2002 (d'après Carnec et al., 2003). 1 frange correspond à 2.8 cm en ligne de visée. Le tableau joint indique les dates et écarts orbitaux (par rapport à la première image) de chaque acquisition.

valeurs excessives pour la technique).

Bien que l'étude de ce type de phénomènes n'est pas prioritaire pour notre équipe, nous avons eu l'ocassion de traiter une série de données RadarSAT sur l'Île de la Réunion sur la période janvier 1999 à janvier 2002 mettant en évidence les déformations en lien avec une série d'éruptions sur cette période (8 éruptions ont eu lieu au cours de cette période).

3.5 Retrait Gonflement - Evaluation du potentiel des techniques PSI

Les mouvements différentiels du sol liés au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux ont engendré au cours de ces vingt dernières années de très nombreux sinistres sur le territoire national jusqu'à devenir désormais le deuxième poste d'indemnisation au titre des catastrophes naturelles en France, derrière les inondations (4,5 milliards d'euros, estimation CCR de juin 2010).

En période de sécheresse notamment, la dessiccation des sols argileux se traduit parfois par l'apparition de fissures de retrait en surface du sol, mais surtout par des tassements verticaux, en général peu visibles. Ce retrait du sol induit des mouvements différentiels au niveau du sol d'assise des fondations des bâtiments, et provoque des désordres sur les constructions.

En effet, ces mouvements verticaux du sol sont rarement uniformes, en relation avec les hétérogénéités locales concernant tant la nature du sol que son degré de dessiccation.

Dans ce cadre d'une collaboration avec TRE, nous proposons une évaluation de techniques PSI

utilisée dans ce but. Le test a été effectué principalement sur le site de Nogent sur Marne pour lequel un réseau de nivellement a été mis en place pour cette étape de validation. Les résultats sont décrits dans Carnec et al., 2009 et 2010 (rapports BRGM). La compléxité et la forte variabilité spatiale du déplacement (deux points séparés de quelques mètres peuvent avoir des comportements différents) est une limitation à l'utilisation de mesures de déplacement du sol pour évaluer l'aléa.
L'utilisation de ce type d'outils reste donc encore à explorer pour cette thématique et nécessite des études complémentaires. Néanmoins, dans la mesure où l'on cherche à cartographier des mouvements cycliques liés à la succession de périodes de sécheresse et à pluviométrie importante, il est apparu que l'information utile à extraire des séries temporelles était la semi-amplitude saisonière du déplacement et de son déphasage. Ces 2 valeurs sont obtenues en ajustant les séries temporelles à un modèle du type $A\,cos(\frac{2\pi}{365}t+\varphi)$ ou t est le temps en jours A la semi-amplitude φ le déphasage. En effet, on s'attend à ce que les déplacements sur les argiles gonflantes aient une composante cyclique (dont l'importance pourra être décrite par la semi-amplitude) annuelle et soient globalement en phase avec l'évolution de la pluviométrie (et donc plutôt subsidence en été et gonflement en hiver, mais bien sûr pouvant fluctuer d'une année sur l'autre).

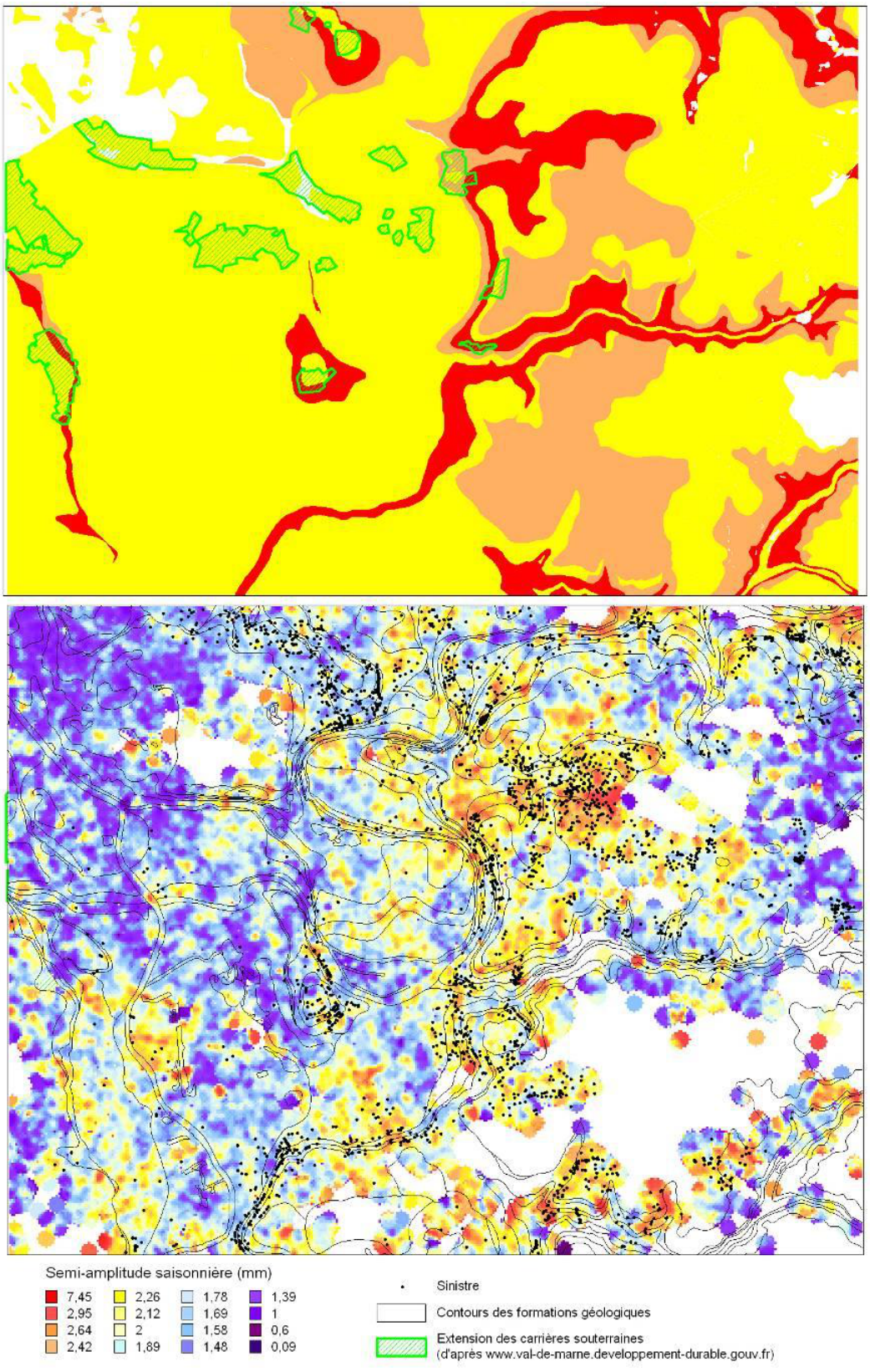

FIGURE 19 – Semi-amplitude saisonière PSINSAR à partir de données Envisat ASAR et carte d'aléa (en haut) sur le site de Nogent-sur-Marne. Résultats obtenus dans le cadre d'une étude sur la cartographie de l'aléa Retrait-Gonflement.

4 Perspectives

Cette section propose une liste des thèmes de recherche dans le domaine des mesures de déplacement de surface à partir de techniques de télédétection sur lesquels notre équipe souhaite s'impliquer à court et moyen terme.

4.1 Imagerie radar Haute Résolution et répétitivité

Le potentiel des outils Cosmo-Skymed et TerraSAR X pour la mesure de déformations est en cours d'évaluation par différentes équipes. Ces aspects ont été abordés à la section 2.2. Nous menons des études en cours dans le cadre de projets sur les glissements de terrains. Seront évalués à la fois le potentiel des techniques de corrélation d'images d'amplitude et d'interférométrie. Un effort sera mené sur l'adaptation des outils permettant l'extraction des images de phases aux dates d'acquisitions à partir d'interférogrammes déroulés (section 2.1.2) aux mesures de décalages par corrélation. En effet, le problème consistant à reconstituer les déplacements aux dates d'acquisitions, à partir de séries de mesures de décalages (obtenues par corrélation) entre paires d'acquisitions se formule de façon similaire et pourra être traité avec les mêmes outlis. L'objectif sera de produire des séries temporelles de déplacements suivant les 2 directions mesurées (ligne de visée et azimut).

4.2 Densification du réseau de point PS

En 2009, TRE(TeleRilevamento Europa) a developpé la notion de reflecteur diffus (DS) complémentaire des techniques PSI dans le cadre d'un produit nommé SqueeSAR^{TM}(figure 20). Bien que TRE ne communique que très peu sur la méthodologie utilisée pour les extraire, cette technique semble très prometteuse dans la mesure où elle comble une limite des techniques PSI liée à la faible densité de points PS en dehors de zones urbaines ou arides. Un réflecteur diffus correspondra à un petit ensemble de pixels (typiquement de quelques pixels à quelques centaines - sur le site test de Nogent/Marne il n'excédaient que rarement une aire de 15000 m²) pouvant avoir individuellement une faible rétrodiffusion mais dont les caractéristiques de rétrodiffusion (et leur évolution temporelle) ont un comportement semblable. Le réseau de PS/DS ainsi reconstruit peut s'avérer très dense voire recouvrir entièrement des zones où la cohérence était faible. La possibilité de "recontruire" les images SLC sur les zones qui auraient potentiellement une faible cohérence interférométrique que celà implique, pourrait avoir un intérêt pour l'ensemble des techniques intérférométriques radar et donc intéresser à ce titre la recherche académique.

4.3 Possibilité d'extraire une information atmosphérique sur la phase interférométrique à partir d'informations issues de la focalisation

Les artefacts atmosphériques (troposphériques et ionosphériques) restent une limitation importante de l'interférométrie. Suite aux premiers résultats que nous avons obtenus sur l'extraction d'une composante ionosphérique à partir de mesures de décalages en azimut par corrélation, il nous a semblé utile de continuer à explorer cette piste. On veillera également à évaluer dans quelle mesure une information sur l'état de la troposhère ne pourrait pas être obtenue. Par ailleurs, le lien entre ces décalages en azimut et les estimations des mesures de Doppler calculés lors de la focalisation seront également étudiés. En effet, les effets de l'ionosphère sur la focalisation (qui se traduisent par les décalage en azimut lors de la corrélation des deux images de la paire interférométrique) de l'image pourraient être identifiés au cours du processus de génération de l'image plutôt que suite à la comparaison avec une autre image.

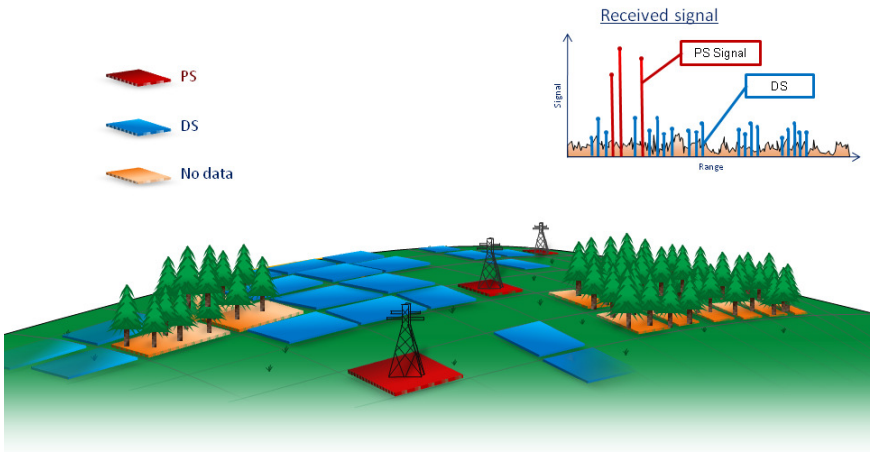

FIGURE 20 – Réflecteurs persistants et réflecteurs diffus - d'après TRE, 2009

4.4 Application aux mesures de vitesse des vagues

Dans le cadre d'études du BRGM sur le risque côtier (dans lesquelles nous souhaitons pouvoir valoriser des techniques de télédétection) et d'une collaboration informelle avec Caltech (S. Leprince) et le CEA (R. Binet), de premiers résultats ont été obtenus par M. de Michele et J. Thiébot (figure 21). Dans le but de mettre en évidence le déplacement des vagues, il a été éffectué un calcul par corrélation (CosiCorr) entre les bandes Panchromatique et XS1 du capteur : en raison de la conception du capteur, les acquisitions des deux bandes sont en effet séparées d'environ 2,5 s. Cet intervalle court entre les 2 acquisitions permet de mesurer des déplacements rapides tels que les vagues mais pourrait être utilisé pour d'autres applications implicant des déplacements de l'ordre du m/s. Dans l'application présentée figure 21, le but était de comparer les résultats avec le modèle SWAN ("Simulating WAves Nearshore" développé par l'Université de Delft) afin de d'évaluer la pertinence de ce type de mesures quant aux modules et directions des déplacements. Une fois la validité mise en évidence, ce type de mesure pourrait permettre de calibrer les modèles de vagues (particulièrement sur les zones où ils sont moins fiables, p.e. près de côtes ou la bathymétrie est mal connue).

4.5 Autres applications opérationelles des techniques

Un champ d'application de techniques PSI que nous souhaitons développer en raison de l'intérêt particulier de notre service pour la thématique stockage de CO2, concerne le suivi de la déformation en surface suite à l'injection de gaz. Des résultats très prometteurs on recemment été obtenus sur un site d'injection important (In Sallah, Algérie) par Vasco et al. (2010). Toutefois ce site expérimental était très spécifique en terme quantité de gaz injecté (1 million de tonnes par an depuis 2004) que du point de vue des caractéristiques de la surface du sol (zone désertique). Auss, dans le cas d'un site (expérimental ou opérationnel) que l'on aurait à surveiller en Europe, on peut s'interroger sur les possibilités de la technique du fait que les terrains présenteront des couvertures végétales ou agricoles importantes (les sites d'injections n'étant pas envisagés sur des sites densemment urbains).

Suite à un test d'interférométrie PSI sur le site expérimental Ketzin (Allemagne) (Raucoules et al. 2010 - rapport BRGM RP58003-FR), qui s'est avéré peu concluant du fait de la faible quantité de gaz injectée (60000 t) et d'un nombre de points PS relativement faible (le site d'injection étant en zone

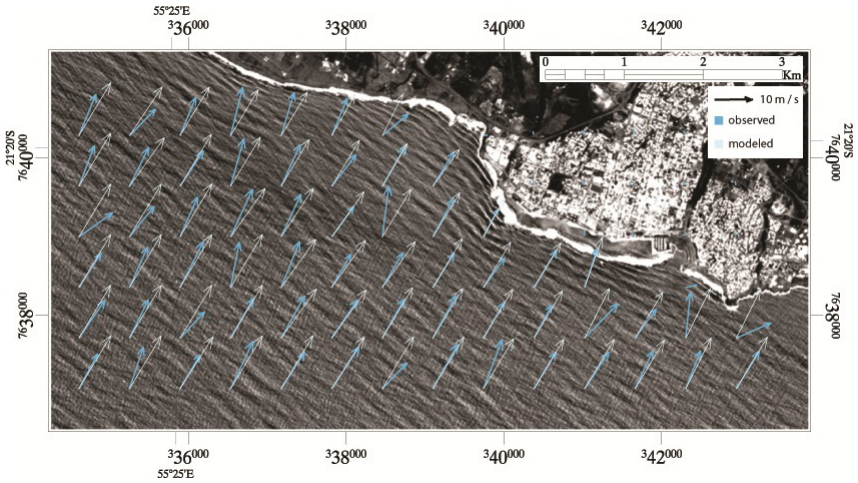

FIGURE 21 – Comparaison de vitesses de déplacement de vagues obtenues à partir de corrélation des bandes panchro et XS1 d'images SPOT 5 (d'après M. de Michele et al., 2010 - non publié) et de vitesses de déplacements issues du modèle SWAN sur un secteur de l'Île de la Réunion. (utilisation de données issues de la base de donnée Kalideos)

agricole et les installations ayant subi des modifications au cours du temps), une réflexion est actuellement en cours sur la démarche à mettre en place et les caractéristiques des sites à surveiller permettant l'utilisation d'une telle méthode. Une modélisation effectuée par J. Rohmer (2010, non publié) suggère que pour un site européen dont les caractéristiques du sous-sol seraient semblables au bassin parisien une injection induisant une surpression supérieure à 25% voire plus serait necessaire pour obtenir en surface une déformation suffisante (plus de 5 mm à 1cm) pour être mesurée par les techniques actuelles. La figure 22 nous montre un résultat de modélisation. De plus, afin de s'adapter au contexte européen nous envisageons de densifier le reseau de PS par l'implantation de cornets réflecteurs sur un site test. Une expérience sera mise en place prochainement dans le cadre d'une collaboration avec la société Arcelor.

4.6 radar au sol

Dans le cadre d'une collaboration avec l'IG (étude proposée conjointement avec M. Crosetto de l'IG[Barcelone] et C. Negulescu) nous évaluons le potentiel du radar pour estimer les modes de vibrations des bâtiments. Des mesures simultannées utilisant cet outil et de bruit de fond sismique ont été recemment effectuées sur un bâtiment spécifique et montrent déjà que la technique présente un intérêt. Cette technique aurait un fort potentiel compte tenu des amplitudes et fréquences (quelques microns et 100 Hz) mesurables et du besoin réel de ce type de mesure pour l'évaluation de la vulnérabilité de bâtiments en présence de séisme. L'utilité de ce type de mesures concernera aussi bien l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments(ces informations donnent une indication de la réponse du bâtiment lors du séisme) que d'éventuels dommages (sachant qu'un changement de fréquences propres suite à un événement peut être un indicateur de dommages structuraux).

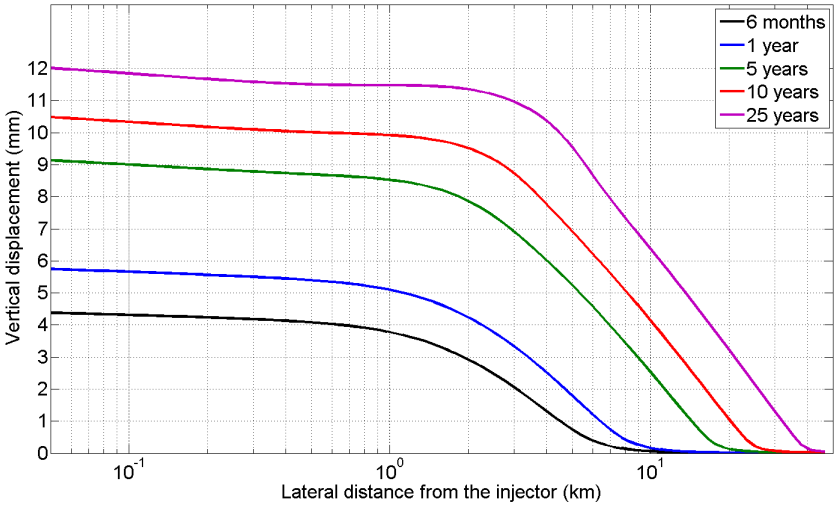

FIGURE 22 – Déplacement vertical pour une injection de 1Mt/an à 1500m de profondeur en fonction de la distance au puits pour différentes durées après le début de l'injection pour un site ayant des caractéristiques du sous-sol comparables au Bassin Parisien (d'après J. Rohmer, 2011 - non publié). Nous voyons que malgré la quantité importante de gaz injecté, la déformation reste faible (il faut en effet ente 5 et 10 ans d'injection pour avoir des déplacements de l'ordre du cm). La technique utilisée (ainsi que la durée pendant laquelle la technique va être utilisée) et le site à surveiller devront faire l'objet d'un choix tenant compte de ces observations.

FIGURE 23 – Mesure vibrométrique à partir de radar (bande Ka, échantillonage 100Hz) sur un bâtiment sur la commune de Font Romeu. Collaboration IG/BRGM)

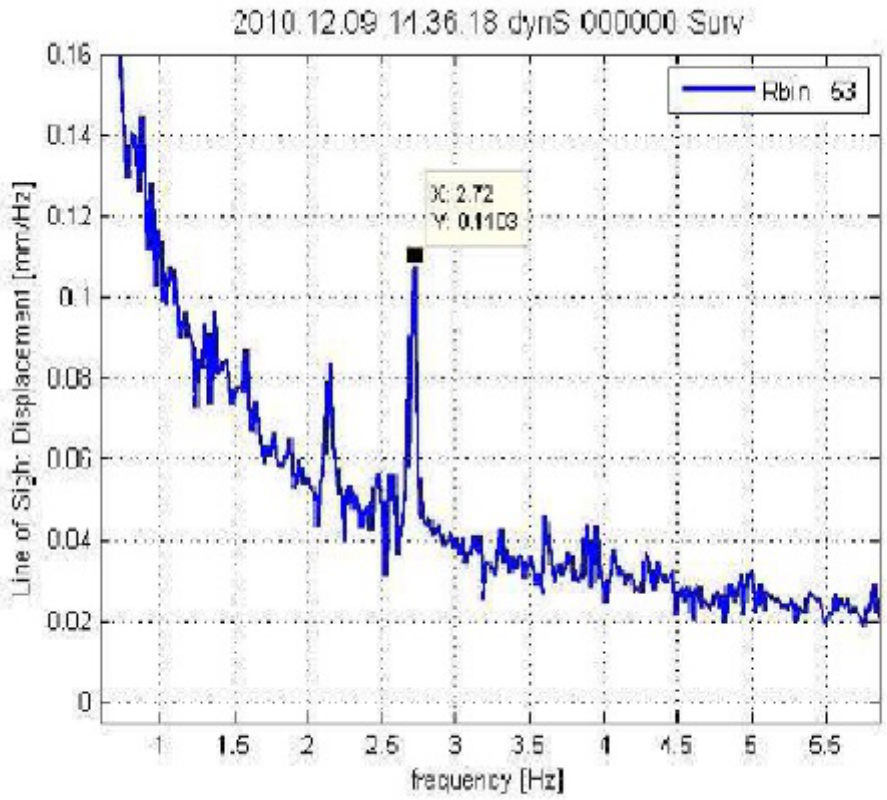

FIGURE 24 – Série temporelle obtenue à patir des mesures vibrométrique radar (mesures et traitement G. Luzi et M. Crosetto). La fréquence correspondant au pic (2.72 Hz) est proche (écart inférieur à 1%) du résultat issu de la modélisation du bâtiment.

Si cette application du radar au sol nous semble novatrice, nous envisageons également l'utilisation du radar sol en tant qu'imageur afin d'utiliser des techniques interférométriques (GB-InSAR). Cette technique déjà utilisée (p.e. Pipia et al., 2005), a fait ses preuves pour le suivi de glissements de terrain et viendrait en complément des études en cours par télédétection spatiale sur ce type de phénomènes. La production d'interférogrammes quotidiens (ou avec une fréquence d'échantillonage plus élevée) pourrait s'avérer un outil qui au-délà d'un simple suivi de la déformation pourrait entrer dans le cadre de systèmes d'alerte.

5 Réferences de la synthèse (hors publications de l'auteur)

Agram P.S., Estimating Ground Deformation Time-Series Using Persistent Scatterer Radar Interferometry., Stanford PhD, 2010

Beauducel, F ; Briole, P ; Froger, JL Volcano-wide fringes in ERS synthetic aperture radar interferograms of Etna (1992-1998) : Deformation or tropospheric effect ?, Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 105 (B7) : 16391-16402, 2000

Chastenet, P, Optimisation de la sélection des couples interférométriques et valorisation des produits interférométriques, 2001, rapport de DESS - Université Louis Pasteur Strasbourg

Ferretti, A ; Prati, C ; Rocca, F, Permanent scatterers in SAR interferometry IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39 (1) : 8-20, 2001

Ferretti, A ; Prati, C ; Rocca, F, Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38 (5) : 2202-2212, 2000

Gabriel, AK ; Goldstein, RM ; Zebker, HA, Mapping small elevation changes over large ares - Differential radar interferometry, Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 94 (B7) : 9183-9191, 1989

Ghiglia, DC ; Romero, LA, Robust 2-D weighted and unweighted phase unwrapping that uses Fast Transforms and iterative methods, Journal of the optical soc. of America A, 11 (1) : 107-117, 1994

Goldstein, RM ; Zebker, HA ; Werner, CL, Satellite radar interferometry 2-D phase unwrapping, Radio Science, 23 (4) : 713-720, 1988

Graham, L., Synthetic interferometric radar for topographic mapping. Proceedings of IEEE, 6, 763–768, 1974

Leprince, S., Measuring Horizontal Ground Deformation using Optical Satellite Images,Handout guest lecture for Caltech Tectonics Geodesy Ge 167, 2009

Leprince, S. Barbot, F. Ayoub and J. P. Avouac, Automatic and Precise Ortho-rectification, Coregistration, and Subpixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45 (6) : 1529-1558, 2007

Massonnet, D ; Perspectives de l'interférométrie radar. Bulletin de la SFTP, 127, 3– 15, 1992

Massonnet, D ; Rabaute, T, Radar Interferometry - Limits and Potential, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 31 (2) : 455-464,1993

Massonnet, D., Briole, P. and Arnaud, A., Deflation Of Mount Etna Monitored By Spaceborne Radar Interferometry. Nature, 375 (6532) :567-570, 1995

Massonnet, D ; Feigl, KL, Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, Reviews of Geophysics, 36 (4) : 441-500, 1998

Meyer, F, Bamler, R, Jakowski, N, Fritz, T ; Methods for small scale ionospheric TEC mapping from broadband L-band SAR data, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS '06

Pipia L, Aguasca A., Fabregas X., Mallorqui J., Lopez-Martinez C ; Temporal decorrelation in Polarimetric Differential Interferometry using Ground Based SAR sensor, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05.

Ristori, B ; Etude des déformations sismiques autour d'une faille active par télédétection, 2009, rapport de TFE - ESGT

Usai, S ; A Least Squares Database Approach for SAR interferometric data, Monitoring terrain deformations at Phlegrean Fields with SAR interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41 :753–760, 2003.

Vasco D, Rucci A, Ferretti A, Novali F, Bissell R ,Ringrose P , Mathieson A, and Wright I ; Satellite-based measurements of surface deformation reveal fluid flow associated with the geological storage of carbon dioxide Geophysical Research Letters, VOL. 37, L03303, doi :10.1029/2009GL041544, 2010

Wegmuller, U. ; Strozzi, T. ; Wiesmann, A. ; Interferometric point target analysis for deformation mapping ; IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03.

6 Participation à des projets de Recherche

Les paragraphes suivants décrivent brièvement des projets significatifs et mentionnent mon rôle au cours de leur déroulement.

6.1 Projets de recherches à financement principalement externe

6.1.1 RESUM (2000-2001, financement Ministère de la Recherche/CNES)

présentation : le projet RESUM (Réseau de suivi de subsidence urbaine et minière), est soutenu par le CNES et par les réseaux technologiques "Génie Civil et Urbain" et "Terre et Espace" du Ministère de la Recherche. Il a pour but de développer une action innovante sur la mesure des phénomènes de déformation du sol (ex : affaissements miniers, cavités naturelles, ouvrages souterrains) par le biais d'une technique d'observation satellitaire, l'interférométrie radar. La démonstration porte sur le potentiel de ces techniques d'observation spatiales susceptibles d'élargir les possibilités de métrologies spécifiques aux phénomènes de subsidence et d'apporter des outils de diagnostic dans le cas des évolutions cinématiques lentes. Il devra délivrer des produits et des services associés dédiés à la détection, la surveillance et la politique de prévention. Il implique des organismes publics (BRGM, IGN, LCPC, ECP, CNES), des utilisateur industriels (Gaz de France et Groupe Charbonnages de France), une PME liée aux professionnels de la subsidence (Magnitude) et des PME déjà en charge de la diffusion de produits et services dans le domaine de l'interférométrie (TRE et KINOA).

Rôle : traitements interférométriques, réflexion sur l'adéquation des produits aux besoins des utilisateurs finaux, rédaction de rapports

6.1.2 TERRAFIRMA stage 1 (2002-2005 - financement GMES/ESA)

présentation : Terrafirma est un des services ayant reçu le soutien du prgramme Global Monitoring for Environment and Security (GMES) de l'Agence Spatiale Européenne. Terrafirma a pour but de fournir un service d'information sur le mouvement de la surface du sol. Il implique des producteurs d'information sur le mouvement du sol à partir d'interférométrie radar et des service géologiques nationaux. Le concept de Terrafirma se base sur la technique de réflecteurs persitants (PSI) à partir d'images d'archive et cible principalement la subsidence urbaine et les glissements de terrains.

Rôle : traitements interférométriques, réflexion sur l'adéquation des produits aux besoins des utilisateurs finaux, rédaction de rapports

6.1.3 MVTERRE (2002-2007 - Financement FEDER/FIDOM/Région)

présentation : ce projet cible les phénomènes de mouvements de terrain de grande ampleur sur l'île de la Réunion. L'ojectif du projet est de mieux comprendre les paramètres qui régissent les vastes effondrements de falaises et glissements de terrain sur les versants de l'île et de modéliser sur deux sites la relation entre précipitations et vitesse de déplacements des grands glissements. Le but du projet est, donc, d'une part, l'établissement de relations entre la géologie, le relief, l'hydrologie, l'hydrogéologie et les mouvements de grande ampleur et, d'autre part, la détection et du suivi des mouvements de terrain de grande ampleur.

Rôle : traitement interférométriques et corrélation d'images sur le glissement de Hellbourg, rédaction de rapports

Dans le cadre d'une suite à ce projet (MVTERRE 2 en cours), il est prévu de suivre deux glissements de terrain à l'intérieur du Cirque de Salazie à partir de corrélation d'images Radar Haute Résolution.

6.1.4 "déroulement de franges interférométriques" (2004-2005 - financement CNES)

présentation : ce projet consiste en une série de travaux réalisés dans le cadre d'un contrat CNES concernant l'amélioration du déroulement de franges en interférométrie radar par utilisation d'un MNT de référence et d'une base d'images radar satellitaire et fournir des recommandations dans la perspective d'une future mission dédiée à la topographie. L'objectif est d'atteindre des précisions altimétriques métriques sur le MNT final résultant de la complémentarité des données utilisées.

Rôle : responsable du projet, traitement de données, mise en place de la méthode, rédaction de rapports

6.1.5 PSIC-4 (2004-2006, financement ESA)

présentation : les méthodes de réflecteurs persistants (PSI) sont un ensemble de technologies nouvelles pour la mesure de changements de positions relatives de cibles (généralement) brillantes suivant la direction de visée avec - dans les cas idéaux - une précision millimétrique. En réponse à une recommendation du workshop Fringe 2003, l'ESA a lancé le projet Persistent Scatterer Interferometry Codes Cross-Comparison And Certification (PSIC-4) afin de produire une information fiable sur l'exactitude et précision de ces méthodes. Le projet est divisé en 2 phases. La première étape concerne le traitement du même jeu de données en parallèle par les différentes équipes participantes. La seconde est une évaluation indépendante des mesures produites par un groupe de validation. Partenaires du consortium de validation : TNO, BGS, IG, BRGM.

Rôle : coordination du consortium de validation, analyse des résultats PSI produits par les équipes, rédaction de rapports

6.1.6 Safeland - area 4 (2009-2012 , financement Européen 7ème PCRD)

présentation : Safeland est un projet financé par le 7èmeProgramme Cadre pour la Recherche et le Développement Technologique de la Commission Européenne. Thématiquement, le projet cible les risques naturels. Il inclus 25 institutions de 13 pays européens. SafeLand a pour but de developper des outils d'évaluation et de gestion de risque pour les glissements de terrains à l'échelle locale, régionale et européenne. L' "Area 4" vise les outils de surveillance et d'alerte pour les glissements de terrains et a pour but d'identifier les meilleures technologies disponibles dans le contexte de l'évaluation de l'aléa.

Rôle : proposition de méthodologies pour le suivi de glissement de terrain par télédétection, traitement de données radar HR par correlation sur un site test (Barcelonnette) .

6.1.7 PERPETUATE (2009-2012, financement Européen 7ème PCRD)

présentation : Perpetuate a pour but de développer une méthodologie pour l'évaluation et la mitigation du risque sismique visant le patrimoine culturel à partir de techniques innovantes pour la préservation de ce patrimoine (architecture et oeuvres d'art non déplaçables). Le projet concerne aussi bien l'échelle du territoire que l'élement individuel.

Rôle : suivi de déformation de bâtiments à enjeu culturel et historique sur un site test (centre historique de Rhodes) par PSI.

6.1.8 Retrait Gonflement (2009-2010, financement Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable)

présentation : Le but du projet est d'évaluer l'outil PSI dans le cadre de l'étude du retrait-gonflement. Le projet cible le site test de Nogent-sur-Marne. La validation est menée à bien d'une part par comparaison à des mesures de nivellement (réseau installé dans le cadre du projet) et aux cartes d'aléas et de dommages. Il apparaît nécessaire de pouvoir couvrir la période de suivi de 1992-2001 à 2002-2007 (données ENVISAT) pour couvrir l'évènement climatique de 2003. Cette démonstration initiera la réflexion sur les possibilités qu'offrent ces données géodésiques par rapport à la procédure de cartographie retrait/gonflement actuelle.

Rôle : contribution à l'analyse des résultats

6.1.9 Etudes à la demande de partenaires industriels

En parallèle aux projets de recherche précédents, il faut citer des études éffectuées dans un cadre plus opérationnel concernant les phénomènes de mouvements verticaux. Bien que n'ayant pas vocation à être de la recherche, ils nous ont permis d'utiliser (et donc parfois d'améliorer) les techniques que nous visons à décelopper. Parmi ces études, les suivantes me semble avoir eu une certaine incidence sur mon activité de recherche et dont les résultats ont influencé certaines des publications jointes aux document.

- Une série d'études à la demande de Charbonnages de France (entre 1999 et 2001) sur la mesure de subsidence (ou soulèvement) après-mines sur la Lorraine, le Nord-Pas de Calais et Montceau-les-Mines.

- Une étude à la demande de GEODERIS sur le suivi par interférométrie PS (IPTA) de déformation sur un secteur du bassin ferrifère lorrain (2008-2009)

- Une étude à la demande de la DDT Moselle sur le suivi par interférométrie de l'affaissement sur la commune de Hilsprich (2010)

6.2 Projets de recherche principalement financés par la Direction de la Recherche du BRGM

Parallèlement aux études décrites précédemment, les projets suivants (à financement interne au BRGM) ont eu une incidence majeure sur l'activité de Recherche présentée dans ce mémoire.

6.2.1 projets de recherche BRGM

MESSAT (Développement de techniques issues de l'imagerie spatiale) : projet visant l'amélioration de techniques satellitaires et ciblant plus spécifiquement les déformations liées aux cavités souterraines
SISMORISK : projet de recherche ciblant le risque sismique

"suivi impact" : ce projet vise le suivi des conséquences en surface de l'injection de CO2 lors du stockage.

Pour l'ensemble de ces projets notre participation consiste à améliorer les techniques décrites dans cette synthèse ou proposer des techniques innovantes dans le but de les appliquer aux thématiques spécifiques relevant de ces projets.

6.3 Autres contributions à des projets de Recherche et Développement

participation à la CIEST

Au cours des 5 dernières années, notre équipe a contribué, dans le cadre de la CIEST(Cellule d'Intervention et d'Expertise Scientifique et Technique) et la Charte internationale Espace et catastrophes majeures, à des études sur les séismes du Sichuan, d'Haiti et de l'Aquila par la production de résultats interférométriques et de corrélation d'images

participation à TropiSAR (en cours)

La campagne TropiSAR (mission aérienne radar en bande P sur la Guyanne) a pour but de valider le concept de la future mission satellitaire BIOMASS et d'identifier des applications. Notre contribution concerne l'évaluation du potentiel des instruments en bande P pour la mesure de déformation de surface par interférométrie en zone à couvert végétal important.

participation à "Observation spatiale des régions sismiques côtières en Méditerranée" (financement TOSCA - en cours)

Le projet vise à optimiser sur une région précise (Algérie) et pour un objectif bien défini (l'étude du relief et de ses changements par l'action des forces tectoniques, climatiques et gravitaires), l'utilisation des systèmes imageurs optiques et radar actuels. Il cherchera à définir les avancées permises par les systèmes nouveaux (radar bande X et L) ou futurs (imagerie Pleiades HR). Il s'attachera particulièrement à la combinaison des données spatiales et sol pour la mesure précise du relief et celle des déformations de ce relief. Notre contribution concerne les traitements interférométriques sur l'archive ASAR et PALSAR.

Participation au montage de la proposition Z-Earth au programme Earth-Explorer 8 de l'ESA (2010 - coordonnateur T. Dewez)

La proposition de mission satellitaire Z-Earth consiste en un projet de capteur stéréo-lidar (un capteur stéréo combiné avec un lidar sur la même plateforme) dans le but de produire un Modèle Numérique de Terrain haute résolution précis à mieux que 40 cm acquis plusieurs fois durant la mission. Le consortium proposant englobe des partenaires concernés par les thématiques utilisant le différentiel de MNT ainsi qu'Astrium. Bien que le concept n'ait pour l'instant pas été retenu par l'ESA, nous envisageons de poursuivre son étude en collaboration avec le CNES.

7 Participation à l'encadrement de Thèses

résumés des thèses

Système complet d'interférométrie radar : étude de cas (Frédéric Vincent, 2001, Université Laval, Québec - Directeur de Thèse G. Edwards)

L'interférométrie radar à ouverture synthétique (InROS) est une technique récente née de la télédétection et du traitement d'image qui consiste en la corrélation fine de deux images radar d'un même site acquises à des positions et/ou à des périodes différentes. Les positions légèrement différentes sont à l'origine de l'effet stéréoscopique qui permet de créer un modèle numérique d'altitude (MNA). Si un mouvement du relief s'est produit entre les deux dates d'acquisition, la déformation du sol est mesurable avec une précision théorique millimétrique et avec une grande densité de point. Cependant, comme toutes techniques récentes, les limites de l'InROS ne sont pas encore bien connues. Les caractéristiques morphologiques, climatiques et écologiques des zones étudiées modifient souvent les résultats escomptés. L'InROS fut le plus souvent appliquée dans des conditions particulières : terrain sec, peu de végétation, faible précipitation, fort taux de déformation. De plus, les conditions atmosphériques régnant sur la zone étudiée lors des acquisitions, peuvent créer des artéfacts faussant l'interprétation des interférogrammes. Les techniques disponibles permettent uniquement de minimiser ces artéfacts en moyennant les informations de plusieurs interférogrammes. Cette recherche est une première application de l'InROS dans une région au climat continental où l'on s'attend à de nombreux facteurs limitatifs. L'objectif est d'évaluer les apports et les limites de l'InROS par rapport aux techniques habituelles. La création de MNA, la détection de glissement de terrain et de mouvement de glace sont étudiés. Le second objectif est de développer des méthodes permettant de corriger certaines limites de l'InROS, liées autant à la surface du sol qu'à l'atmosphère. Premièrement, l'étude de glissements de terrain montre que les limites de l'InROS sont plus liées aux caractéristiques d'acquisition des satellites (ligne de base) et aux faibles taux de déformation qu'aux conditions de surface (humidité, végétation). Deuxièmement, notre recherche met en évidence le potentiel de l'InROS pour la mesure précise du déplacement des glaces. Elle nous permet d'anticiper ses répercussions pour les suivi des glaces aussi bien en région urbaines que dans le Grand Nord. Troisièmement, nous avons créé des MNA par InROS avec des précisions verticales très variables suivant l'occupation du sol, la pente locale et les caractéristiques d'acquisition. L'étude de ces facteurs nous a permis de proposer une méthode de fusion de MNA améliorant considérablement la qualité du MNA hybride. Finalement, nous proposons une méthode de correction des effets atmosphériques d'un seul interférogramme à partir de mesures de positionnement par satellite (Global Positioning System) effectuées lors des acquisitions radar. Cette méthode testée sur des MNA InROS permet d'augmenter la qualité des MNA corrigés.

Financement de la bourse FCAR (Fonds Canadien d'Aide à la Recherche).

Publication : Vincent et al., 2004, *Int Journal of Remote Sensing*.

Etude des mouvements de surface en environnement minier à partir d'interférométrie radar et identification des origines des déformations l'exemple du bassin Nord/Pas-de-Calais. (Yann GUEGUEN, Université Marne-la-Vallée, 2008 - Directeur de Thèse B. Deffontaines)

Contexte du travail : La région du Nord/Pas-de-Calais est connue pour ses importantes ressources minières. L'exploitation des mines dans cette région est terminée et les anciens exploitants se tournent après l'arrêt des travaux vers un nouvel objectif : la fermeture des sites et la remise des concessions. L'industrie minière, avec l'exploitation et l'extraction du charbon notamment, engendre une modification des structures géologiques et hydrogéologiques entraînant des déformations de surface. Celles-ci

sont susceptibles de créer des désordres, il est par conséquent nécessaire de suivre précisément les faibles évolutions de la topographie après l'arrêt de l'exploitation. Objectif de la thèse : Le but de cette thèse CIFRE dans la région minière du Nord/Pas-de-Calais est tout d'abord la détection et l'analyse des micro-variations de la topographie à l'aide de la panoplie des nouvelles méthodes d'interférométrie radar. Il s'agira de définir une méthode optimale et un outil robuste pour la détection des zones soumises aux variations topographiques faibles (<10 cm). Puis, à l'aide de données exogènes (différentes données de terrain et de mines, de comparaison de nivellement, indications piézométriques et autres...), les différents moteurs des déformations topographiques seront envisagés. Le but est de distinguer les variations topographiques d'origine naturelle (variation saisonnière des nappes phréatiques par exemple) et d'origine anthropique (et pour ces dernières plus particulièrement, celles imputables au domaine minier). Enfin, l'ensemble des connaissances acquises sera utilisé pour réaliser une modélisation des phénomènes observés et de leurs diverses origines. Ces dernières pourront aboutir, dans la mesure du possible, au développement d'un outil opérationnel permettant un meilleur suivi des mouvements de terrains après l'arrêt total des exploitations minières. C'est l'objectif de gestion de l'"Après-Mines".

Financement bourse CIFRE/ Charbonnages de France

Publication : Gueguen et al., 2009, *Journal of Applied Geophysics*

Observations Sismotectoniques par Télédétection (Marcello de Michele, Université Pierre et Marie Curie, 2010-Directeur de Thèse P. Briole)

Pendant les 20 dernières années, notre connaissance de la déformation de la Terre a été complètement bouleversée par l'introduction de deux techniques de Géodésie spatiale. D'une part, ce que on appelle 'point positioning' non pas seulement à partir du GPS (Global Positioning System) mais aussi à partir du système DORIS (Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated from Space). De l'autre part, on trouve les techniques d'imagerie satellitaire de corrélation d'images et interférométrique SAR (Synthetic Aperture Radar) ainsi que les méthodes d'offset panchromatiques à haute résolution spatiale. Ces nouvelles techniques, en complémentarité avec les techniques plus classiques, nous ont permis d'apporter toute une série d'avancement scientifiques notamment la confirmation et l'amélioration de la théorie de la tectonique de plaques, la cartographie fine de déplacements séismiques et aséismiques, la cartographie de la distribution de le déformation aux marges de plaques, l'amélioration de la compréhension des phénomènes de relaxation post sismiques, la détection de séismes lents et 'silencieux', la détection de signaux précurseurs de séismes ou d'éruptions volcaniques. Au présent, des nombreuses questions clés restent ouvertes. Notamment, combien de déformation est accommodé sismiquement aux bords de plaques par rapport à la déformation totale et à la contrainte tectonique ; les séismes son responsables de combien de déformation par rapport au déplacement aséismique sur discontinuités (failles) ; pourrait on proposer des modelés pour les précurseurs des séismes et aurait cela un sens. Dans la présente Thèse de Doctorat, nous avons essayer d'étudier le potentiel, les limitations et la complémentarité des données issues de l'Observation de la Terre pour prendre en compte et essayer de répondre à certains aspects des questions exposées ci-dessus. Nous avons concentré notre travail sur un nombre de zone limitées, comme Bam (Iran), Parkfield (USA), et le Longmen Shan (China). Nous avons basé les analyses et les calculs sur le Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO), les techniques de corrélation d'image radar d'amplitude ainsi que les images panchromatiques à haute résolution du type SPOT-5 ou Quickbird. Dans notre recherche, nous avons essayé de développer des approches techniques originales (comme la corrélation d'images aériennes et Quickbird), nous nous sommes concentrés en particulier sur la modélisation et la suppression de la composante topographique (non désirée) aux correlogrammes issus de l'imagerie optiques et radar et nous nous sommes concentrés sur la contribution de la ionosphère au signal radar interférométrique en band L. En résumant, notre travail est focalisé sur

deux axes ; d'une part, on s'intéresse aux approches techniques originales ; de l'autre, nous concentrons nos efforts de recherche sur la compréhension des processus néotectoniques, notamment le champ de déplacement cosismique, la répartition de la déformation pendent la phase intersismique et cosismique du cycle sismique sur failles majeurs au bord de plaques (p. e. la Faille de San Andreas) ou intra plaque (p. e. le Longmen Shan).

Publications : de Michele et al., 2010, *Earth Planets Space* ; de Michele et al., 2010, *Geophysical Journal International*, de Michele et al. ; 2008, *Geophysical Journal International*

Suivi de différentes phases du cycle sismique : mesure par télédétection et modélisation (Guillaume Bacques, Université de Grenoble - Directeur de thèse F. Cotton - thèse en cours : le résumé ci-dessous correspond au texte joint à la demande de bourse CNES)

L'objectif de la thèse sera de développer l'utilisation et la combinaison de différents types de données et techniques de télédétection spatiale (Interférométrie Radar et Corrélation d'images Très Haute Résolution spatiale -THR-) pour l'étude du chargement et de la relaxation des contraintes autour de grandes failles actives. L'étude des risques naturels liés aux failles s'appuie en grande partie sur la détection, la mesure et la modélisation des déformations de la surface de la terre. Ces dernières années, les avancées réalisées en géodésie spatiale ont permis d'améliorer la précision des mesures de déformation et l'on peut encore progresser. Ainsi il devient possible de cartographier des mouvements non plus seulement de grande ampleur (mouvements cosismiques ou post-sismiques par exemple) mais de plus faibles déplacements (intersismiques notamment, à des vitesses de quelques mm/an à cm/an), et d'observer leur évolution temporelle. La détection et la modélisation d'évènements transitoires au cours du cycle sismique, tels les séismes lents ou d'éventuels précurseurs, sont l'un des objectifs majeurs en Sciences de la Terre pour ces prochaines années, susceptibles de modifier profondément notre compréhension du fonctionnement des failles et l'évaluation de leur potentiel de rupture. L'interférométrie différentielle radar (DinSAR), de par sa couverture spatiale et les archives importantes de données accumulées depuis les années 1990, est un outil unique pour le suivi spatio-temporel des mouvements tectoniques, y compris dans les régions où les failles sismogéniques sont peu ou pas connues. Nous proposons pour un tel suivi une exploitation interférométrique de l'archive radar (ERS, Envisat, ALOS). Nous proposons aussi une évaluation du potentiel de la corrélation d'images radar Haute Résolution radar (p.e. capteur COSMO-SKYMED) dont l'archive est en cours de constitution. Ce sujet comporte deux volets indissociables « Mesure de déformation de surface par télédétection » et « Modélisation de la déformation », pour deux chantiers prioritaires : Parkfield en Californie, site pilote pour l´étude des précurseurs sismiques, et la zone de Guerrero au Mexique, où ont été observés des séismes lents (par GPS et InSAR Envisat). Dans ces deux cas, une observation par InSAR et corrélation d'images est possible sur plusieurs années pré- et post- événement.
Approches envisagées (mesures et modèles) :

- Interférométrie radar différentielle « conventionnelle »Nous envisageons une inversion en série temporelle des données InSAR disponibles pour cartographier la déformation en surface au voisinage des failles cibles, et détecter de possibles évolutions dans le temps (comparaison avant/après séisme, évolution au cours d'un séisme lent). Nous testerons des corrections systématiques des effets troposphériques sur les mesures InSAR, empiriques, basées sur la corrélation phase-toporaphie, ou à partir de modèles météorologiques globaux.

Nous prévoyons aussi des corrections des effets stéréoscopiques et des perturbations ionosphériques (spécifiques au satellite ALOS). Les corrections atmosphériques pourront être validées par des données GPS. Nous nous intéresserons aussi au potentiel du Wide Swath InSAR (images de tailles d'environ 400 km) pour le suivi de failles sur des longueurs importantes.

- Corrélation d'images (optique et radar HR)

Nous nous intéresserons en particulier aux nouveaux radars Haute Résolution. Compte tenu de leur

répétitivité et du fait qu'ils ne sont pas limités par le couvert nuageux, ces outils semblent une bonne alternative pour les déplacements décimétriques. Le potentiel par rapport à l'imagerie optique de même résolution sera évalué.

- PSI (interférométrie sur points persistants).

Ce type de méthode pourra être testée en complément pour étudier la non-linéarité dans les mouvements (accélérations ou décélérations...) qui pourrait être associée à des variations de contraintes. Nous proposons d'estimer sur certains points des écarts temporels à un modèle de déformation linéaire dans le temps, dans une perspective d'anticipation de phénomènes sismiques.

- Fusion des mesures

Disposant de mesures de déformation de natures différentes (déplacements en lignes de visée par InSAR, déplacements horizontaux par corrélations, ponctuels par GPS, ...) et de précisions différentes, une méthode d'inversion pour obtenir une description fiable de la déformation de surface en 3 voire 4 dimensions devra être proposée afin de permettre une interprétation du phénomène.

- Inversion

L'objectif est de modéliser la distribution de glissement au cours du temps sur les plans de faille (identification des zones bloquées, contour des zones de glissement asismique ou sismique, variations de localisation, de vitesse de glissement au cours des différentes phases du cycle sismique). Des inversions conjointes géodésie/sismologie sont envisagées.

Financement bourse : CNES/BRGM

7.1 Enseignement et participation à l'encadrement de stagiaires

Participation à des Enseignements :

- 1996-1997 Enseignements en informatique (96 h de vacations TP – Deug B ; univ Montpellier II)

- 2004-2010 : Enseignements en télédétection radar (4 à 8h / an – Master Géosciences et Environnement/GEO2ENV ; Université d'Orléans)

Sujets et résumés des mémoires de stages :

Josée Fitzback (Maitrîse de Géomatique - Université Laval, Qc, 1998, responsable G. Edwards). Détection des cours d'eau par images radar selon les stratégie de la vision humaine.

La localisation des sources d'eau douce de la planète constitue un problème de premier ordre pour plusieurs intervenants. Par exemple, il est essentiel pour les gouvernements, d'évaluer si les ressources actuelles en eau pourront subvenir aux besoins futurs des populations. pour ce faire, l'inventaire complet des ressources hydriques doit être connu. L'imagerie radar constitue un outil précieux à considérer pour la mise à jour de cet inventaire. Depuis de nombreuses années, plusieurs chercheurs travaillent à l'élaboration de méthodes permettant l'extraction des de cours d'eau et d'éléments linéaires apparaissnat sur les images satellitaires. Les principaux obstacles rencontrés par ces méthodes sont le bruit présent sur les images, la végétation recouvrant les cours d'eau ainsi que les distorsions géométriques des images. Naturellement, l'oeil humain peut faire abstraction de cette présence de bruit, de la végétaion ainsi que des distorsions et repérer le cours d'eau. Ce mémoire présente donc la méthodologie élaborée, pour le développement d'un systèmes informatisé, basé sur les stratégies de la vision humaine, ainsi que les résulats obtenus par ce dernier.

Isabel Cyr (Maitrîse de Géomatique - Université Laval, Qc, 1998, responsable K. Thomson). Exploitation des données RSO de RADARSAT pour la cartographie de la vulnérabilité de la nappe souterraine.

En hydrogéologie, on utilise la modélisation mathématique pour déterminer et cartographier le degré de vulnérabilité de la nappe souterraine. Le modèle DRASTIC souvent utilisé pour évaluer cette vulnérabilité, se base sur la détermination d'unités hydrogéologiques homogènes et sur lévaluation de paramètres hydrologiques et géophysiques. Ces paramètres sont mesurés ou estimés à partir de données géoscientifiques multisources de la région d'étude. Actuellement, les images radar ne sont pas considérées comme une source de données géoscientifiques malgré le fait qu'elle soient sensibles à la rugosité de surface et l'état hydrique du sol, deux aspects importans de la modélisation hydrogéologique. Faisant suite à une étude du programme gouvernemental SYNERGIE (PREDIR), la présnet recherche porte sur le potentiel d'intégration desn images RSO de RadarSAT au modèle DRASTIC pour la région de Lachute à Québec. Différentes combinaisons d'images ainsi que l'utilisation de deux outils d'analyse (segmentation d'image et analyse multivariée) ont permis d'évaluer ce potentiel.

Audrey Huré (DEA HHGG - Université UPMC/Mines de Paris 1999, responsable C. Carnec). Réactualisation du modèle NEWSAM-Compaction appliqué au cas de Mexico et couplage des résultats de simulation à des cartes de déformation issues d'interférométrie Radar

résumé original non disponible. Le but de ces travaux est d'améliorer les caractéristiques du modèle hydrogéologique NEWSAM (discrétisé en 23 couches) produit par l'ESMP sur la ville de Mexico, en ajustant la déformation de surface (compaction) induite par les pompages d'eau à une cartographie de l'affaissement obtenue par intergférométrie radar différentielle (à partir de données ERS).

Pierre Chastenet (DESS applications des technologies spatiales, Université de Strasbourg, 2001, responsable C. Carnec). Optimisation de la sélection des couples interférométriques et valorisation des produits interférométriques

résumé original non disponible. L'objectif de ces travaux est de proposer des bases méthodologiques ainsi que leur mise en oeuvre s'inscrivant à l'amont et à l'aval de la chaîne de traitement interférométrique pour optimiser le service proposé dans le cadre du projet opérationnel RESUM. [...] Ces travaux permettent d'offrir des produits cartographiques aux utilisateurs finaux partenaires du projet. Certains types de produits apparaissent intéressants pour gérer et suivre l'impact d'activités industrielles sur le comportement des formations terrestres (exploitation minière, pompage hydraulique intensif, stockage de gaz souterrain).

Baptiste Ristori (Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, 2009). Etude des déformations Sismiques autour d'une faille active par télédétection.

Le 22 février 2006 à 22h19 UTC, le district de Machaze au Mozambique fut frappé par un important séisme d'une magnitude de 7.0 sur l'échelle de Richter. Cette secousse est une répercussion de l'écartement du rift est-africain entre la plaque somalienne et la plaque nubienne. Dans cette zone désertique, située à l'extrême sud du rift, la présence de mines la rendent aujourd'hui difficile d'accès et dangereuse pour une étude sur le terrain. Néanmoins, une rupture a pu être observée par quelques sismologues.

Dans ce contexte, nous avons utilisé différentes méthodes de télédétection (interférométrie radar, corrélation d'images optiques et radar) exploitées sous GAMMA et ENVI (Cosi-corr), ainsi que l'inversion

de données de déformation afin d'apporter un outil de qualité permettant de répertorier le déplacement de terrain avec une grande précision durant les phases pré-sismiques, cosismiques et post-sismiques.

Malgré certaines données difficilement exploitables, les résultats obtenus coïncident et viennent compléter les données précédemment calculées par des équipes de chercheurs, permettant ainsi l'élaboration complète et fiable d'une carte des déformations.

8 PUBLICATIONS

8.1 Rang A

[1] Raucoules D., Thomson K., 1999, « Adaptation of the stepwise segmentation algorithm for SAR mosaic automatic segmentation », International Journal of Remote Sensing, vol 20, n°10, p. 211

[2] Le Mouélic S., Raucoules D., Carnec C., King C., Adragna F., 2002, «Ground uplift in the city of Paris (France) detected by satellite radar interferometry», Geophysical Research Letters, 29, 1853, 34-1

[3] Raucoules D., Le Mouélic S., Carnec C., Maisons C., King C., 2003, « Urban subsidence in the city of Prato (Italy) monitored by radar satellite radar interferometry», International Journal of Remote Sensing, vol 24, n°4, p. 891

[4] Raucoules D., Maisons C., Carnec C., Le Mouélic S., King C., Hosford S., 2003, «Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry - The case of Vauvert (France) » Remote Sensing of Environment, vol 88, n°4, p. 468

[5] Vincent F., Raucoules D., De Groeve T., Edwards G., Mostafavi M.A., 2004 , «Detection of river/sea ice deformation using satellite interferometry : limits and potential», International Journal of Remote Sensing – Vol 25, n°18, p. 3555

[6] Le Mouélic S., Raucoules D., Carnec C., King C., 2005, «A Least-squares adjustment of multi-temporal InSAR data – Application to the ground deformation of Paris», Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 71, No 2, p. 197

[7] Colesanti C., Le Mouelic S., Bennani M., Raucoules D., Carnec C.,Ferretti A., 2005, «Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers technique - A case study in the East of France», International Journal of Remote Sensing, Vol. 26, No. 1, p. 201

[8] E. Lagios, Parcharidis Is. , Sakkas V., Raucoules D., Feurer D., Le Mouelic S., King C., Carnec C., Novali F. , Ferretti A., Capes R. et Cooksley G., 2006, « subsidence monitoring within the Athens basin using advanced space radar interferometric techniques », Earth Planets and Space ; vol 58, n° 5, p. 505

[9] Delacourt C., Allemand P., Berthier E., Raucoules D., Casson B., Grandjean P., Pambrun C. and Varel E., 2007, « Remote-sensing techniques for analysing landslide kinematics : A review », Bull.

Soc. géol. France,t. 178, n°2, p89

[10] Raucoules D., Colesanti C. and Carnec C, 2007, « Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence », Compte Rendus Geosciences, vol 339, n°5, p 289

[11] De Michele M., Raucoules D., Aochi H., Baghdadi N., Carnec C., 2008, «Measuring coseismic deformation on the northern segment of the Bam-Baravat escarpment associated with the 2003 Bam (Iran) earthquake, by correlation of very-high-resolution satellite imagery», Geophysical Journal International – Vol. 173, p. 459-464

[12] Raucoules D., Parchiaridis I, Feurer D., Novalli F., Lagios E., Sakkas V., Le Mouelic S., Cooksley G. , Carnec C., Ferretti A., Hosford S., 2008, « Deformation monitoring of the greater area of Thessaloniki (Northern Greece) using DInSAR techniques. », Natural Hazards and Earth System Sciences, vol 8, n°4, p. 779-788

[13] De Michele M., Raucoules D., Salichon J., Lemoine A., Aochi H., 2010, «Spatiotemporal evolution of surface creep in the Parkfield region of the San Andreas Fault (1993- 2004) from Synthetic Aperture Radar», Earth and Planetary Science Letters [soumis]

[14] Guéguen, Y., Deffontaines, B., Fruneau, B., Al Heib, M., De Michele, M., Raucoules D., Guise, Y., Planchenault, J., 2009, « Monitoring residual mining subsidence of Nord/Pas-de-Calais coal basin from Differential and Persistent Scatterer Interferometry (Northern France) » Journal of Applied Geophysics, vol 69, n°1, p. 24-34

[15] Raucoules D., Bourgine B., de Michele M., Le Cozannet G., Closset L., Bremmer C., Veldkamp, H., Tragheim D., Bateson L., Crosetto M., Agudo, M. Engdahl M, 2009, « Validation and Intercomparison of Persistent Scatterers Interferometry : PSIC4 project results. » Journal of Applied Geophysics, vol 68, n°3, p. 335-347

[16] Delacourt C., Raucoules D., Le Mouelic S., Carnec C., Feurer D., Allemand P., Cruchet M., 2009, « Observation of a large scale landslide in La Reunion Island using Differential SAR interferometry (JERS and Radarsat) and correlation of optical images (Spot 5) », Sensors, vol 9, n°1, p. 616-630.

[17] de Michele M., Raucoules D., C. Lasserre , E. Pathier ,Y. Klinger, J. Van Der Woerd , J. de Sigoyer , X. Xu., 2010, « The Mw 7.9, 12 May 2008 Sichuan earthquake rupture measured by sub-pixel correlation of ALOS PALSAR amplitude images », Earth Planets and Space, vol 62, n° 11, p. 875-879

[18] Raucoules D., de Michele M., 2010, «Assessing ionospheric influence on L-band SAR data : Implications on co-seismic deformation measurements of the 2008 Sichuan Earthquake», Geosciences and Remote Sensing Letters , vol. 7 n° 2, p. 286-290

[19] de Michele M., Raucoules D., de Sigoyer J., Pubellier M., Chamot-Rooke N., 2010, «Three-dimensional surface slip of the 12 May 2008 Sichuan earthquake (China) from Synthetic Aperture Radar », Geophysical Journal Internationnal, Geophys. J. Int., vol. 183, p. 1097–1103

[20] Raucoules D., Ristori B., De Michele M., Briole P., 2010, «Surface displacement of the Mw 7 Machaze earthquake (Mozambique) : Complementary use of multiband InSAR and radar amplitude

image correlation with elastic modelling», Remote Sensing of Environment, Vol. 114, n° 10, p. 2211-2218

8.2 Rang B

[21] Raucoules D., Thomson K., 1999, « Edge detection on SAR images using local Fourier Transforms and multiscale approach », Canadian Journal of Remote Sensing, vol 26, no 1, p 12

[22] Carnec C., Raucoules D., 2001, « Specificité du milieu urbain tropical pour la cartographie des déformations de surface par interférométrie radar (ERS) – application au pompage dans les systèmes aquifères à Djakarta et Hanoi», bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, n°161, p 40

[23] Carnec C., King C., Raucoules D., Guise Y., Paquette Y., 2001, «Suivi de mouvements résiduels sur sites miniers par interférométrie radar : perspectives et applications», Industrie Minérale – Environnement, n° 14, p 21

[24] Carnec C., Colesanti C., Le Mouélic S., Raucoules D., King C. ,2003 «Avancées des technologies spatiales radar appliquées à la détection des déformations de surface d'origine minière » , Revue Française de Géotechnique, n°106-107, p 15

[25] Carnec C., King C., Raucoules D., 2005, « Sous l'oeil des satellites radar : suivi des déformations de surface. », Industrie Minérale – Environnement, n° 118, p. 19-23

[26] Raucoules D. , Le Mouelic S., Carnec C., Guise Y., 2008 , "Monitoring post-mining subsidence in the Nord-Pas-de-Calais coal basin (France). Comparison between interferometric SAR results and levelling", Geocarto international, 23 (4), p. 287-295

[27] de Michele M., Raucoules D., de Sigoyer J., Pubellier M., 2009, « cartographie et mesure de la rupture co-sismique à partir d'imagerie radar satellitaire : application au séisme du Sichuan (Chine) 12 mai 2008 », Géochronique, n°10, p 41-42

8.3 Autres

King.C., Carnec.C., Raucoules.D. , 2004, « Resum : un projet du RGCU », Recherche et Equipement, N° 3

Modaressi H., Raucoules D., de Michele M., 2009, Les catastrophes Naturelles, Objectifs Terre – La révolution des satellites, pages 114-127, éditions le Pommier, Paris, 190 pages.

8.4 Thèse et Mémoire

Raucoules D., 1997, « Utilisation de l'interférométrie ROS (ERS1) pour la construction de MNT en zone montagneuse. Application au Grand Caucase », Thèse de doctorat, Université Montpellier II - éditions de l'ISTEEM no 3

Raucoules D., 1992, « Détermination du géoïde par comparaison des hauteurs géométriques (GPS) et des hauteurs orthométriques (nivellement) application en zone montagneuse (Pyrénées Centrales) », Rapport de DEA, Université Montpellier II

8.5 Communications

Avec publication dans les actes

Raucoules D., Thomson K., « SAR Images Mosaic Segmentation of Tropical Forest Region », IGARSS 98 Seattle, 6-10 juillet 1998 - CDROM

Raucoules D., Carnec C. « Use of interferometric phase for co-registration of ERS SAR and SPOT images », CEOS 99, Toulouse 26-29 octobre 1999, page 113

Raucoules D., Carnec C. « DEM derivation and subsidence detection on the region of Hanoi from ERS SAR Interferometry», FRINGE 99, Liège, 11-13 novembre 1999 - CDROM

Carnec C., Raucoules D., « Advancing ERS SAR towards operational programs ; mapping and modelling of peri-urban subsidence », FRINGE 99, Liège, 11-13 novembre 1999 – CDROM

Carnec C., Raucoules D., Ledoux E., Huré A., Rivera A., « Mapping and modeling of major urban subsidence on Mexico city from SAR interferometry », The fragile Territory, Roma, 7-10 decembre 2000, page 25

Raucoules D., Carnec C., « Algorithm for stacking SAR complex interferograms based on combinations of local spectra », PSIP 2001, Marseille, 23-24 janvier 2001, page 227

Carnec C., King C., Raucoules D., Le Mouelic S., «Réseau de subsidence urbaine et minière par interférométrie - RESUM», journées méditéranéennes pour la prévention des risques naturels GERI2011, p. 84-88

Raucoules D., Le Mouélic S., Carnec C., «Urban Subsidence in the city of Prato (Italy) monitored by satellite radar interferometry», IGARSS 2002, Toronto, 24-28 juin 2002 - CDROM

Le Mouélic S., Raucoules D., Carnec C., King C., Adragna F., « Ground Uplift in the city of Paris (France) monitored by satellite radar interferometry» , IGARSS 2002, Toronto, 24-28 juin 2002 - CDROM

Le Mouélic.S., Raucoules D., Carnec C., King C., «Détection et quantification des déformations du sol des villes par interférométrie radar : exemple de la ville de Paris », Journées AGAP Qualité : Géophysique Générale et Applications Hydrogéologie, Application géotechniques, Nantes, France, 7-8 novembre 2002

Raucoules D., Maisons C., Carnec C, Le Mouélic S., King C., «Comparison between InSAR and leveling. The case of Vauvert (France)», IGARSS 2003, Toulouse, 21-25 juillet 2003 - CDROM

Le Mouélic, S., Raucoules D., Carnec C., Colesanti C., Fruneau B., Feurer D., Deffontaines B., "Ground deformation analysis in Paris using a multi-interferogram Least-Squares approach", FRINGE'03, Rome, 2-5 decembre 2003

Raucoules D., Le Mouelic S., Delacourt C., Cruchet M., Carnec C., Feurer D., "Identification of landslides in La Reunion Island with JERS and Radarsat radar interferometry", FRINGE'03, Rome, 2-5 decembre 2003

Feurer D., Le Mouelic S., Raucoules D., Carnec C., Nedellec J.-L., "Detection of the subsidence affecting a shopping center in Marseilles (France) using SAR interferometry", FRINGE'03, Rome, 2-5 decembre 2003

Delacourt C., Allemand P., Picard F., Raucoules D., Sqarzoni C., "Potential and limitation of SAR Interferometry for landslides study in the French Alps and Pyrenees", FRINGE'03, Rome, 2-5 decembre 2003

Raucoules D., Maisons C., Carnec c., Le Mouélic S. , «Suivi de subsidence sur le site de la saline de Vauvert par interférométrie radar. » JNGG-Lille 2004

Raucoules D. , Guise Y. , Le Mouelic S., Carnec C., « Mesure des mouvements post-mine sur la bassin houillier du Nord/Pas de Calais par interférométrie radar ». JNGG-Lille 2004

Simonetto .E., Raucoules.D., Carnec.C., Thierry.P., Lembezat.C., King.C., (2006), «Urban subsidence seen by DiffInSAR : temporal deformation series derived from a least-squared technique. », in EARSel Symposium and Workshops - 25th - Global Develpment in Environmental Earth Observation from Space - Porto - Portugal - 6-11/06/2005, p. 225-230

Raucoules.D., Simonetto.E., Souyris.J.C., Pouthier.N. (2005) « InSAR unwrapping using pre-existent topographic information : application to the DEM derivation on the test site of Marseille/Gardanne (France). », in IGARSS 2005 - International Geoscience and Remote Sensing Symposium - Seoul - Korea - 25-29/07/2005

de Michele .M., Raucoules .D., Aochi H., Carnec.C. (2007) « Using Remote Sensing for seismotectonic observations. »„ in 2007 International Geohazards Workshop - Frascati - Italie - 5-9 novembre 2007

Raucoules D., Bourgine B., de MicheleG M., Closset L., Bremmer C., Veldkamp H., Tragheim D., Bateson L., Crosetto M., Agudo M., Engdahl M. (2007) «PSIC-4 : Validation and Intercomparison of

Persistent Scatterers Interferometry. Main results », Fringe 2007, 26-30 novembre 2007, Frascati

Gueguen Y., Deffontaines B., Al Heib M., Fruneau B., Raucoules D., de Michele M., Guise Y., Planchenault J. (2007) « Detection and characterisation of the topographic surface displacements using DINSAR and PS interferometry applied to the Nord/Pas-de-Calais coal basin » Fringe 2007, 26-30 novembre 2007, Frascati

Sans publication

Raucoules D., Bayer R., Chéry J., Daignieres M., Lesquer A., « Détermination du géoïde en zone montagneuse par comparaison des hauteurs géométriques (GPS) et des hauteurs orthométriques (nivellement)», 14è RST, Toulouse, 13-15 avril 1992, page 121.

Raucoules D., Peyret M., « Production of accurate DEM of mountainous region from SAR interferometry. Application to the north Great Caucasus region», EGS 96 la Haye, 6-11 mai 1996

Raucoules D., Thomson K., Simard M., « Segmentation automatique d'images RSO en zone de forêt tropicale », 20ème colloque sur la télédétection, Calgary, 10-13 mai 1998.

Carnec C., Huré A., Ledoux E., Raucoules D., Rivera A., 2000, « Mapping and modelling of major urban subsidence on Mexico city from SAR interferometry », EGS 2000, Nice, 25-29 avril 2000

D. Raucoules , C. Carnec, « Spécificité du milieu urbain tropical pour la cartographie des déformations de surface par interférométrie SAR (ERS) - application aux affaissements liés au pompage souterrain à Djakarta (Indonésie) et Hanoi (Vietnam). », Topographie et Télédétection en Milieu Tropical Humide, Cayenne, 2 - 6 octobre 2000

Raucoules D., Le Mouélic S., Carnec C., «Monitoring urban subsidence in the city of Prato (Italy) using satellite radar interferometry», EGS 2002, Nice, 22-26 avril 2002

Le Mouélic S., Raucoules D., Carnec C., King C., Adragna F., « Ground Uplift in the city of Paris (France) monitored by satellite radar interferometry», EGS 2002, Nice, 22-26 avril 2002

Aubry, D., Carnec C., Maisons C., Pham T.A., Raucoules D., «Subsidence data assimilation between numerical modelling and radar interferometry», EGS 2002, Nice, 22-26 avril 2002

RESUM, «RESUM : suivi de déformations de surface par interférométrie radar», SITEF 2002, Espace et Société : innovations et perspectives - RTE (Réseau Terre et Espace), Toulouse, 24 octobre 2002

Carnec C., D. Raucoules, Ph. Durand, S. Le Mouelic, M. Cruchet, « Monitoring the breathing process of Piton de la Fournaise volcano from RADARSAT interferometry between 1999 and 2002 » . EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, 6-11 avril 2003

Le Mouélic S., D. Raucoules, C. Carnec, C. King, « Monitoring small ground deformations with radar interferometry using a least-square approach » . EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, 6-11 avril 2003

Raucoules D., Maisons C., Carnec C., Le Mouélic S. , King C., « DInSAR monitoring of slow ground subsidence over an area concerned by salt mining activity. » . EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, 6-11 avril 2003

Carnec C., Raucoules D., Durand P., Le Mouelic S., Cruchet M., « Deformation of Piton de la Fournaise volcano as seen by RADARSAT interferometry between 1999 and 2002 ». IGARSS 2003, Toulouse, 21-25 juillet 2003

Raucoules .D., Cruchet .M., Delacourt.C., Carnec C., Le Mouelic .S., Feurer .D, « Landslide monitoring on the La Reunion Island using remote sensing methods. », in EUG 12 - European Geosciences Union - Nice - France - 25-30/04/2004

Raucoules .D., Lagios.E., Parcharidis.I., Sakkas.V., Feurer.D., Le.Mouelic.S., King.C., Carnec .C., Novali.F., Ferretti.A., Capes.R., Cooksley.G. , « Subsidence in the Athens basin monitored by Insar. », in EUG 12 - European Geosciences Union - Nice - France - 25-30/04/2004

Thierry.P., Raucoules.D., Felenc. J., King.C. « Vertical movements in Paris : coupling 3D geological model and SAR interferometry results. », in IGC 32nd - International Geological Congress - Florence - Italie - 20-28/08/2004

Simonetto.E., Raucoules D., Souyris.J.C., Pourthie.N., Carnec C., King C. (2005) On the altimetric accuracy from a pre-existing DEM and a multibaseline InSAR technique., in EARSel Symposium and Workshops - 25th - Porto - Portugal - 6-11/06/2005

Thierry.P., Deverly.F., Reppelin.M., Simonetto.E., Lembezat.C., Arnaud.A., Raucoules.D., Closset.L., King.C. (2005) Survey of linear subsidence in an urban area using a 3D geological model and satellite differential InSAR., GEOLINE 2005 - Lyon - France - 23-25/05/2005

Simonetto.E., Raucoules D., Carnec.C. (2005) Interferometry of spatial radar images for post-mining suveillance : experiment feedback., in Après-Mine 2005 - Groupement de recherches sur l'impact et la sécurité des ouvrages souterrains - Nancy - France - 16-18/11/2005

Raucoules D., (2007) « Les techniques d'interférométrie radar pour le suivi de subsidence en environnement urbain ou minier », CNFGG – Paris – 13/03/2007

de Michele M., D. Raucoules, J. Salichon. A. Lemoine, H. Aochi, (2008) «Using InSAR for Seismotectonic Observations Over the Mw 6.3 Parkfield Earthquake (28/09/2004) », California. International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Symposium, Beijing, 3-12 juillet 2008.

Raucoules D., M. de Michele M., Aochi H., C. Carnec, (2008) «Mapping the earthquake rupture and displacement field using correlation of ALOS PALSAR amplitude images : Application to the Mw

7.9 Sichuan earthquake» , 12 May 2008. 2008 AGU Fall Meeting, 15-19 December, San Francisco

de Michele M., D. Raucoules, J. Salichon, A. Lemoine, H. Aochi, (2008) «Mapping deformation field prior to an Earthquake : InSAR Observations 1993-2004 before the Mw = 6.0 Parkfield Event ». 2008 AGU Fall Meeting, 15-19 December, San Francisco

de Michele M., D. Raucoules, J. De.Sigoyer, M. Pubellier, C. Lasserre, E. Pathier, Y. Klinger, J. Van.der.Woerd, N. Chamot.Rooke, (2010) Three dimensional surface displacement of the Sichuan earthquake (Mw 7.9, China) from Synthetic Aperture Radar., in EGU General Assembly - Vienna - Autriche -2-7/05/2010

de Michele M., D. Raucoules, F. Rolandone, P. Briole, J. Salichon, A. Lemoine, H. Aochi (2010) Spatiotemporal evolution of surface creep in the parkfield region on the San Andreas Fault (1993-2004) from Synthetic Aperture Radar., in AGU 2010 - Fall Meeting - San Francisco - USA - 13-17 December 2010

8.6 Rapports

Raucoules D., Carnec C., 1999, « Potentiel de l'interférométrie radar pour la génération des modèles numériques de terrain» , Rap. BRGM R40786

Galaup M., de Boissezon H., Carnec C., Desprats J.F., Raucoules D., 1999, « Demonstration of the potential value of ESA EO data and products end-to-end demonstrator – MEGA CITIES – Technical note 3 – test cases and their potentieprendre le CV du dossier)al to provide urban information to targeted users », ESA contract no 1-3199/97/I-HGE, ref DT/MG994573

J Desprats J.F., Delpont G., Lagos M., Raucoules D., Baghdadi N., King C., 1999, « Cartographie de la sensibilité potentielle des sols à l'érosion sur la Cordillère de la Côte (Région du Bio-Bio – Chili) – Évaluation du Potentiel des données ERS, Intégration de nouveaux paramètres morphologiques ». Rap. BRGM R40812

Carnec C., Raucoules D., 2000, « Détection et suivi des déformations de surfaces liées à la ruine des cavités minières souterraines par interférométrie SAR différentielle : application au bassin ferrifère lorrain – région de Roncourt –Jarny », Rap. BRGM RP-50148-FR

Carnec C., Raucoules D., 2000, « Étude de faisabilité : détection et suivi de déformations de surface liées à l'existence de cavités minières souterraines par interférométrie radar différentielle. Application à la région de Faulquemont, Bassin Houiller Lorrain ». Rap. BRGM, RP-50228-FR

Le Mouelic S., Raucoules D., Carnec C., Laversanne J., 2001, « RESUM : étude du site OP1». Rap. BRGM, RP 51387 FR

Raucoules D., Carnec C., Le Mouelic S., Maisons C., 2001, « RESUM :Pôle préopérationnel - site OP7». Rap. BRGM, RP 51385 FR

Raucoules D., Carnec C., Le Mouelic S., Maisons C., 2001, « RESUM :Pôle préopérationnel - site OP8». Rap. BRGM, RP 51386 FR

Raucoules D., King C ., Sureau J.F. , Arnaud A., 2001, « RESUM :Pôle préopérationnel - contraintes de confidentialité». Rap. BRGM, RP 51383 FR

Raucoules D., Carnec C., Le Mouelic S., King C., Pentel R., Laversanne J., 2002, «RESUM - Site OP5 :Interférométrie radar et confrontation avec le nivellement». Rap. BRGM/RP-51952-FR

Raucoules D., Carnec C., Cruchet M. avec la collaboration de Delacourt C., Le Mouelic S., 2003 , « Potentiel de l'interférométrie radar pour la détection et le 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.

Le Mouélic S., Raucoules D., Carnec C., Durand Ph., 2002, « Utilisation des données Radarsat pour le suivi de subsidences par interférométrie radar ». Rapport BRGM/RP-51953-FR.

Le Mouélic S., Raucoules D., Carnec C. avec la collaboration de Adragna F., 2003, «Evaluation des performances de l'algorithme de corrélation d'interférogrammes(étude réalisée dans le cadre du projet RESUM) ». Rapport BRGM/RP-51681-FR.

Le Mouélic S., Raucoules D., Carnec C. , 2003, «Interférogrammes géocodés sur les sites coopératifs : Paris et le bassin ferrifère Lorrain (étude réalisée dans le cadre du projet RESUM) ». Rapport BRGM/RP-51825-FR.

Le Mouélic S., Raucoules D., Carnec C. avec la collaboration de Bennani M., Mangeot E., Midot D., Vachette C., Romieu C., 2003, «Mesures de déformations de surface par Permanent Scaterrers sur le bassin ferrifère lorrain – analyse et confrontation aux données de terrain (étude réalisée dans le cadre du projet RESUM) ». Rapport BRGM/RP-52043-FR.

Le Mouélic S., Raucoules D., «Science Review », GMES TERRAFIRMA ESRIN/Contract no. 17059/03/I-IW

Raucoules D., Carnec C., Le Mouelic S., Hosford S., «Methods Compendium », GMES TERRAFIRMA ESRIN/Contract no. 17059/03/I-IW

Simonetto E. , Raucoules D., 2005, « Marché 04/CNES/1811/00 - DCT094 - Déroulement de franges interférométriques à partir d'un MNT de référence - Lot1 » Rapport BRGM/RP-53819-FR

Raucoules D., Simonetto E. , 2005, « Marché 04/CNES/1811/00 - DCT094 - Déroulement de franges interférométriques à partir d'un MNT de référence – Lot2 » Rapport BRGM/RP-53920-FR

Bourgine B., Raucoules D. and Dommanget J. M., 2005, , « PSIC4 : Characterisation of the deformation field », rapport BRGM/RP-54180-FR

Raucoules D., Bourgine B., de Michele M., Le Cozanet G., Closset L., Bremmer C.,Veldkamp,H.,Tragheim D., Bateson L., Crosetto M., Agudo M., 2007, « Persistent Scatterers Interferometry ; Independent Validation and Intercomparison of Results – Final Report », BRGM/RP-55649-FR (http ://earth.esa.int/psic4/Documents.html)

Le Cozannet G., Raucoules D., 2007, « Interférométrie radar pour la surveillance d'injection de gaz sur le site de Chémery. Rapport final. » BRGM/RP-55726-FR

Plat E., Fumagalli A., Novali F., Iannicela I., Vincent M., Raucoules D., Carnec C., 2009, « Projet de démonstration : suivi des déformations induites par le phénomène de retrait gonflement des argiles à partir d'interférométrie radar PSI. Site de Nogent-sur-Marne. Rapport final ». BRGM/RP-56832-FR

9 Sélection d'Articles

Cette section a été supprimée du document accessible en ligne