

26. Exploitation d'archives de données satellitaires de radar à synthèse d'ouverture (SAR) pour la cartographie et la surveillance de glissements de terrain au niveau régional et à l'échelle locale*

par

Alessandro FERRETTI¹, Andrea TAMBURINI¹, Marco BIANCHI¹,
Massimo BROCCOLATO² & Davide Carlo GUIDO MARTELLI³

Résumé.—FERRETTI A., TAMBURINI A., BIANCHI M., BROCCOLATO M. & GUIDO MARTELLI D.C., 2013. Exploitation d'archives de données satellitaires de radar à synthèse d'ouverture (SAR) pour la cartographie et la surveillance de glissements de terrain au niveau régional et à l'échelle locale. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 321-329.

La méthode des réflecteurs permanents en interférométrie radar différentielle (PSInSARTM) est aujourd'hui l'une des technologies satellitaires les plus avancées pour la surveillance des déformations de la surface terrestre, puisqu'elle est capable de surmonter la plupart des limites de l'interférométrie radar différentielle classique. Cette méthode exploite de longues séries temporelles de données radar satellitaires acquises sur une même région en différents instants, permettant ainsi d'identifier des «cibles radar naturelles» (appelées réflecteurs permanents ou PS) pour lesquelles des données de déplacement très précises peuvent être déduites. L'approche PSInSARTM a été mise au point par l'Ecole Polytechnique de Milan (POLIMI) à la fin des années quatre-vingt-dix. Depuis lors, le traitement de milliers d'images SAR acquises par les satellites ERS-1/2, ENVISAT et RADARSAT a montré comment des données radar multi-temporelles peuvent être exploitées pour le suivi de la déformation de la surface terrestre, intégrant avec succès des mesures obtenues par GPS et station totale, et permettant l'étude de zones à l'échelle régionale. Des exemples d'application de cette technologie au niveau régional et à l'échelle locale sont présentés dans cet article.

Mots clés: imagerie radar, réflecteur permanent, PSInSARTM, inventaire des glissements de terrain, monitoring.

*Article déjà présenté lors du premier World Landslide Forum de Tokyo en 2009.

¹TRE - Télé-Rilevamento Europa, Milan, Italie.

²Regione Autonoma Valle d'Aoste, Italie.

³Imageo Srl, Torino, Italie.

E-mail: alessandro.ferretti@treuropa.com

Abstract.—FERRETTI A., TAMBURINI A., BIANCHI M., BROCCOLATO M. & GUIDO MARTELLI D.C., 2013. Exploitation of historical satellite SAR archives for mapping and monitoring landslides at regional and local scale. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 321-329.

Permanent Scatterer SAR Interferometry (PSInSARTM) is today one of the most advanced technologies for surface deformation monitoring capable of overcoming most of the limitations of conventional differential radar interferometry. It exploits long temporal series of satellite radar data, acquired over the same area of interest at different times, to identify “natural radar targets” (i.e. the so-called Permanent Scatterers or PS) where very precise displacement information can be retrieved. This approach has been developed by Politecnico di Milano (POLIMI) in the late nineties. Since then, the processing of thousands of SAR scenes acquired by ERS-1/2, ENVISAT and RADARSAT has demonstrated how multi-temporal SAR data-sets can be successfully exploited for surface deformation monitoring, integrating GPS and topographic total station measurements and allowing the analysis of large areas of interest. Examples of application of this technology at regional and local scale will be presented in this paper.

Keywords: SAR, Permanent Scatterers, landslide inventory, monitoring.

INTRODUCTION

Grâce à la disponibilité de plus d’une décennie d’archives de données satellitaires, la méthode des réflecteurs permanents en interférométrie radar différentielle (PSInSARTM) représente aujourd’hui l’une des techniques les plus à même de mesurer les déplacements de surface terrestre (COLESANTI *et al.* 2003, DIXON *et al.* 2006, FERRETTI *et al.* 2000, FERRETTI *et al.* 2001, HILLEY *et al.* 2004, MASSONET *et al.* 1993, MASSONET *et al.* 1998). La cartographie des glissements de terrain à l’échelle régionale est traditionnellement basée sur une analyse géomorphologique combinant l’interprétation de photographies aériennes et de relevés de terrain. Cependant, lorsque le taux de déplacement est très faible (de l’ordre du millimètre au centimètre par an), l’évaluation de l’activité d’un glissement de terrain est généralement difficile, voire impossible sans l’aide de données de déplacement acquises sur le long terme. C’est par exemple le cas de Déformations Gravitaires Profondes de Versants (DGPV), caractérisées par des déplacements de surface allant de quelques millimètres à plusieurs dizaines de millimètres par an sur une grande étendue.

Grâce à sa capacité à détecter les petits déplacements sur de longues périodes et de grandes surfaces, le PSInSARTM peut être considéré comme complémentaire aux études géologiques et géomorphologiques classiques pour réaliser un inventaire des glissements à l’échelle régionale. Au cours des dernières années, plusieurs régions italiennes ont été étudiées à l’aide de cette méthode afin de détecter et de suivre les phénomènes d’instabilité de pentes. Une des dernières applications de la méthode PSInSARTM a été réalisée à fin 2007 sur l’ensemble de la région de la Vallée d’Aoste (nord-ouest de l’Italie). Le but de l’étude était de compléter l’inventaire des glissements de terrain effectués dans le cadre d’un projet d’inventaire des glissements de terrain italiens (projet IFFI), financé en partie par l’APAT (Agence pour la protection de l’Environnement et pour les Services Techniques). L’étude a porté sur une période d’analyse d’environ dix ans, soit de mi-1992 à début 2001. Etant donné que de nombreuses zones instables de la région ont été réactivés par l’événement météorologique intense ayant touché le nord-ouest de l’Italie en octobre 2000, des données de déplacement fournies des réseaux de surveillance traditionnels installés au sol dès début 2001 ont pu être comparées avec le déplacement mesuré par PSInSARTM.

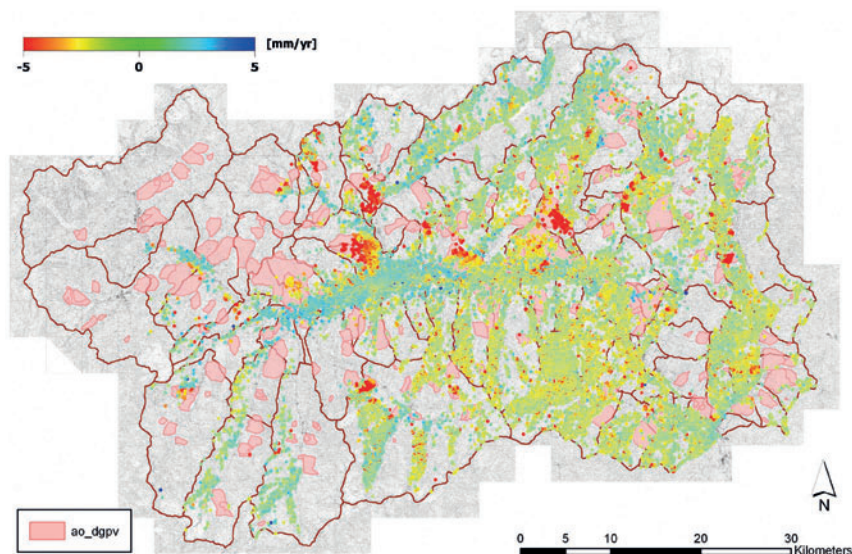


Figure 1.—Carte des vitesses et de la répartition des PS (orbite montante) dans la région du val d'Aoste (nord-ouest de l'Italie). Carte de base: périmètres de DGPV du projet IFFI (Inventaire des glissements de terrain italiens).

PS distribution and velocity map (ascending geometry) over the Valle d'Aosta Region (NW Italy). Base map: DGSD perimeters from IFFI Project (Italian Landslide Inventory).

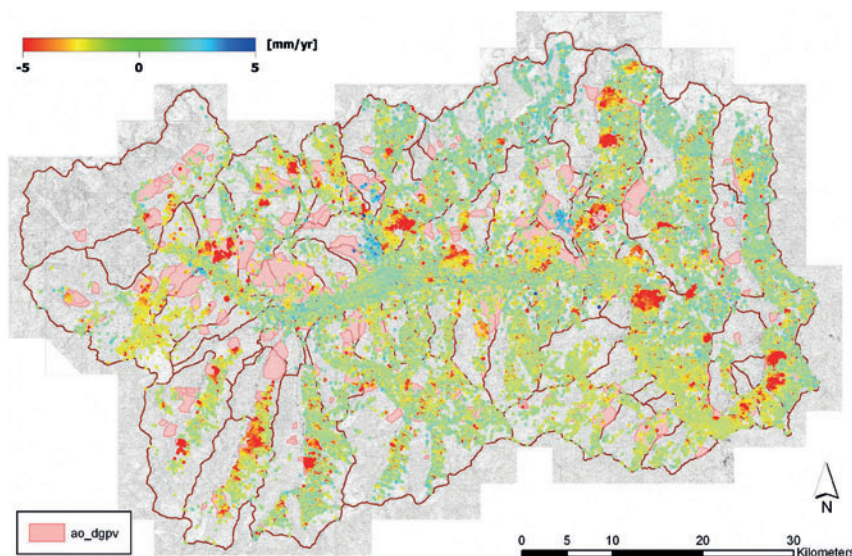


Figure 2.—Carte des vitesses et de la répartition des PS (orbite descendante) dans la région du val d'Aoste (nord-ouest de l'Italie). Carte de base: périmètres de DGPV du projet IFFI (Inventaire des glissements de terrain italiens).

PS distribution and velocity map (descending geometry) over the Valle d'Aosta Region (NW Italy). Base map: DGSD perimeters from IFFI Project (Italian Landslide Inventory).

avant l'événement. Cela a permis de mieux comprendre les effets de la réactivation sur le comportement des glissements de terrain majeurs identifiés dans la zone d'étude. Après la présentation des résultats obtenus à l'échelle régionale, un exemple de réactivation d'un de ces glissements sera présenté dans cet article.

APPLICATION DE LA TECHNIQUE PSInSARTM À L'ÉCHELLE RÉGIONALE: EXEMPLE DU VAL D'AOSTE (NORD-OUEST DE L'ITALIE)

Plus de 400 images SAR acquises entre mai 1992 et janvier 2001 par les satellites ERS-1 et ERS-2 en orbites montantes (du Sud vers le Nord) et descendantes (inversement) ont été traitées. Environ 370'000 PS dans les géométries ascendante (figure 1) et descendante (figure 2) ont été identifiés au sein d'une région d'environ 3200 km². Les déplacements mesurés sont une projection des déplacements réels (en 3 dimensions) le long de la ligne de visée (LOS – Line Of Sight) du faisceau radar (une dimension). L'existence de données PSInSARTM dans les deux orbites ascendante et descendante (1) améliore la couverture de la zone d'étude et (2) permet l'estimation des champs de déplacement verticaux et horizontaux est-ouest. Un exemple est donné à la figure 3. Les résultats de l'analyse PSInSARTM ont été comparés avec ceux de l'inventaire des glissements de terrain italiens (projet IFFI) visant:

- à l'identification et à la cartographie des glissements de terrain sur l'ensemble du territoire italien, sur la base de critères standardisés;
- à la construction d'un système d'informations géographiques national des glissements de terrain;
- à fournir un outil pour l'évaluation des dangers et des risques et pour l'aménagement du territoire.

Le projet IFFI a été coordonné par le service géologique italien – département de la protection des terres et des géoressources (ISPRA, anciennement APAT), qui en a développé les lignes directrices, vérifié la conformité des données, et construit une base de donnée géographique nationale et un Web-SIG. Depuis 2005, les résultats du projet IFFI sont disponibles sur internet.

L'intégration des résultats des études géomorphologiques et géologiques classiques avec les résultats de la méthode PSInSARTM sont actuellement en cours et amélioreront certainement les résultats de l'inventaire des glissements de terrain, en termes d'évaluation de l'étendue spatiale des glissements de terrain, de la détection des phénomènes non cartographiés et de l'évaluation de l'activité des phénomènes identifiés.

APPLICATION DE LA TECHNIQUE PSInSARTM À L'ÉCHELLE LOCALE: LA LAVE TORRENTIELLE DE BOSMATTO (VAL D'AOSTE, NORD-OUEST DE L'ITALIE)

En octobre 2000, un événement météorologique intense a touché une large zone du nord-ouest de l'Italie, causant inondations et glissements de terrain (figure 4). Dans la nuit du 15 octobre, une succession de laves torrentielles se sont propagées dans le torrent de Letze, dévastant la région du village de Bosmatto, situé sur le cône de déjection, à la confluence avec le torrent Lys, dans la commune de Gressoney-Saint-Jean (Province d'Aoste). Les laves

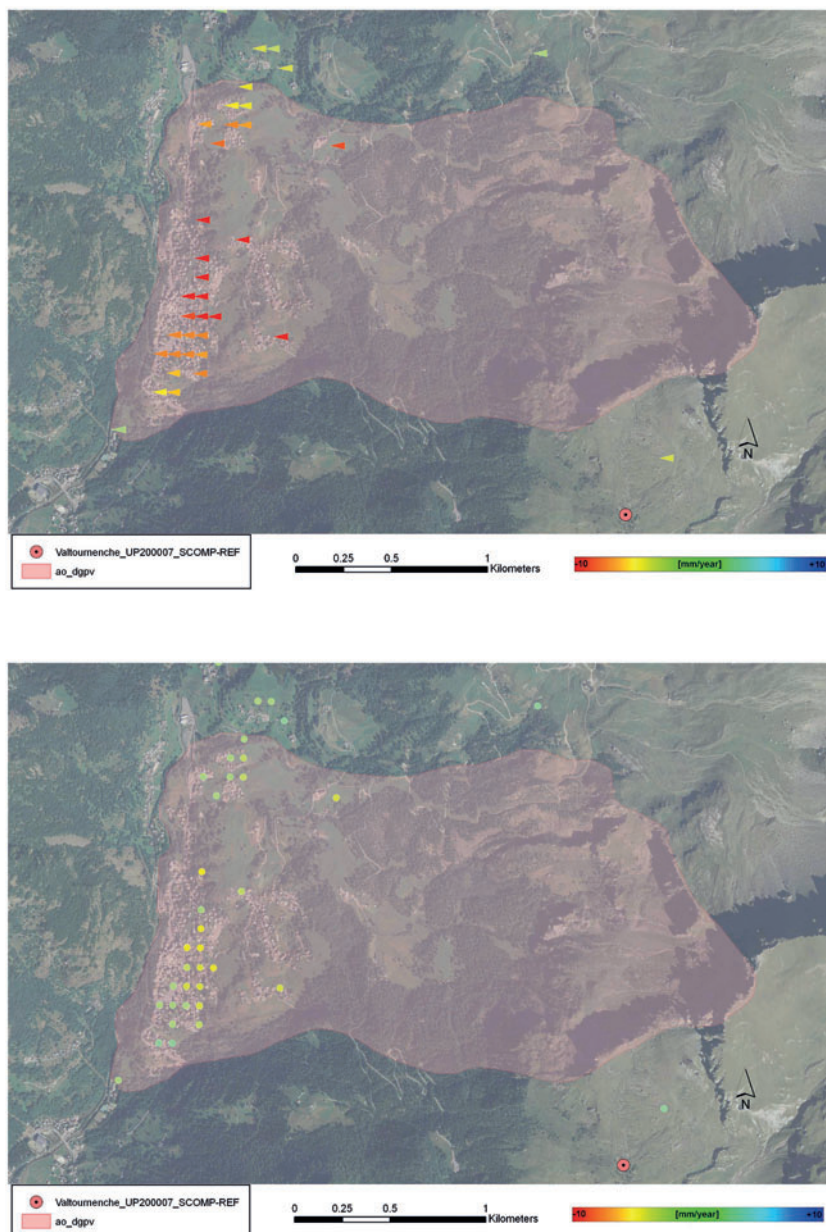


Figure 3.—Vitesse annuelle moyenne de déplacement horizontal est-ouest (en haut) et vertical (en bas) pour un cas d'étude historique obtenue en combinant les LOS (Line of Sight) ascendantes et descendantes des déplacements PS.

E-W horizontal (upper) and vertical (lower) yearly average displacement rate for a selected case history obtained by combining ascending and descending LOS (Line of Sight) PS displacements.

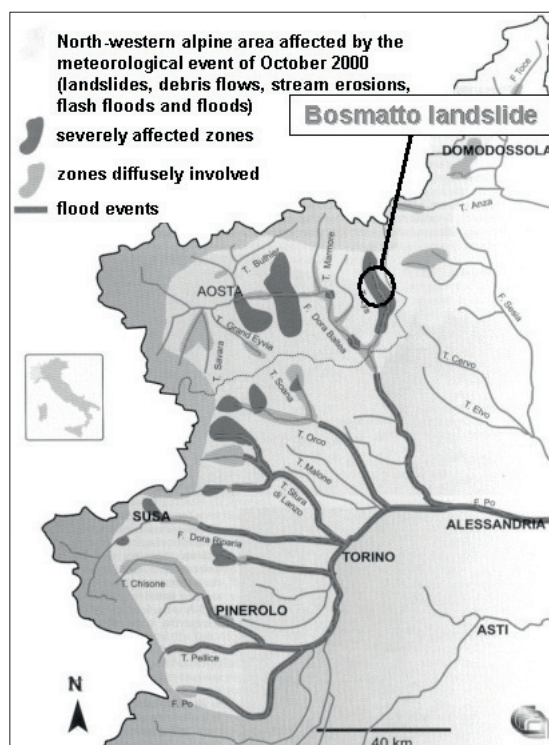


Figure 4.—Zone affectée par les conséquences de l'événement météorologique d'octobre 2000 et emplacement du glissement de terrain Bosmatto. En gris foncé: zones sévèrement affectées, en gris clair: zones partiellement impliquées, en trait-plein: événements d'inondation (TROPEANO & TURCONI 2001).

Area affected by the consequences of the October 2000 meteorological event and location of the Bosmatto landslide (TROPEANO & TURCONI 2001).

torrentielles, dont les dépôts accumulés ont été estimés à environ 150'000 à 180'000 m³, se sont propagées sur une surface d'environ 135'000 m², détruisant des bâtiments et coupant la route principale. En outre, des preuves de la réactivation d'un ancien phénomène d'instabilité, situé en rive gauche du torrent de Letze à environ 1 km en amont du cône de déjection, ont été détectées lors de la première étude de terrain (figure 5). Des déplacements d'environ 4 mètres en une semaine ont été mesurés à la suite de ces événements. Après la réactivation des glissements, des études de terrain ont été réalisées afin d'évaluer le risque résiduel pour les bâtiments et les infrastructures et pour la conception d'un système de suivi du glissement de terrain. Le système de surveillance comprend un réseau de 7 points de mesure GPS; deux mesures par an ont été régulièrement acquises depuis la seconde moitié de 2002.

Dans ce cas, les résultats de l'analyse PSInSARTM fournissent les données de déplacement du glissement de terrain avant la réactivation d'octobre 2000. En raison de l'orientation de la pente instable, seuls les déplacements en géométrie descendante sont disponibles. La mesure GPS d'un point donne sa position en 3 dimensions; afin de pouvoir comparer les



Figure 5.—Vue de la zone d'instabilité de Bosmatto (en traits tillés), réactivée au cours de l'événement météorologique d'octobre 2000 (Val d'Aoste, Italie du nord-ouest).

View of the Bosmatto landslide area (dashed line), reactivated during the October 2000 meteorological event (Valle d'Aosta, NW Italy).

données GPS et PSInSARTM, les déplacements mesurés par GPS doivent être projetées le long de la ligne de visée du satellite. En outre, la position d'un PS sélectionné ne correspond pas nécessairement à une station GPS. Néanmoins, chaque série temporelle de déplacement fournie par le GPS a été comparée à celle du PS le plus proche. Deux différentes séries de déplacement – données PS avant la réactivation du glissement de terrain et données GPS après la réactivation du glissement de terrain – sont représentées; les deux séries de données ont été unies même si aucune mesure de déplacement n'était disponible pour la période de temps considérée.

Enfin, l'écart entre les PS et les déplacements GPS a été négligé. La comparaison entre les séries chronologiques de mesures PSInSARTM et GPS (projetées) montre que le glissement de terrain était actif avant octobre 2000; cependant, après octobre 2000, le taux annuel moyen de déplacement du glissement de terrain augmente significativement (au minimum deux fois, voire plus localement) même si la vitesse depuis décroît lentement avec le temps. Trois exemples sont fournis dans la figure 6.

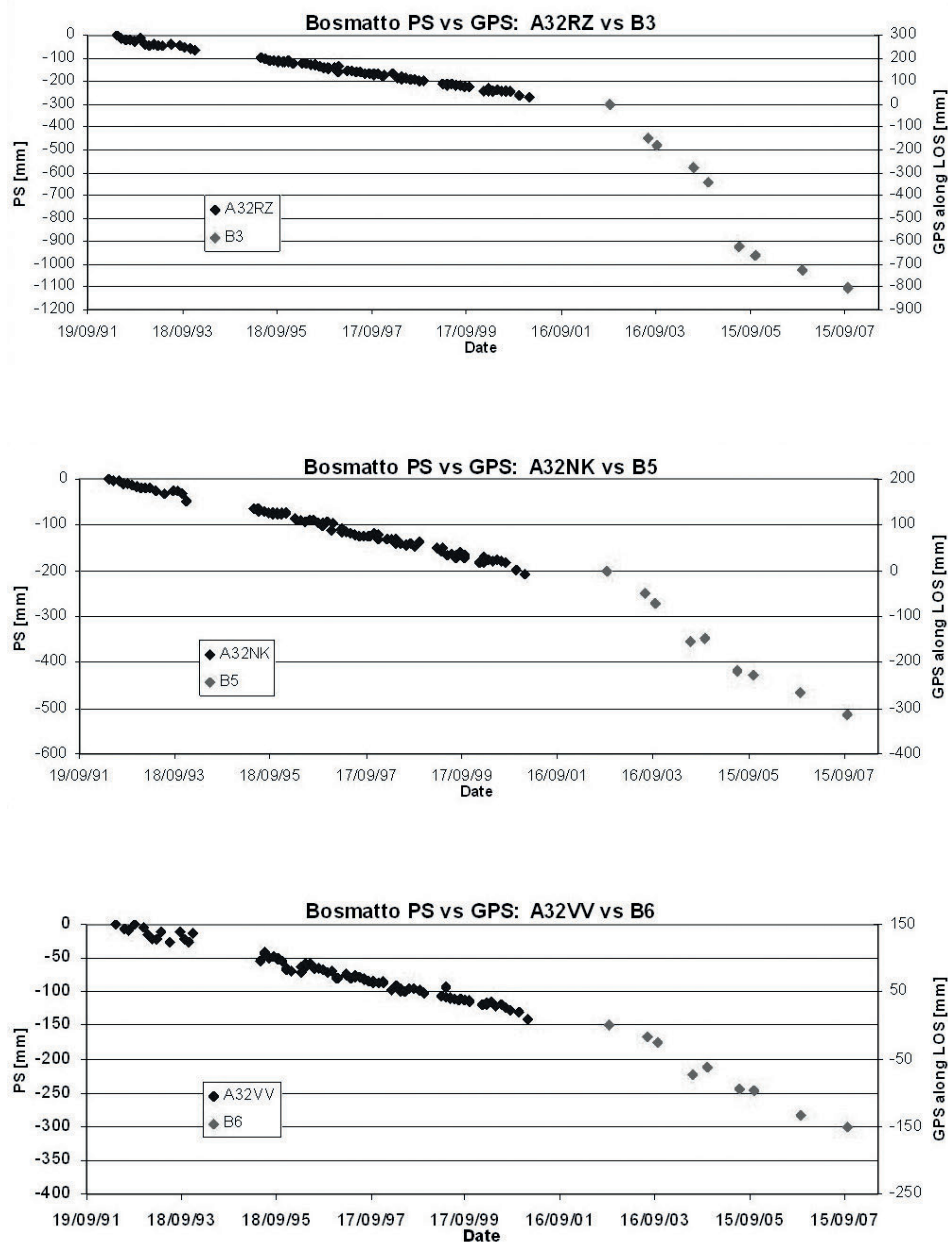


Figure 6.—Glissements de terrain de Bosmatto: trois exemples de données GPS (après 2001) projetées le long de la LOS du satellite comparées aux données PS correspondantes (avant 2001).

Bosmatto landslide: three examples of GPS data (after 2001) projected along satellite LOS compared with corresponding PS time series (before 2001).

CONCLUSIONS

Les résultats obtenus jusqu'à présent, en particulier les activités réalisées en accord avec les autorités de la Protection Civile Italienne, confirment que les approches géologiques et géomorphologiques traditionnelles et l'approche nouvelle par la méthode PSInSAR™ sont des outils complémentaires pour la cartographie des glissements de terrain. Plus précisément, l'évaluation du degré d'activité sur la base d'ensembles de données historiques pluriannuelles peut être d'une valeur inestimable. La disponibilité de séries temporelles de mesures de déplacement pour tous les PS identifiés au radar rend également possible le changement d'échelle de l'analyse, du niveau régional au niveau local. Ceci permet une étude approfondie de l'évolution de phénomènes d'instabilité définis, en soutien de la conception traditionnelle de réseaux de surveillance, et même de vérifier l'efficacité de travaux de stabilisation. En outre, la méthode PSInSAR™ peut fournir des informations précieuses sur le comportement d'une zone d'étude avant l'installation de système de mesure terrestres, à condition que des données d'archives soient disponibles. Le ministère italien de l'environnement a récemment attribué un mandat pour le traitement de plus de 12'000 images radar acquises en Italie, visant à créer la première base de données InSAR à un niveau national pour la cartographie des zones instables. Ceci démontre qu'en moins de dix ans de développement, cette technologie est devenue un outil classique de suivi.

RÉFÉRENCES

- COLESANTI C., FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F., 2003. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique, *Engineering Geology*, Special Issue on Remote Sensing and Monitoring of Landslides, 68 (1-2): 3-14.
- DIXON T.H., AMELUNG F., FERRETTI A., NOVALI F., ROCCA F., DOKKAS R., SELLA G., KIM S.W., WADOWINSKI S. & WHITMAN D., 2006. Subsidence and flooding in New Orleans, *Nature*, 441: 587-588.
- FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F., 2000. Non-linear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 38 (5): 2202-2212.
- FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 39 (1): 8-20.
- HILLEY G. E., BÜRGMANN R., FERRETTI A., NOVALI F. & ROCCA F., 2004. Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis, *Science*, 304 (5679): 1952-1955.
- MASSONNET D. & FEIGL K. L., 1998. Radar interferometry and its applications to changes in the Earth's surface, *Review of Geophysics* 36: 441-500.
- MASSONNET D., ROSSI M., CARMONA C., ADRAGNA F., PELTZER G., FEIGL K. & RABAUTE T., 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature* 364: 138-142.
- TROPEANO D. & TURCONI L., 2001. Alluvione del 14-16 Ottobre 2000 nell'Italia Nord-Ovest: Cronaca di Sintesi e Commenti, *Nimbus*, 21-22.