

rentes. Ces variations spatiales et temporelles fournissent des informations spécifiques et imposent aussi des limites à la méthode : pour n'observer que les mouvements du sol, nous devons éliminer tous les phénomènes qui ajoutent des franges d'interférences ou modifient celles-ci.

L'écart temporel introduit une première contrainte. Si les nombreuses petites cibles réfléchissantes qui composent chaque pixel, rochers ou végétation, changent entre les deux prises de vue, la composante aléatoire de la phase varie pour chaque image. Si le temps écoulé entre les deux images est trop long, ces petites cibles varient au hasard : les feuilles tombent des arbres, de l'herbe pousse là où il n'y avait rien, des orages lessivent le terrain.

Ensuite, les deux images radar sont prises à partir de positions différentes : une partie de la différence de phase de chaque pixel provient donc du relief du sol, comme sur n'importe quel couple d'images stéréoscopiques. On soustrait cette contribution à l'interférogramme si l'on dispose d'informations précises sur la topographie.

Enfin, le changement de position du satellite entre les deux images modifie l'angle d'incidence de l'onde radar. Pour que les réflexions élémentaires à l'intérieur d'un même pixel se combinent de la même façon, le déphasage dû à cette variation angulaire doit rester inférieur à une fraction de longueur d'onde sur la largeur d'un pixel. En pratique, cette condition est réalisée si l'écart des positions du satellite lors des deux prises de vue est inférieur à un kilomètre. Les quatre satellites radar civils qui fonctionnent aujourd'hui, le *Radarsat* canadien, les satellites européens *ERS-1* et *ERS-2*, ainsi que le satellite japonais *JERS-1* satisfont la plupart du temps à cette exigence de répétition orbitale, bien qu'aucun d'entre eux n'ait été conçu pour faire de l'interférométrie.

Nous avons d'abord tenté d'appliquer notre méthode avec des images prises par un radar aéroporté. Après l'écrasement au décollage de l'avion où nous embarquions habituellement le radar expérimental du CNES, nous avons utilisé le radar et l'avion de l'Institut aérospatial allemand. Ces expériences ont échoué, car l'avion ne parvenait jamais à parcourir des trajectoires successives assez proches

l'une de l'autre : pour un avion, qui vole à une altitude beaucoup plus faible qu'un satellite, l'écart maximal des trajectoires doit être de quelques mètres. Laurence Gray et ses collègues du Centre canadien de télédétection ont toutefois réalisé ce tour de force en 1991.

Un séisme providentiel

L'année suivante, un violent tremblement de terre frappa la région de Landers, une petite ville du Sud de la Californie. Nous avons aussitôt pensé que cet endroit au climat aride serait idéal pour tester notre méthode avec des images du satellite radar *ERS-1*, lancé l'année précédente. Nous avons traité des images radar de la zone

En outre, ce dernier montrait des détails nouveaux, telles de petites discontinuités sur des failles géologiques connues. Par exemple, sur notre interférogramme, à 100 kilomètres de l'épicentre du séisme, on distingue une discontinuité de sept millimètres, située sur une portion de faille de 20 kilomètres de long. Un modèle de propagation des contraintes indiquait justement que cette portion de 20 kilomètres était une zone de contrainte maximale sur la croûte terrestre.

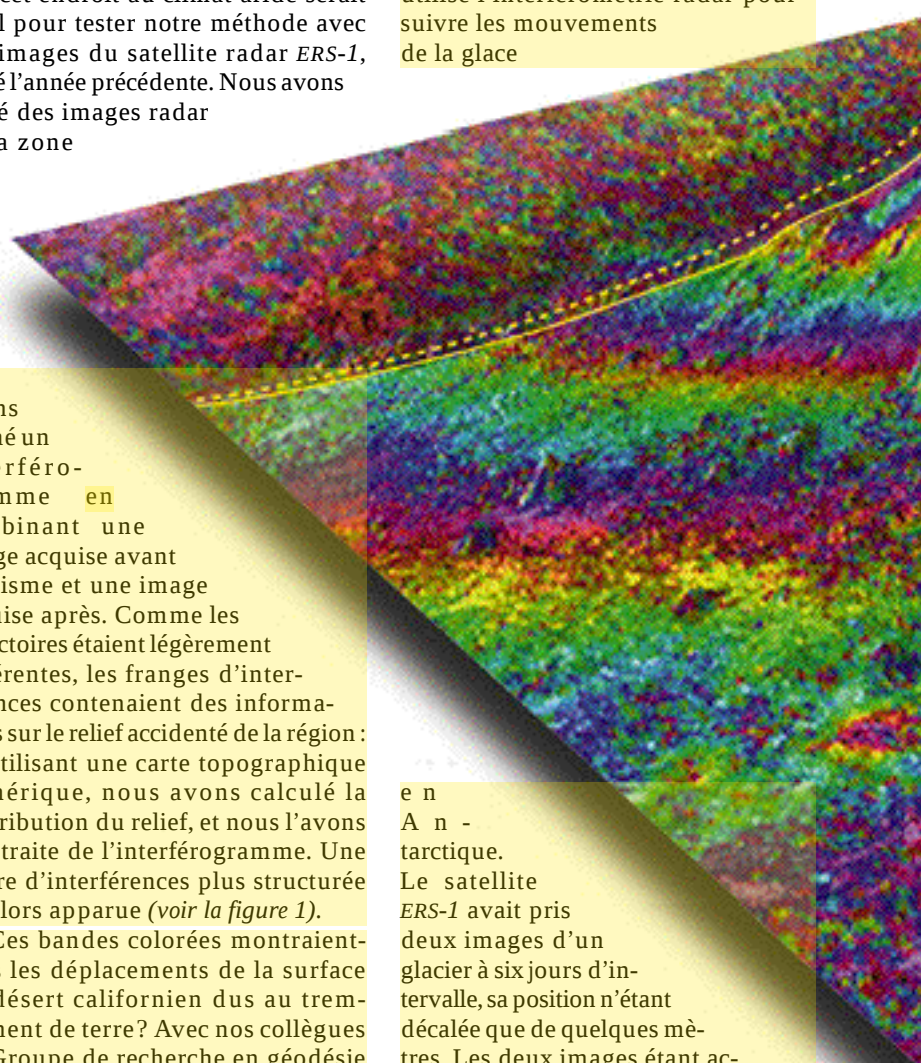
Peu après cette étude, Richard Goldstein et ses collègues de Pasadena ont utilisé l'interférométrie radar pour suivre les mouvements de la glace

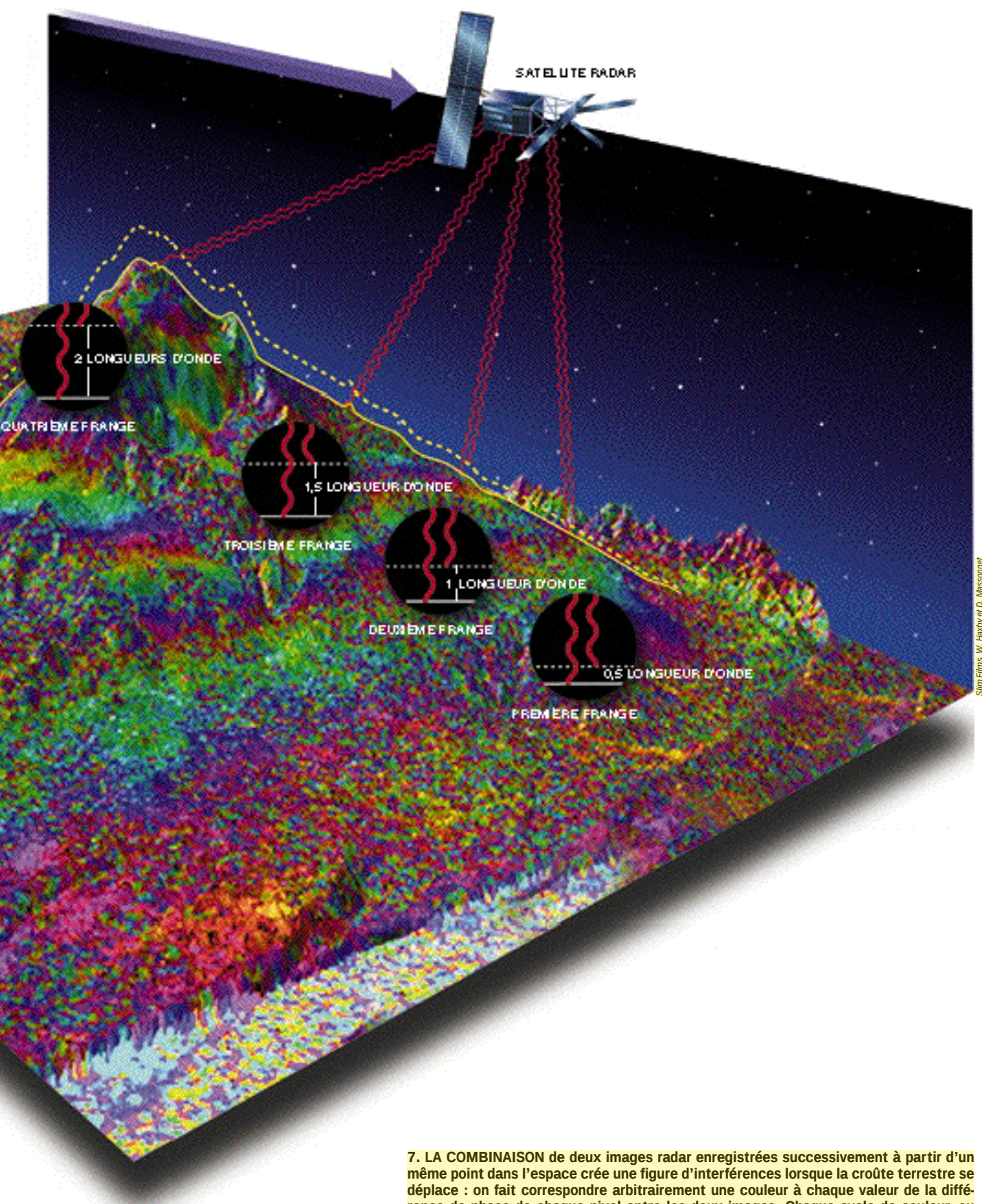
et nous avons formé un interférogramme en combinant une image acquise avant le séisme et une image acquise après. Comme les trajectoires étaient légèrement différentes, les franges d'interférences contenaient des informations sur le relief accidenté de la région : en utilisant une carte topographique numérique, nous avons calculé la contribution du relief, et nous l'avons soustraite de l'interférogramme. Une figure d'interférences plus structurée est alors apparue (voir la figure 1).

Ces bandes colorées montraient-elles les déplacements de la surface du désert californien dus au tremblement de terre ? Avec nos collègues du Groupe de recherche en géodésie spatiale de Toulouse, nous avons calculé les déformations de la croûte terrestre dans cette région à partir des mesures des déplacements du sol près de la rupture principale. Nous avons alors calculé un interférogramme simulé. Les principales caractéristiques de cet interférogramme ressemblaient étonnamment à celles de l'interférogramme calculé à partir des deux images radar.

En Antarctique. Le satellite *ERS-1* avait pris deux images d'un glacier à six jours d'intervalle, sa position n'étant décalée que de quelques mètres. Les deux images étant acquises presque de la même position, l'interférogramme ne contenait pas de contribution de la topographie : il indiquait seulement les mouvements de la glace. L'image montre un écoulement de glace de deux mètres en six jours, avec des détails sur la géométrie de l'écoulement (voir la figure 6).

Peut-on détecter des déformations d'amplitude inférieure par interférométrie des images radar ? Nous avons





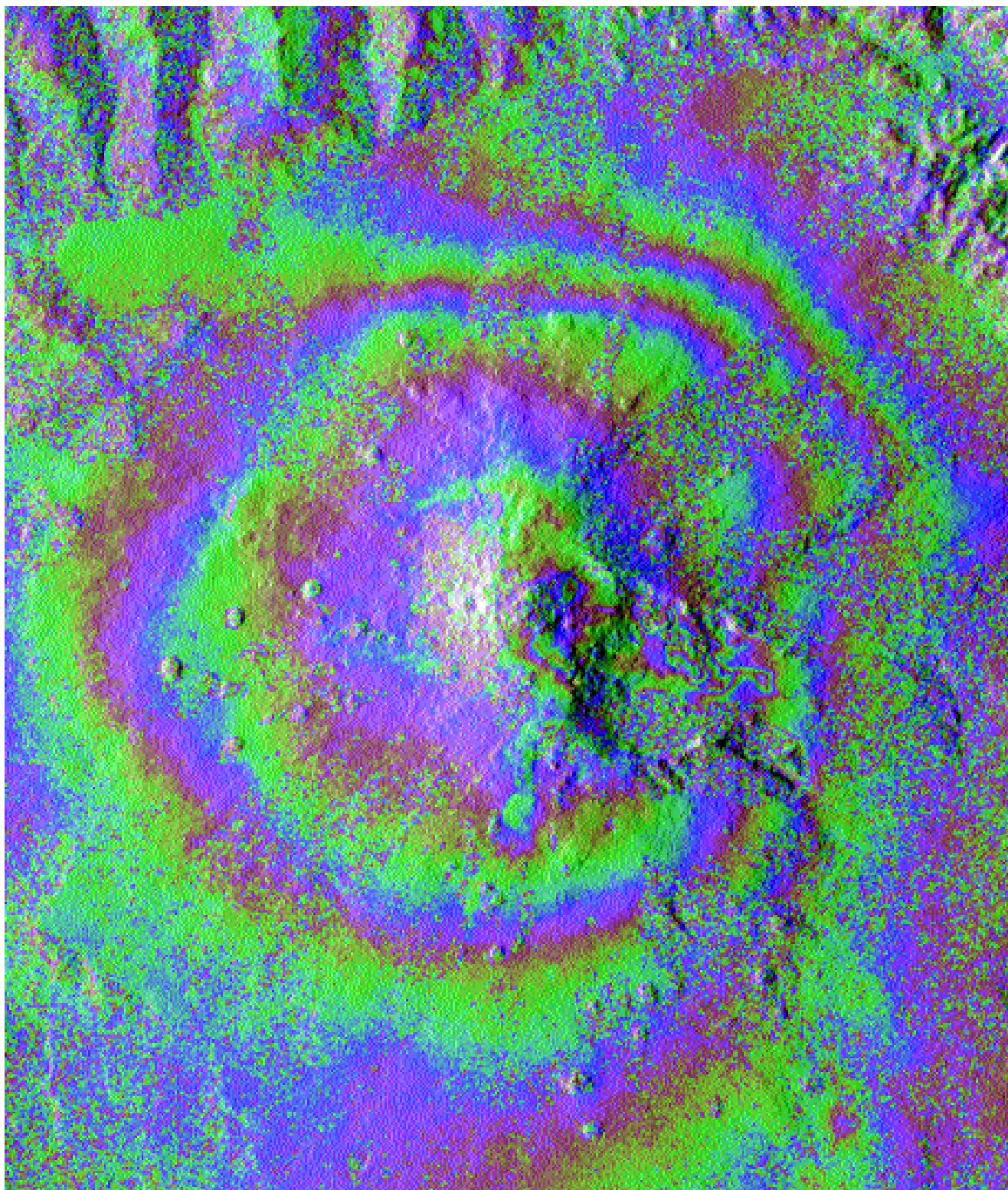
Slim Films, W. Hardy et D. Massonnet

7. LA COMBINAISON de deux images radar enregistrées successivement à partir d'un même point dans l'espace crée une figure d'interférences lorsque la croûte terrestre se déplace : on fait correspondre arbitrairement une couleur à chaque valeur de la différence de phase de chaque pixel entre les deux images. Chaque cycle de couleur, ou frange, correspond à un déplacement du sol d'une demi-longueur d'onde (*cartouches circulaires*), soit une longueur d'onde pour le trajet d'aller et de retour de l'onde radar. La figure d'interférences représentée ici montre un affaissement progressif de l'Etna.

examiné l'Etna alors qu'il approchait de la fin d'un cycle éruptif : pendant une période de 18 mois, le satellite *ERS-1* le survola plus de 30 fois. À partir des diverses images radar et d'une carte topographique, nous avons pro-

duit des dizaines d'interférogrammes débarrassés des informations de relief. Certains étaient brouillés par des changements dans la végétation sur les flancs du volcan : des couples d'images utilisés pour construire ces inter-

férogrammes étaient séparés par plusieurs mois, d'autres par plus d'un an. Néanmoins, avec l'aide de nos collègues de l'Institut de physique du Globe de Paris, nous avons suivi le «dégonflement» du volcan à mesure



Didier Massonnet

8. L'ETNA SE DÉGONFLE à mesure que le magma sous-jacent est évacué. Cette figure d'interférences produite à partir de données du satellite *ERS-1* montre quatre franges d'interférences qui indiquent que le

sommet de la montagne est descendu de 11 centimètres entre les dates de prise de vue des deux images. L'ampleur de la zone qui se déforme a été révélée grâce à la grande superficie observée par le satellite

que les laves finissaient de s'écouler et que la pression diminuait sous la montagne. Nos interférogrammes montrent que le sommet de l'Etna est descendu de deux centimètres par mois pendant les sept derniers mois de l'éruption. La zone de déformation s'étendait assez loin du volcan lui-même : la chambre magmatique souterraine serait beaucoup plus profonde que ne le pensaient les géologues. Ces derniers avaient installé leurs instruments de mesure sur une zone plus petite que celle observée par le satellite : ils n'observaient les phénomènes que près du sommet.

Bien que l'Etna soit situé dans l'une des zones les mieux surveillées au monde par les géologues, l'interférométrie radar a précisé son comportement. On pourrait ainsi étudier les quelques centaines de volcans actifs de la Terre, en utilisant les satellites radar aujourd'hui en orbite. L'interférométrie radar ne remplacera pas les mesures sur le terrain, mais elle pourrait alerter les géologues en révélant les volcans qui se réveillent lentement, lorsqu'ils commencent à gonfler et deviennent dangereux. Elle permettrait aussi de surveiller des volcans d'accès difficile.

L'accumulation des interférogrammes a montré que les évolutions rapides de l'atmosphère et de l'ionosphère contribuent aux franges d'interférences en accélérant et en retardant les ondes radar. Les modifications des propriétés électriques du sol, conséquences de variations de l'humidité par exemple, peuvent aussi modifier les franges d'interférences, même quand le sol ne bouge pas, ce qui complique l'interprétation des résultats de l'interférométrie radar. Nous savons aujourd'hui distinguer leurs contributions de celle des déplacements effectifs du sol, en analysant plusieurs interférogrammes. Nous

envisageons aussi d'étudier ces phénomènes par interférométrie radar.

Quel est l'avenir de l'interférométrie des images radar ? Les quatre satellites radar qui sont aujourd'hui en orbite survolent presque toute la surface du Globe. L'Europe, le Japon et le Canada prévoient de lancer bientôt d'autres satellites, de sorte que nous ne manquerons pas de données radar. Des campagnes de relevés faites à l'aide de satellites capables de répéter presque exactement leur trajectoire, et dont les caractéristiques techniques seraient adaptées à l'interférométrie, simplifieraient beaucoup l'exploitation des données interférométriques pour le calcul des mouvements du sol. De tels satellites serviraient aussi aux relevés topographiques si certaines orbites étaient volontairement décalées pour créer un effet stéréoscopique. La NASA prévoit de mettre en œuvre cette propriété de l'interférométrie en lançant une mission spécifique sur la Navette spatiale vers l'an 2000. La quasi-totalité de la topographie de la planète serait alors connue avec précision.

Les expériences initiales sur le tremblement de terre de Landers et sur l'Etna avaient pour but de valider la technique. Elles ont toutefois apporté des connaissances nouvelles. Les expériences que nous-mêmes et d'autres équipes avons réalisées depuis apportent des informations d'intérêt scientifique, industriel ou juridique plus spécifiques. Par interférométrie des images radar, nous détectons l'affaissement du sol créé par des exploitations minières ou géothermiques profondes, ainsi que les réajustements silencieux des zones sismiques plusieurs mois après un grand tremblement de terre. Cette technique tiendra une place importante et durable parmi les outils d'observation de la Terre.

Didier MASSONNET est responsable adjoint de la division de traitement d'image du Centre national d'études spatiales.

A.K. GABRIEL, R.M. GOLDSTEIN et H.A. ZEBKER, *Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry*, in *Journal of Geophysical Research: Solid Earth and Planets*, vol. 94, n° B7, pp. 9183-9191, 10 juillet 1989.

Sar Geocoding: Data and Systems, sous la direction de G. Schreier, Wichmann, 1993.

D. MASSONNET et al., *The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry*, in *Nature*, vol. 364, pp. 138-142, 8 juillet 1993.

D. EVANS, E. STOFEN, T. JONES et L. GODWIN, *La Terre vue du ciel*, in *Pour la Science*, février 1995.

D. MASSONNET, P. BRIOLE et A. ARNAUD, *Deflation of Mount Etna Monitored by Spaceborne Radar Interferometry*, in *Nature*, vol. 375, pp. 567-570, 15 juin 1995.