

Avancées des technologies spatiales radar appliquées à la détection des déformations de surface d'origine minière

C. CARNEC
S. LE MOUELIC
D. RAUCOULES

BRGM
Service Aménagement
et Risques naturels
117, avenue de Luminy
BP167
13276 Marseille Cedex 09
c.carnec@brgm.fr

C. COLESANTI

Dipartimento di Elettronica
e Informazione
Politecnico di Milano
III piano, Via Ponzio, 34/5
20133 Milano, Italia
colesant@elet.polimi.it
Tele-Rilevamento Europa
(TRE Srl)
Via V. Colonna, 7
20149 Milano, Italia
info@treuropa.com

C. KING

BRGM
Service Aménagement
et Risques naturels
3, avenue Claude-Guillemin
45060 Orléans Cedex
c.king@brgm.fr

Résumé

Dans le domaine des techniques spatiales, des progrès considérables sur la connaissance des déformations topométriques des terrains ont vu le jour grâce aux recherches réalisées au cours de ces dix dernières années en interférométrie différentielle de radar satellitaire (techniques dites DInSAR). Les résultats intéressent de plus en plus les industriels et les services de l'État en charge de missions similaires en matière de surveillance de sites instables. Si la technique offre une précision exceptionnelle (inférieure au centimètre en vertical), elle n'en reste pas moins soumise à des contraintes sévères d'utilisation (conservation des propriétés de surface, répétitivité orbitale, artefacts atmosphériques...). Des méthodes nouvelles de traitement des données dites de points permanents sont ainsi développées et permettent notamment de s'affranchir d'une partie de ces limitations.

Mots-clés : télétection, subsidence, interférométrie radar, réflecteurs permanents.

Applications of radar spatial technologies to the detection of surface deformations induced by mining activities

Abstract

In the field of space technologies, the scientific community has made significant steps forward the last ten years concerning the knowledge of ground deformations using satellite radar interferometry (DInSAR). These results concern more and more industry and civil services both in charge of monitoring ground instabilities. Although this technique offers a few millimeters accuracy, it cannot always be exploited since it is hampered by some important limitations (surface properties stability, orbital cycle, atmospheric artefacts...). New methodologies such as the so-called « permanent scatterers » technique are under assessment and should overcome part of these limitations.

Key words : remote sensing, subsidence, radar interferometry, permanent scatterers.

Introduction

Le principe de la technique d'interférométrie radar repose sur la combinaison fine de signaux radar provenant de deux images, et permet soit de mesurer le relief avec précision, soit de détecter des mouvements millimétriques du sol (Gens et Van Genderen, 1996; Massonnet et Feigl, 1998). Cette technique d'observation satellitaire récente a été expérimentée dans de nombreux domaines d'application, dont la majorité a trait aux thèmes de déformations sismiques et volcaniques (Massonnet *et al.*, 1993; Meyer *et al.*, 1996; Peltzer *et al.*, 1996), gravitaires (glissements de terrain, subsidence) (Fruneau *et al.*, 1996; Carnec et Delacourt, 2000), glaciologiques (Goldstein *et al.*, 1993), voire quelquefois hydrauliques (pompage ou remontée de nappes) (Galloway *et al.*, 1998; Carnec et Fabriol, 1999). Les informations obtenues sur l'instabilité des sols (présence ou absence de mouvement, amplitude des déformations, évolution dynamique), offrent une vision spatialisée des phénomènes.

Malgré ces performances, ces travaux sont encore principalement du domaine de la démonstration du fait de limitations techniques ou instrumentales. Dans le cadre des réseaux technologiques « Terre et Espace » et « Génie civil et urbain » mis en place par le ministère de la Recherche et de la Technologie, la communauté scientifique s'est organisée et vise à renforcer les procédures de transfert de ces récents résultats des techniques spatiales vers des utilisateurs opérationnels. Le projet porte sur le thème de la détection et surveillance des déformations du sol en environnement urbain ou minier.

Après avoir très brièvement rappelé le principe de l'interférométrie radar et présenté le projet RESUM (Réseau de suivi de subsidence urbaine et minière), nous exposerons des exemples d'application aux déformations de surface d'origine minière. Nous présenterons également des résultats obtenus par une technique issue de l'interférométrie, appelée *Permanent Scatterers* (réflecteurs permanents), susceptibles de pallier en partie certaines limitations de la technique classique.

Comment ça marche ?

2.1

Principe de l'interférométrie radar

Le principe de la technique d'interférométrie consiste à combiner la phase de deux images radar prises par le satellite à des instants différents. Le terme de phase propre, variable aléatoire dépendant de l'orientation des rétrodiffuseurs au sein d'un même pixel, s'élimine par différence des signaux multi-temporels, permettant ainsi de mesurer directement la différence de distance entre le satellite et le sol entre les deux passages du satellite (Fig. 1).

La différence de phase $\Delta\phi$, ou *interférogramme*, permet de mesurer le relief avec précision, ou, si le relief est connu, de mesurer par analyse multi-temporelle des déformations de surface avec une résolution latérale (pixel) d'environ 20 m pour les satellites ERS et une précision verticale centimétrique, voire millimétrique. Une *frange* (rotation de phase de 2π radians qui se traduit sur l'image par un cycle complet de couleur) correspond à une déformation d'une demi-longueur d'onde en direction du satellite, soit 28 mm pour les satellites ERS. Les performances sont d'autant meilleures que les caractéristiques radiométriques et géométriques de la surface sont stables (assurant la conservation du terme Φ_{propre}) entre les deux prises de vue. De ce fait, l'environnement urbain (ou désertique) offre un contexte particulièrement favorable. L'archive des données des satellites européens ERS remonte jusqu'en 1991, les données étant régulièrement acquises selon un cycle de 35 jours.

2.2

Les limites

Les principales contraintes de mise en œuvre de la technique d'interférométrie radar sont les suivantes :

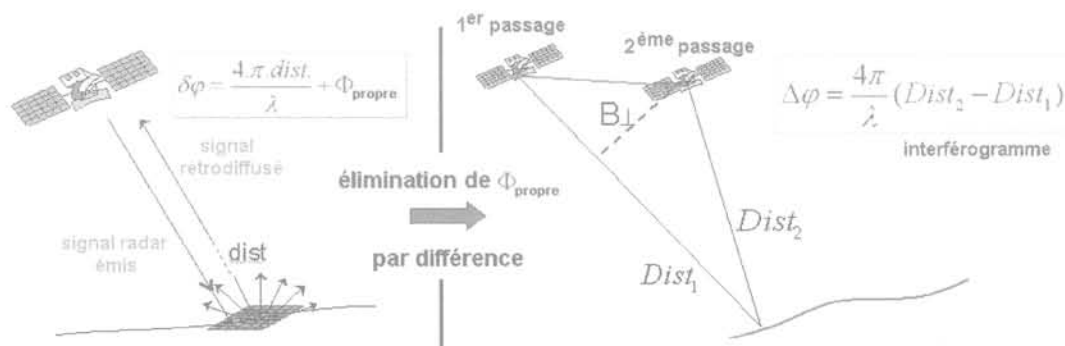


FIG. 1 Principe de l'interférométrie radar.

- *Variabilité des surfaces naturelles ou perte de cohérence*

Si les propriétés intrinsèques des cibles ont été modifiées entre les dates de prises de vue (ex. : pratique agricole, labour), l'indicateur de fiabilité des mesures de phase encore appelée cohérence sera faible. Ceci se traduit par l'apparition d'un bruit de phase susceptible de rendre inexploitable des surfaces importantes de l'interférogramme. Pour limiter le niveau de bruit, il faut d'une part sélectionner des couples ayant des orbites très proches pour que les cibles soient observées dans des conditions géométriques de visée semblables (longueur de base perpendiculaire inférieure à 100 m). D'autre part, il est souhaitable de réduire l'intervalle de temps entre les dates d'acquisition et ce d'autant plus que la zone d'intérêt est caractérisée par un couvert végétal important ou rapidement évolutif (ex. : zones agricoles, forêts). En revanche, les zones fortement urbanisées se prêtent mieux à l'utilisation de cette technique de part la présence de réflecteurs anthropiques permanents (ex. : bâti urbain) et permettent l'étude sur de longues durées entre les prises de vue. Enfin, dans la mesure du possible, on veillera à sélectionner des images à des saisons identiques soumises à des conditions climatiques équivalentes. Finalement, on procède à un filtrage adaptatif qui permet de réduire sensiblement le niveau de bruit.

- *Artefacts atmosphériques*

Les fluctuations de la couche atmosphérique traversée par l'onde radar entre les deux prises de vue induisent des variations de phase susceptibles d'être confondues avec des signatures de mouvement. L'artefact peut atteindre localement près d'une frange. La méthode permettant d'identifier ce biais de phase consiste à étudier une série d'interférogrammes indépendants. Le biais atmosphérique étant différent d'une image à l'autre, la persistance d'une signature de mouvement sur plusieurs interférogrammes confirme l'existence de ce mouvement. De plus, signalons l'effet de fluctuations atmosphériques de plus faible ampleur susceptibles de réduire la précision de la mesure à environ un tiers de frange soit environ 1 cm pour les mouvements verticaux. Cette valeur reste toutefois très dépendante des conditions météorologiques et de l'étendue de la zone étudiée (dépendance d'échelle).

- *Seuil sur le gradient de phase*

Du fait de la définition *modulo* 2π de la mesure de phase, il est impossible d'estimer un gradient de phase (et donc un mouvement différentiel entre deux pixels adjacents) supérieur à une demie frange par pixel soit environ 1,5 cm/20 m pour les mouvements verticaux.

3

RESUM : l'interférométrie radar au service des utilisateurs

Les résultats obtenus par la communauté scientifique internationale au cours de ces dix dernières années en interférométrie radar satellitaire (INSAR) intéressent de plus en plus les industriels et les services de l'État en charge de missions similaires en matière de surveillance de sites instables. Que ce soit en contexte minier ou urbain, que les phénomènes soient liés à l'origine à des cavités naturelles ou artificielles, les pré-

occupations principales sont communes. Il s'agit d'apporter des garanties quant à la protection des personnes et des biens sus-jacents.

Le projet RESUM⁽¹⁾ vise à démontrer et à synthétiser comment ces techniques d'observation spatiales élargissent les possibilités de métrologie spécifiques au phénomène de subsidence et apportent des outils de diagnostic dans le cas des évolutions cinématiques lentes. Le partenariat constitué rassemble des spécialistes privés ou publics de la surveillance de sites instables, des spécialistes privés ou publics du traitement des données interférométriques, et des industriels en charge d'exploitations souterraines.

Ce partenariat doit favoriser une adéquation rapide entre l'offre issue des techniques spatiales et les besoins actuels des responsables de sites instables. Le projet vise aussi à définir la viabilité commerciale d'une cellule de production qui devra assurer la mise à disposition de données élaborées mais surtout un réel service de diagnostic qui complète les dispositifs métrologiques de surveillance conventionnels et apporte de nouveaux outils d'aide à des politiques de prévention.

4

Exemples d'application à la détection de déformations liée à des exploitations minières souterraines

La technique d'interférométrie radar différentielle a été expérimentée avec succès sur plusieurs bassins houillers français. Concernant les sites en cours d'exploitation, l'imagerie spatiale permet d'observer la mise en place de « cuvettes » de subsidence, d'estimer l'extension spatiale et l'amplitude de la déformation. Ainsi, sur le secteur de Gardanne (Bouches-du-Rhône), l'étude réalisée en collaboration avec les Houillères du bassin du Centre-Midi a permis le suivi des déformations sur plusieurs années et a révélé la migration de ce phénomène en rapport avec l'avancée du front d'exploitation (Carnec et Delacourt, 2000). D'autres études réalisées en Moselle à la demande des Houillères du bassin de Lorraine et de l'INERIS se sont révélées inopérantes. Le contexte environnemental peu favorable de la zone – i.e. activité agricole, variation de l'humidité de surface, faible urbanisation – au regard des contraintes et limitations liées à la mise en œuvre de la technique, n'a pas permis de circonscrire d'éventuels mouvements de surface pour la période d'observation (1993-1999). En revanche, l'extension de la zone d'étude aux secteurs plus urbanisés entre Merlebach et Stiring Wendel a mis en évidence des affaissements pouvant atteindre localement 15 cm/an sur la même période d'observation (Fig. 2). Un ralentissement très net des affaissements est cependant observable dès 1996.

Au-delà de la période d'exploitation industrielle, le suivi à l'échelle d'un bassin minier peut permettre de déceler et quantifier des mouvements résiduels d'origine minière. Ainsi, sur le secteur de Montceau-les-Mines (Saône-et-Loire), l'étude radar a permis de détecter de faibles déformations de surface et de suivre leur évolution spatio-temporelle (Carnec *et al.*, 2001).

⁽¹⁾ <http://resum.brgm.fr>

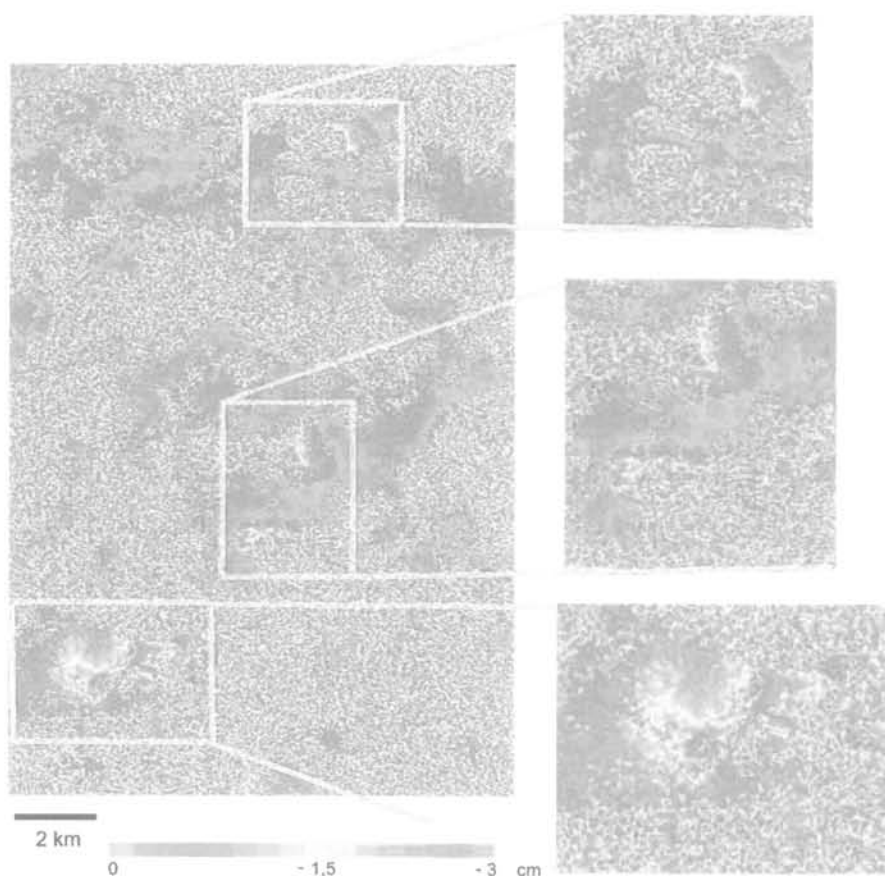


FIG. 2 Bassin houiller lorrain. Interférogramme réalisé à partir des orbites 10001-11003 (14/06/1993-23/08/1993). Un cycle de couleur correspond à une déformation en distance de 28 mm, i.e. 30 mm de déplacement vertical. Sur cette zone d'étude, cinq secteurs présentent des déformations de surface (entourés en jaune) dont les plus importantes atteignent 6 cm sur cette période de 70 jours.

Une légère et ample remontée des terrains entre 1995 et 1998 liée à la phase terminale d'ennoyage des travaux miniers souterrains a été mesurée et confirme les campagnes de nivellement menées *in situ* (Fig. 3). La difficulté principale rencontrée lors de cette étude est liée à la perte de cohérence occasionnée par des modifications de surface secondaires (végétation, humidité...) au-delà du secteur urbanisé. Ces effets sont à l'origine des difficultés d'observation sur des surfaces boisées.

5

Développement en cours : la technique dite des réflecteurs permanents

L'interférométrie différentielle classique permet de détecter des déformations de la surface du sol avec une précision inférieure au centimètre. Néanmoins, la mise en œuvre de cette technique souffre de limitations

sévères liées principalement à l'évolution des sols (végétation, humidité de surface) et à la présence d'artefacts atmosphériques qui peuvent compromettre l'interprétation de combinaisons radar multi-temporelles.

Pour pallier en partie ces limitations, la technique des réflecteurs permanents (*Permanents Scatterers* ou *PS*) issue des techniques classiques d'interférométrie radar, tire parti de la stabilité radiométrique et géométrique de cibles ponctuelles (typiquement des ouvrages de type génie civil ou de la roche nue) naturellement présentes sur l'image (Ferretti *et al.*, 2000, 2001). A partir d'une étude statistique réalisée sur une série d'images (minimum 20 images), il est possible de découpler les effets atmosphériques des effets de déformation du sol, permettant ainsi de remonter au profil de déformation de chaque réflecteur permanent sur la période considérée (Colesanti *et al.*, in press).

Une étude conduite sur le bassin ferrifère lorrain a été réalisée en collaboration avec la société italienne TRE (Tele-Rilevamento Europa) à partir d'une série temporelle de 57 images couvrant la période 1995-2000.

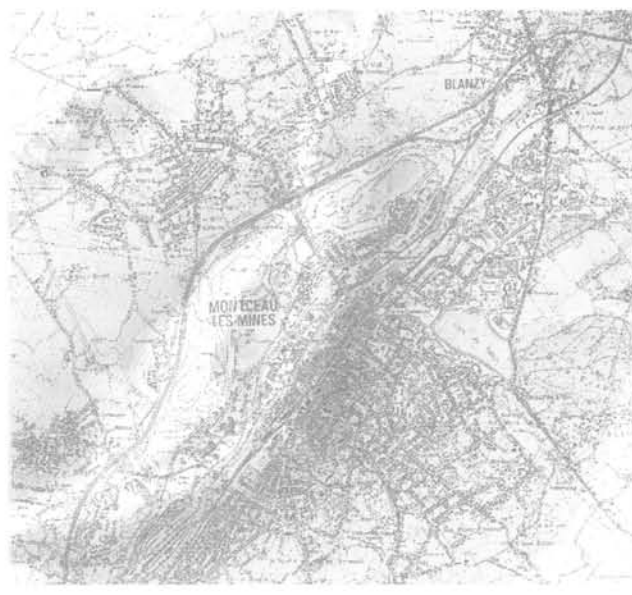


FIG. 3 Suivi des mouvements de surrection par interférométrie radar sur Montceau-les-Mines. La vitesse maximale de surrection mesurée est d'environ 2,5 cm/an. Après 1998, le phénomène observé disparaît, ce que confirment les mesures de nivellement *in situ*.

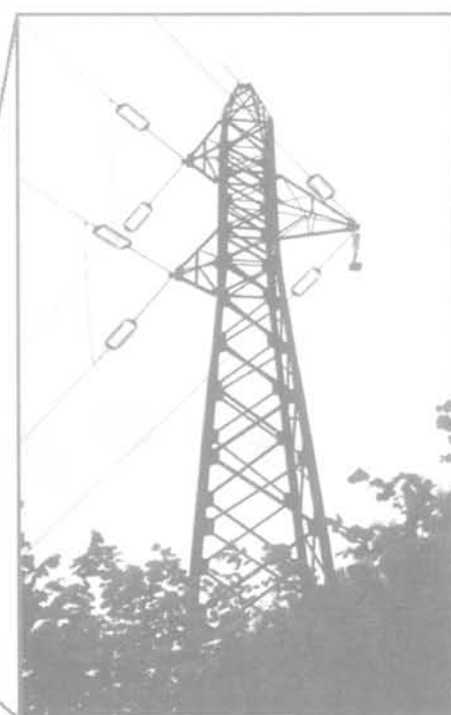
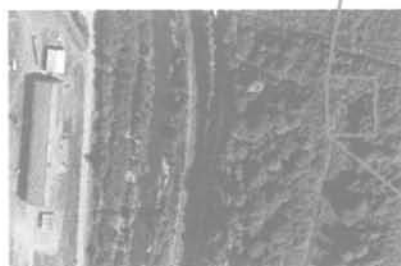
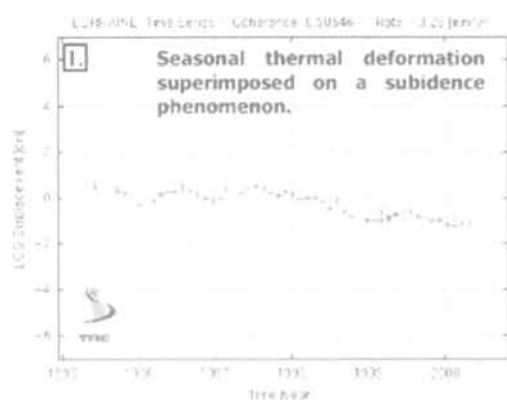


FIG. 4 La série temporelle atypique de ce réflecteur permanent s'explique par la structure entièrement métallique du réflecteur (pylône). On est ici en présence d'un phénomène de dilatation thermique saisonnière détecté par le satellite superposé à un affaissement lent probablement lié à l'instabilité de la pente.

La précision sur la localisation spatiale des points PS est estimée à 0,5 pixel radar soit environ 10 m. Cette précision est suffisante pour identifier des bâtiments individuels lorsqu'ils sont isolés.

A titre d'exemple, la figure 4 indique des variations saisonnières d'une amplitude de ± 3 mm. La série temporelle correspond en fait aux dilatations thermiques cycliques de la structure métallique d'un pylône identifié ici sur les images radar. L'affaissement progressif de 1 cm (détecté par interférométrie, mais pas identifié sur le terrain du fait de sa faible valeur) est probablement dû à la forte pente du terrain sur lequel le pylône a été construit.

L'étude radar réalisée à partir de la technique des *réflecteurs permanents* a permis de mettre en évidence les principaux événements ayant été recensés pendant la période 1995-2000 sur le bassin ferrifère lorrain. La comparaison avec les données historiques montre que cette technique d'observation satellitaire fournit des informations très pertinentes sur le lieu et la date des événements (Fig. 5). En

revanche, l'incertitude sur la phase mesurée modulo 2π , qui se traduit par une incertitude sur l'amplitude des déformations mesurée modulo 3 cm, empêche l'estimation quantitative des affaissements à dynamique rapide (valeur maximale du taux de déformation = 1,5 cm au cours d'un cycle orbital de 35 jours) (Fig. 6). L'interprétation des séries temporelles est donc d'autant plus aisée que les affaissements sont lents et de faibles amplitudes, ou que la densité des PS est suffisante pour retrouver la géométrie des affaissements.

L'étude a révélé, dans quelques cas, la présence de signes précurseurs à des affaissements importants et des mouvements significatifs 10 mois avant l'affaissement principal. A l'inverse, dans des contextes géologique et minier semblables, aucun signe précurseur n'a pu être observé avant d'autres affaissements sur des secteurs pourtant proches. Cette remarque ne fait que souligner la complexité des mécanismes à l'origine des mouvements de terrain.



FIG. 5 Sur ce secteur, plusieurs séries temporelles indiquent clairement un affaissement d'environ 2 cm/an depuis 1998 (exemple des points 36 et 38). La stabilité du point 35 est confirmée par des mesures de nivellement sur la période 1997-2000.

Conclusion

L'intégration des données spatiales dans un système d'information géographique permet un examen plus aisé de certains secteurs, une analyse plus « ciblée » ou une représentation plus adaptée à des objectifs particuliers (i.e. aménagement). L'évaluation du couplage des résultats de l'interférométrie différentielle avec les résultats d'auscultation (mesures de nivellement et cartographie des aléas) permettrait d'une part de valider les observations satellitaires et, d'autre part, d'analyser l'évolution cinématique des affaissements (corrélation avec les fronts d'exploitation, nature des terrains sus-jacents...).

Il est intéressant d'insister sur la complémentarité et la différence d'approche que constitue l'interférométrie par rapport aux méthodes traditionnelles d'étude et de surveillance des mouvements de terrain. La technique d'imagerie satellitaire explorée dans ce travail offre l'intérêt tout particulier d'une perception synoptique des mouvements effectifs (une seule image radar couvre une superficie de 100 x 100 km). Elle permet, de plus, d'étudier des déplacements passés (dans la limite de l'archive radar disponible) et donc de mieux en comprendre l'origine. Pour autant, elle ne peut en aucun cas remplacer l'information ponctuelle des réseaux de surveillance de type GPS qui fournissent des mesures vectorielles dont les composantes horizontales sont plus précises que la verticale, en contraste avec les interférogrammes scalaires qui sont, avec les satellites de type ERS, essentiellement sensibles aux mouvements verticaux.

La méthode des réflecteurs permanents offre l'opportunité d'une étude rétrospective des déformations, ce qui peut permettre de mieux appréhender les mécanismes mis en jeu. Elle présente également un intérêt majeur pour optimiser les campagnes de mesure régulières sur le terrain effectuées par des méthodes classiques de type GPS ou nivellement (détection au préalable des zones à surveiller). Le suivi régulier par mesure radar permet en outre d'étudier l'évolution des phénomènes dans le temps (avant, pendant et après), alors que pour le nivellement, les mesures n'ont souvent été effectuées qu'après les

affaissements principaux. Elle s'avère particulièrement adaptée aux mouvements continus de faible vitesse. En revanche, les affaissements à dynamique rapide ne sont pas quantifiables par cette méthode.

L'interférométrie différentielle pourrait être envisagée comme un outil complémentaire au dispositif in situ de suivi des affaissements/soulèvements, susceptible d'offrir une perception globale des déformations sur les sites miniers les plus sensibles et nécessitant un suivi précis et à long terme. Elle devrait permettre l'approche d'une méthode de prévision des déformations de surface dont l'objectif est l'identification de critères d'alerte.

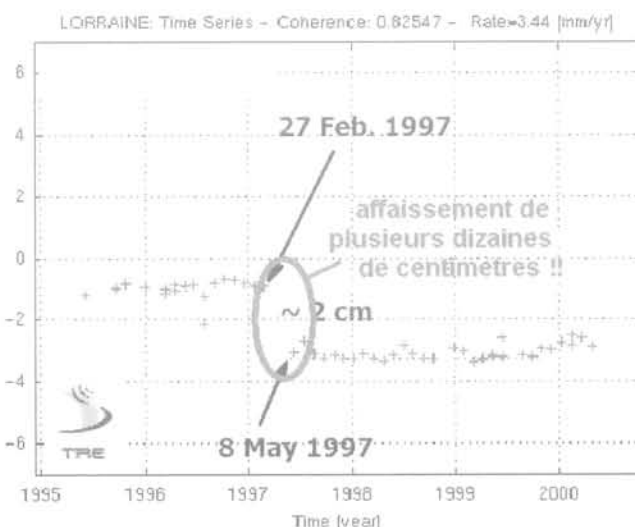


FIG. 6 Les points entourés en rouge correspondent à un affaissement de plusieurs dizaines de centimètres d'après le nivellement. La localisation et la datation du phénomène sont pertinentes. En revanche, l'ambiguïté sur la mesure radar de phase masque l'ampleur de cette déformation. Le décrochement détecté entre le 27 février 1997 et le 8 mai 1997 correspond en réalité aux prémices d'un affaissement d'amplitude maximum 1,20 m ayant eu lieu pour la majeure partie entre le 15 et le 23 mai 1997.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent adresser leurs remerciements à M.P. Cattaert, les équipes GEODERIS et GISOS, TRE et Dr. A. Ferretti pour leur collaboration.

Bibliographie

- Carnec C., Fabriol H. – Monitoring and modeling land subsidence at the Cerro-Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, using SAR interferometry, *Geophysical Research Letters*, vol. 26, 9, 1999, p. 1211-1214.
- Carnec C., Delacourt C. – Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, Gardanne, France, *Journal of Applied Geophysics*, vol. 43, 1, 2000, p. 43-54.
- Carnec C., King C., Raucoules D., Guise Y., Paquette Y. – Suivi de mouvements résiduels sur sites miniers par interférométrie radar : perspectives et applications. *SIM Environnement*, n° 14, 2001, p. 21-23.
- Colesanti C., Ferretti A., Novali F., Prati C., Rocca F. – SAR Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, accepted for publication.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. – Non-linear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, n° 5, 2000.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. – Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, n° 1, 2001.
- Fruneau B., Achache J., Delacourt C. – Observation and modeling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, vol. 265, 1996, p. 181-190.

- Galloway D.L., Hudnut K.W., Ingebritsen S.E., Phillips S.P., Peltzer G., Rogez F., Rosen P.A. – Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resour. Res.*, 34, 1998, p. 2573-2585.
- Gens R., Van Genderen J.L. – SAR interferometry-issues, techniques, applications. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 17, 10, 1996, p. 1803-1835.
- Goldstein R.M., Engelhardt H., Kamb B., Frolich R.M. – Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an antarctic ice stream. *Science*, 262, 1993, p. 1525-1534.
- Massonnet D., Feigl K. – Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, vol. 36, 4, 1998, p. 441-500.
- Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., Rabaute T. – The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, vol. 364, 1993, p. 138-142.
- Massonnet D., Feigl K. – Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, vol. 36, 1998, p. 441-500.
- Meyer B., Armijo R., Massonnet D., Chabalier (de) J.B., Delacourt C., Ruegg J.C., Achache J., Briole P., Papanastassiou D. – The 1995 Grevena (Northern Greece) earthquake: fault model constrained with tectonic observations and SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, vol. 23, 19, 1996, p. 2677-2680.
- Peltzer G., Rosen P., Rogez F., Hudnut K. – 1996, Postseismic rebound in fault stepovers caused by pore fluid flow. *Science*, 273, 1996, p. 1202-1204.