

France Culture et Pour la Science

**vous invitent
au Palais
de la Découverte
à l'enregistrement**

des Inattendus de la science

**Samedi
12 avril 1997
à 15h**

*Les inattendus
de la biologie
du développement*
avec Alain Prochiantz,
directeur de recherche
au CNRS

**Invitations à demander
au 08 36 68 10 99 (2,23F/mn)**



Palais de la découverte

**POUR LA
SCIENCE**

utilisés ou de choisir des animaux phylogénétiquement inférieurs.

L'enseignement également a évolué : ainsi, les chirurgiens britanniques ne s'entraînent plus sur des animaux, mais sur des cadavres humains ; ensuite ils assistent des chirurgiens expérimentés pendant des opérations réelles. Aux États-Unis, les étudiants de plus de 40 facultés de médecine sur 126 n'utilisent pas d'animaux au cours de leur cursus universitaire.

L'état d'esprit des chercheurs a changé. Depuis 1985, aux Pays-Bas, tous les scientifiques qui s'apprentent à faire des expérimentations animales doivent suivre un stage de trois semaines, où ils apprennent comment manipuler les animaux, comment pratiquer des anesthésies, et quelles sont les règles élémentaires de l'expérimentation animale. Au cours de leurs études, on demande aux étudiants en médecine de concevoir une expérimentation animale pour résoudre des problèmes précis, puis de trouver d'autres méthodes qui donneraient les mêmes résultats, sans avoir recours aux animaux.

Si l'état d'esprit évolue, c'est sans doute aussi parce que les lois elles-mêmes ont changé, introduisant la clause du « bien-être » de l'animal. Aujourd'hui, on admet que les primates éprouvent des émotions, et l'on a dressé la liste des situations qui doivent être évitées : la peur, l'anxiété, l'ennui et l'isolement. Des statistiques sur la douleur et la détresse des animaux ont été établies, mais elles sont parfois contestées. En 1995, 54 pour cent des animaux recensés au cours d'enquêtes menées aux États-Unis ne semblaient éprouver ni douleur ni détresse, 37 pour cent souffraient de douleur soulagée par des antalgiques, et seulement neuf pour cent souffraient de douleur ou de détresse non soulagée. Ces données sont controversées, car aucune classification de la douleur n'a été définie. Des tests dont on admet souvent qu'ils sont douloureux, tels les tests de toxi-

cité ou la fabrication d'anticorps, y ont été classés dans la catégorie des manipulations indolores.

L'évaluation de la détresse animale est effectivement difficile. Plusieurs pays européens, ainsi que le Canada et l'Australie, ont défini des échelles de douleur où chaque expérimentation a un indice de douleur. En 1995, les Pays-Bas ont établi que 54 pour cent des animaux éprouvent une gêne mineure, 26 pour cent une gêne modérée et 20 pour cent souffrent d'une grave détresse au cours des expériences pratiquées.

Les changements ont été lents. Les activistes les plus actifs prétendent que la recherche animale est inutile, que les expérimentateurs sont cruels, corrompus, et entraînés dans une course aux publications et aux subventions. Inversement, les partisans de l'expérimentation considèrent que l'on ne peut sacrifier l'homme à la cause animale, et qu'un renforcement des droits des animaux menacerait la santé publique.

Les spécialistes des sciences de la vie semblent avoir évolué plus vite en Europe qu'aux États-Unis. Les Européens qui s'intéressent aux primates, par exemple, discutent depuis des dizaines d'années des sentiments complexes qu'éprouvent ces animaux. L'Union européenne projette de diviser par deux le nombre des animaux utilisés d'ici l'an 2000 (au contraire, aux États-Unis, ce nombre ne décroîtra probablement pas).

Aujourd'hui, les défenseurs des animaux doivent accepter que la recherche animale est utile à l'homme et, de leur côté, les partisans de la recherche animale doivent admettre que, si les animaux sont suffisamment proches de l'homme pour que leur corps ou leur cerveau servent de modèles pour la physiologie humaine, leur utilisation pose inévitablement des questions éthiques. Les recherches sur les invertébrés, les études *in vitro* et les simulations informatiques sont des méthodes de remplacement à l'étude.

Madhusree MUKERJEE est journaliste à *Scientific American*.

F. Barbara ORLANS, *In the Name of Science: Issues in Responsible Animal Experimentation*, Oxford University Press, 1993.

Deborah BLUM, *The Monkey Wars*, Oxford University Press, 1994.

Andrew N. ROWAN, Franklin M. LOEW et Joan C. WEER, *The Animal Research Controversy: Protest, Process and Public Policy*, Center for Animals and Public Policy, Tufts University School of Veterinary Medicine, 1995.

D'autres informations sont disponibles sur le site Web : <http://www.sciam.com>

L'interférométrie radar par satellite



DIDIER MASSONNET

Des radars en orbite à des centaines de kilomètres de la Terre détectent de faibles mouvements de sa surface.

Les plaques tectoniques glissent silencieusement les unes contre les autres ; les glaciers descendent lentement des montagnes ; le niveau du sol s'élève et s'abaisse doucement... Généralement les forces qui façonnent la Terre agissent si lentement que nous n'en percevons pas les conséquences. Toutefois, la rupture soudaine des failles géologiques ou l'éruption explosive des volcans nous rappellent que la Terre «ferme» est en réalité mouvante.

Pour mieux comprendre la dynamique du Globe et prévoir de telles catastrophes, les géophysiciens mesurent les étirements et les flexions de la croûte terrestre. À cette fin, ils installent divers instruments, niveaux géodésiques ou balises électroniques de positionnement, sur les failles et sur les volcans. Toutes les zones du Globe ne sont toutefois pas facilement accessibles, et la mesure des déformations de grandes portions de la croûte terrestre est longue à réaliser par ces méthodes.

Les géologues pourraient-ils suivre les déformations du sol sans se déplacer ? En 1985, j'ai proposé d'utiliser pour cela des images enregistrées par des satellites, en perfectionnant l'interférométrie des images radar. À cette époque, on savait déjà observer la surface terrestre à l'aide d'avions et de satellites ; je me suis alors demandé comment on pourrait traiter les informations ainsi recueillies pour détecter les faibles déformations de la surface de la Terre. Toutefois, les quelques géologues auxquels j'avais fait part de ce projet étaient sceptiques : détecter des mouvements de quelques millimètres avec un satellite placé à

des centaines de kilomètres d'altitude semblait impossible.

En revanche, je parvins à convaincre le Centre national d'études spatiales et, après une dizaine d'années d'études, nous utilisons aujourd'hui notre nouvelle technique pour cartographier les ruptures de failles géologiques lors de tremblements de terre et pour suivre les soubresauts des volcans causés par les flux et les reflux du magma situé en dessous. D'autres équipes ont observé de la même façon des glissements de terrain et l'écoulement lent des glaciers.

De précieuses interférences

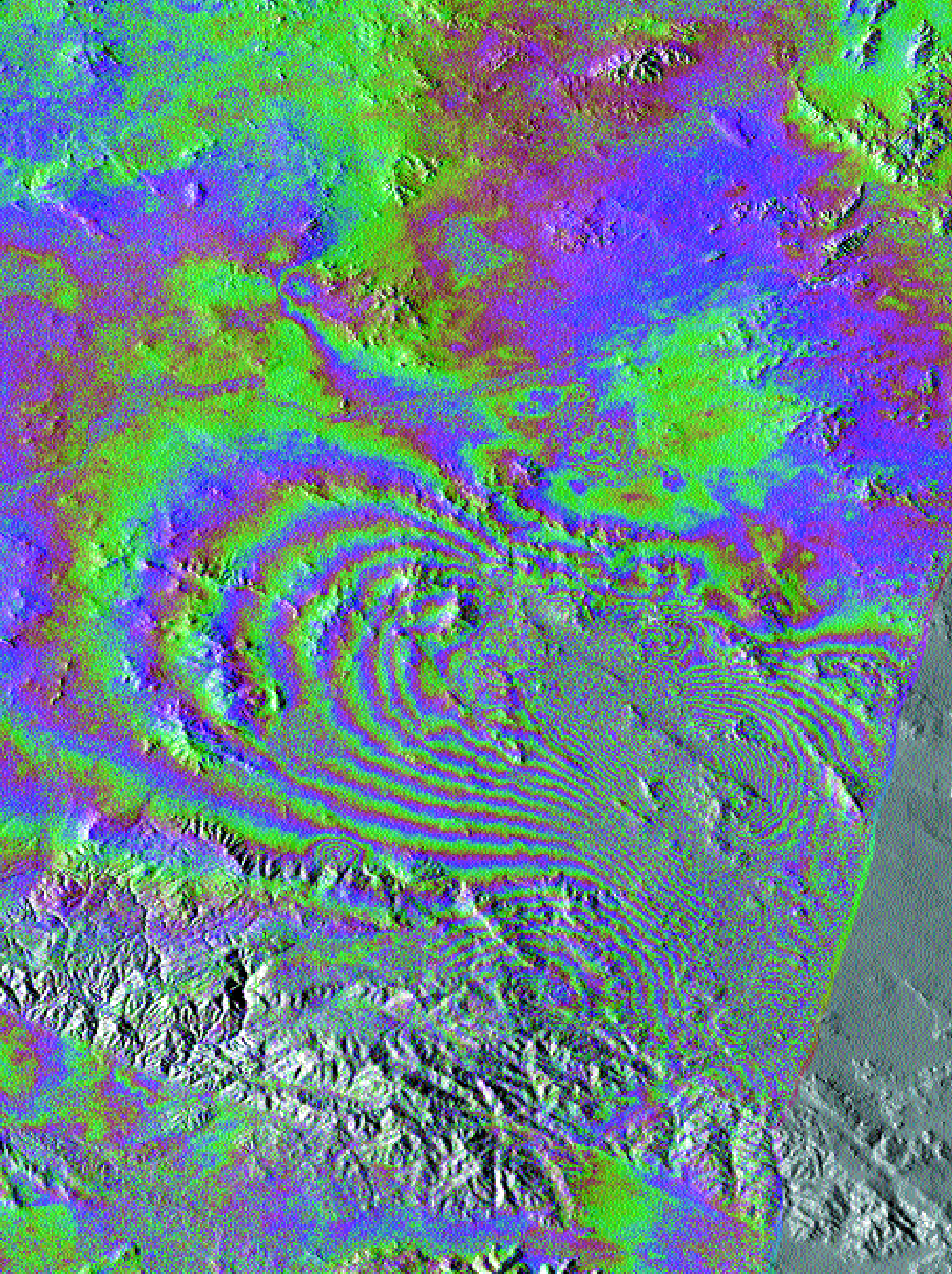
Le radar est l'instrument de détection utilisé dans cette technique. Inventé dans les années 1940, son nom est l'acronyme anglais de «détection et mesure de distance par radio». Nous connaissons tous les grandes antennes tournantes qui suivent les avions dans le ciel ; moins visibles sont les petites antennes fixes embarquées sur des avions, qui forment des images du sol de nuit comme de jour, par beau temps ou dans le brouillard le plus épais : le radar détecte les réflexions d'ondes électromagnétiques qu'il a lui-même émises, de sorte que la lumière du jour ne lui sert pas. Une couche nuageuse, même épaisse, n'empêche pas l'observation, car les gouttelettes d'eau et les microcristaux

de glace n'arrêtent pas les ondes radio utilisées par le radar.

L'imagerie par radar a encore un autre avantage sur la photographie optique. Les instruments optiques captent en effet la lumière réfléchie par le sol sous la forme d'innombrables ondes électromagnétiques de toutes fréquences et de toutes phases ; chaque point de l'image, ou pixel, est caractérisé par la brillance de la lumière détectée. En revanche, un radar envoie sur sa cible une onde radio de fréquence précise, qui oscille comme une sinusoïde en fonction du temps, et il mesure, pour chaque pixel, la phase de l'onde réfléchie.

Grâce aux courtes longueurs d'onde employées, la mesure de la phase révèle à quelle distance se trouve une cible au centimètre près, voire à quelques millimètres près. Quand un radar embarqué sur un satellite émet, à une fréquence de l'ordre de six gigahertz (six milliards de cycles par seconde), par exemple, l'onde radio parcourt, à la vitesse de la lumière, cinq centimètres pendant chaque oscillation. Si la distance qui sépare l'antenne radar d'une cible est de 800 kilomètres, les 1 600 kilomètres que parcourt l'onde pour aller jusqu'à la cible et revenir au radar correspondent à un nombre très grand, mais entier, de longueurs d'onde. Dans ce cas, lorsque l'onde revient au satellite, elle a juste terminé son dernier cycle, et sa phase est la

1. LES FRANGES D'INTERFÉRENCES (bandes colorées sur l'image de droite) calculées à partir de deux prises de vue radar successives du satellite ERS-1 (ci-dessus, à gauche) montrent la déformation du sol causée par un séisme près de la ville de Landers, en Californie, en 1992. Chaque cycle de couleur (du rouge au bleu) représente un déplacement du sol de 28 millimètres vers le satellite. Pour observer uniquement les déformations du sol, on a soustrait de l'interférogramme les signaux dus au relief (représenté sur le fond en noir et blanc).



même que lors de l'émission. En revanche, si la cible est à 800 kilomètres et un centimètre du radar, l'onde parcourt deux centimètres supplémentaires pour effectuer le trajet aller et retour, soit 40 pour cent de la longueur d'onde. La phase de l'onde réfléchie est alors de 40 pour cent de sa valeur sur un cycle lorsqu'elle revient au

radar. Ce dernier peut mesurer un tel écart, et des écarts encore inférieurs.

Pendant des décennies, les spécialistes du radar ne se préoccupèrent toutefois pas de la phase de l'onde réfléchie, parce que chaque pixel d'une image radar prise d'un avion ou d'un satellite correspond à une surface au sol de 100 mètres carrés environ. L'onde

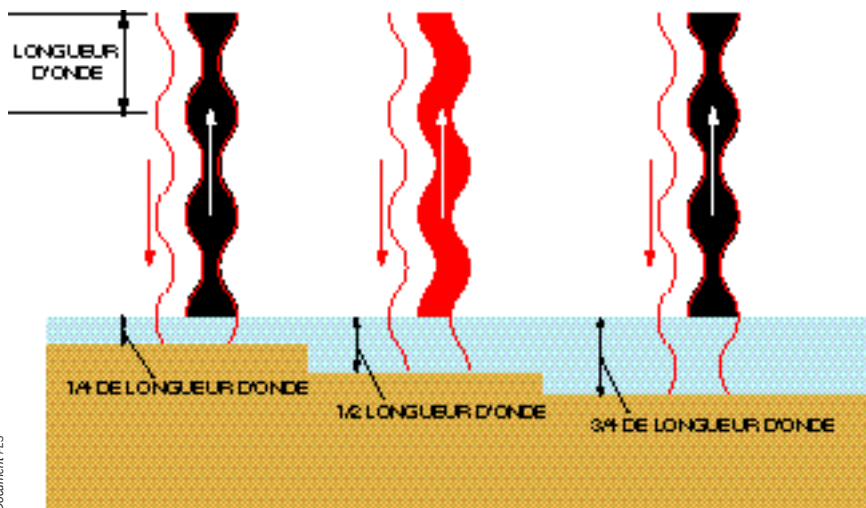
réfléchi par cette surface est la combinaison des ondes réfléchies par toutes les cibles élémentaires qu'elle contient, cailloux, rochers, branches, feuilles et, plus généralement, tout objet présentant des aspérités. Comme toutes ces réflexions se combinent de manière imprévisible, la phase pour un pixel donné est aléatoire : elle semble n'avoir aucun lien avec la phase mesurée sur les pixels voisins.

L'amplitude du signal associé à un pixel, dans une telle image, indique donc si un nombre plus ou moins grand de réflecteurs élémentaires se trouvent à l'endroit correspondant au sol. Toutefois, l'amplitude mesurée est «bruitée», parce que les réflexions élémentaires qui se combinent en chaque pixel peuvent renforcer la brillance totale, par interférence constructive, ou s'annuler mutuellement, par interférence destructive. Ce phénomène de scintillement explique aussi l'aspect granuleux des points éclairés par les lasers.

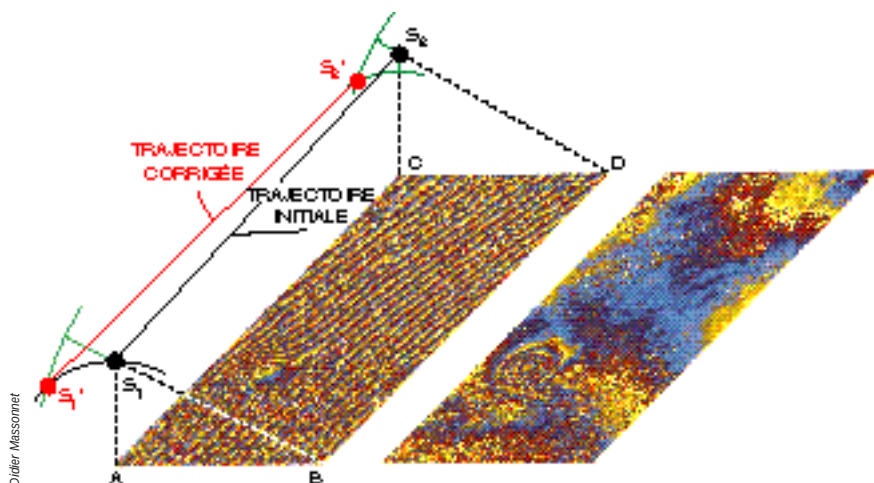
Le scintillement des images radar est atténué par le calcul de la moyenne des amplitudes des pixels voisins. Cette opération est faite au détriment de la précision des images. Celles-ci ressemblent ainsi davantage aux photographies aériennes en noir et blanc. Toute information sur la phase des pixels a toutefois disparu.

Les richesses de la phase

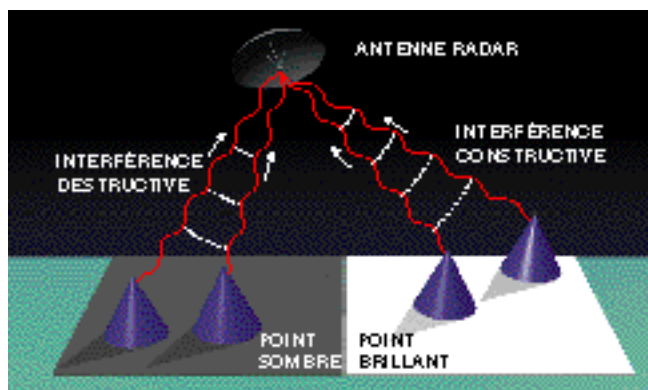
Le premier qui parvint à utiliser cette information fut L.C. Graham, de la Société Goodyear Aerospace : en 1974, il démontra que l'on peut mesurer la topographie du terrain à l'aide des phases mesurées par un radar aéroporté, équipé de deux antennes. Puis, dans les années 1980, une équipe du Laboratoire de propulsion de Pasadena (Californie), obtint des résultats similaires à partir des mesures de phase du satellite SEASAT, premier satellite radar civil, lancé en 1978 (qui ne fonctionna malheureusement que trois mois). L'équipe californienne comparait deux images radar d'une même zone, prises de positions différentes et à des instants différents. Bien que la phase de chaque pixel semble aléatoire à chaque prise de vue, la différence des phases des pixels correspondants sur les deux images ne l'est pas : en codant cette différence de phase avec des couleurs, on obtient une figure d'interférences équivalant à des courbes de niveau.



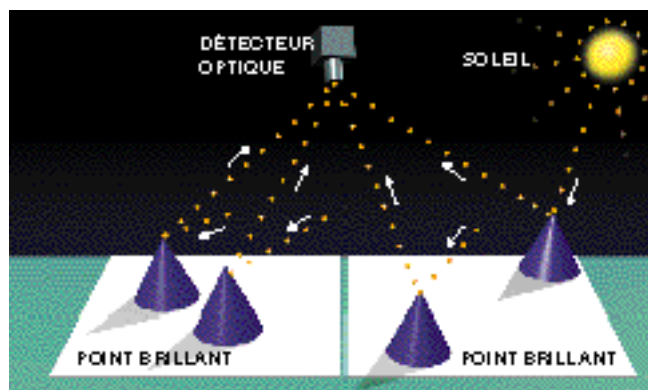
2. LES ONDES RÉFLÉCHIES par les deux faces d'une lame de verre interfèrent différemment selon l'épaisseur de la lame. L'onde réfléchi par la face inférieure parcourt une distance supplémentaire égale au double de cette épaisseur. Lorsque cette dernière est un multiple entier de la demi-longueur d'onde (au milieu), la distance supplémentaire est un nombre entier de longueurs d'onde : les deux ondes sont en phase, et l'on observe une tache lumineuse. Au contraire, lorsque l'épaisseur de la lame est un multiple demi-entier de la demi-longueur d'onde, la distance supplémentaire est égale à un nombre entier de demi-longueurs d'onde (à gauche et à droite) : les deux ondes sont déphasées, et l'on observe une tache sombre.



3. L'ÉCART ENTRE LES DEUX ORBITES d'où sont prises les deux images radar que l'on combine pour obtenir un interférogramme produit des franges d'interférence (à gauche). Pour éliminer ces franges, qui masquent les informations sur le déplacement du sol, on les calcule à partir des données sur la trajectoire du satellite. Celle-ci n'est toutefois pas connue au centimètre près : il reste donc des franges «orbitales» non modélisées. On les retire en «réglant» l'une des orbites selon le principe suivant : sur l'image de gauche, on compte 15 franges du point A au point B ; la distance entre le satellite S_1 et B doit donc être allongée de 15 fois une demi-longueur d'onde. Si la distance entre A et S_1 est prise comme référence, la position corrigée du satellite est trouvée à l'intersection des cercles noir et vert. En gardant A comme référence, on trouve que la distance DS_2 devrait être allongée de sept demi-longueurs d'onde et la distance CS_2 raccourcie de cinq demi-longueurs d'onde, ce qui donne la nouvelle position S_2' du satellite de l'autre côté de l'image. La trajectoire corrigée $S_1'S_2'$ permet de retirer les franges «orbitales» partout (à droite). On observe alors les phénomènes sous-jacents, tel un petit tremblement de terre (en bas de l'image).



4. LES ÉCHOS RADAR (lignes rouges) d'un couple d'objets proches peuvent interférer de façon constructive (à droite) ou destructive (à gauche). Des différences minimales dans la disposition des objets peuvent donc modifier considérablement la brillance d'un point d'une image radar.

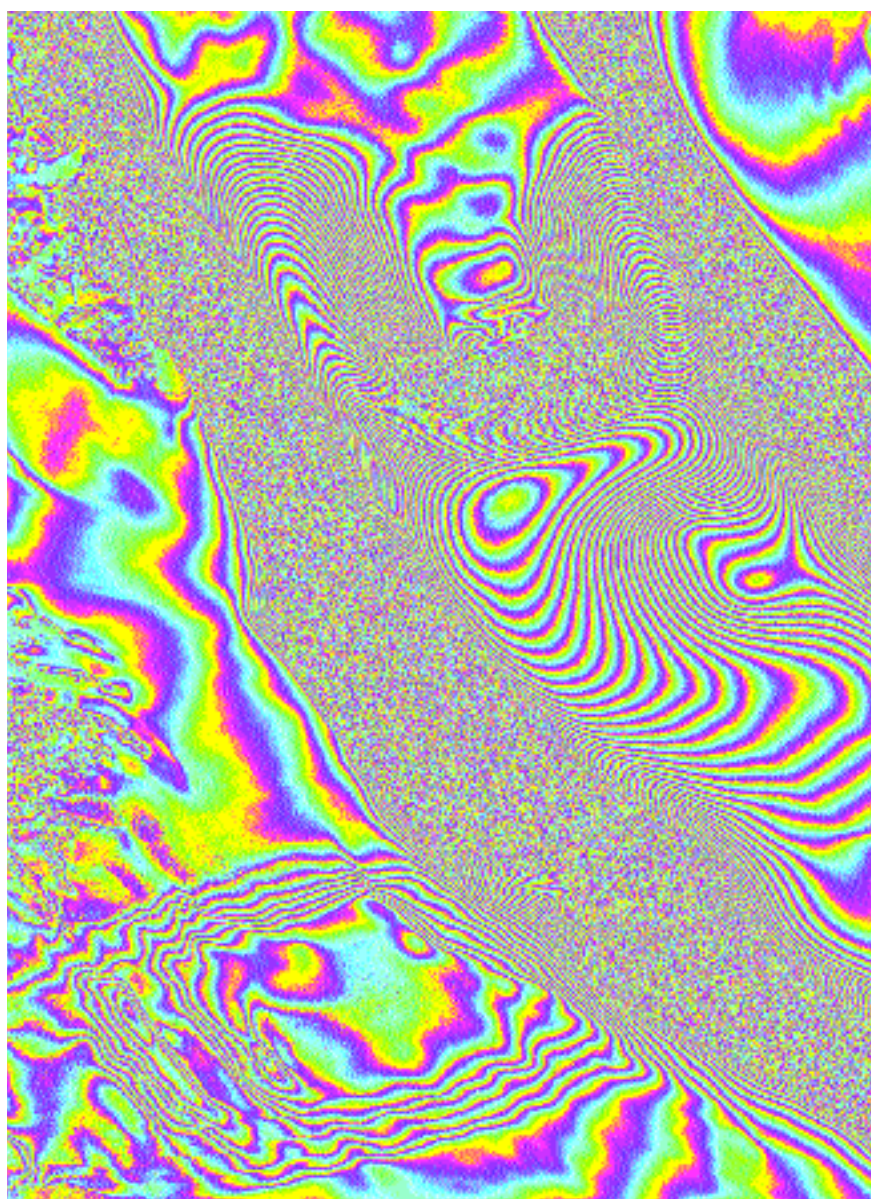


5. UN COUPLE D'OBJETS réfléchit toujours à peu près le même nombre de photons vers l'instrument, quelle que soit la position de ces objets dans la surface observée. La luminosité de celle-ci ne varie donc pas lorsque les objets sont légèrement déplacés.

Pour suivre des mouvements de la croûte terrestre, nous avons appliqué la même méthode, mais en éliminant toutes les conséquences du décalage de la position du satellite entre les deux prises de vue. Dans ces conditions, si le sol n'a pas bougé entre temps, la phase de chaque pixel devrait être identique sur les deux images. En revanche, si le paysage a changé, même faiblement, entre les prises de vue, la phase de certains pixels est modifiée. Le calcul de la différence de phase produit une figure d'interférences.

Les «interférogrammes» radar sont des images formées par l'attribution de couleurs, du rouge au bleu, aux différentes valeurs de la différence de phase. Les distances au radar de deux points situés sur deux franges de la même couleur et séparées par un seul cycle de couleurs ont varié d'une demi-longueur d'onde (on divise par deux, car l'onde parcourt la distance additionnelle à l'aller et au retour) l'une par rapport à l'autre entre les deux prises de vue. Pour les images prises avec le satellite européen ERS-1, cette différence est égale à 2,8 centimètres. Bien que les franges n'indiquent que les déplacements du sol perpendiculairement à la ligne de visée du satellite, ces images donnent des informations sur des étendues telles (typiquement 100 kilomètres par 100 kilomètres) qu'il faudrait des années de travail à des géologues pour obtenir le même résultat par des mesures de terrain.

Les deux images que nous combinons pour former un interférogramme sont prises à des instants différents, à partir de positions diffé-



6. LA GLACE située en bordure de l'Antarctique s'écoule dans la mer en suivant le lit d'une sorte de «fleuve de glace». Ce déplacement, qui suit la marée, est montré ici par la combinaison de deux images du satellite radar ERS-1. Deux bandes parallèles de glace fortement cisailée (les zones où les franges ne sont plus lisibles) marquent les bords de l'écoulement.

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

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).

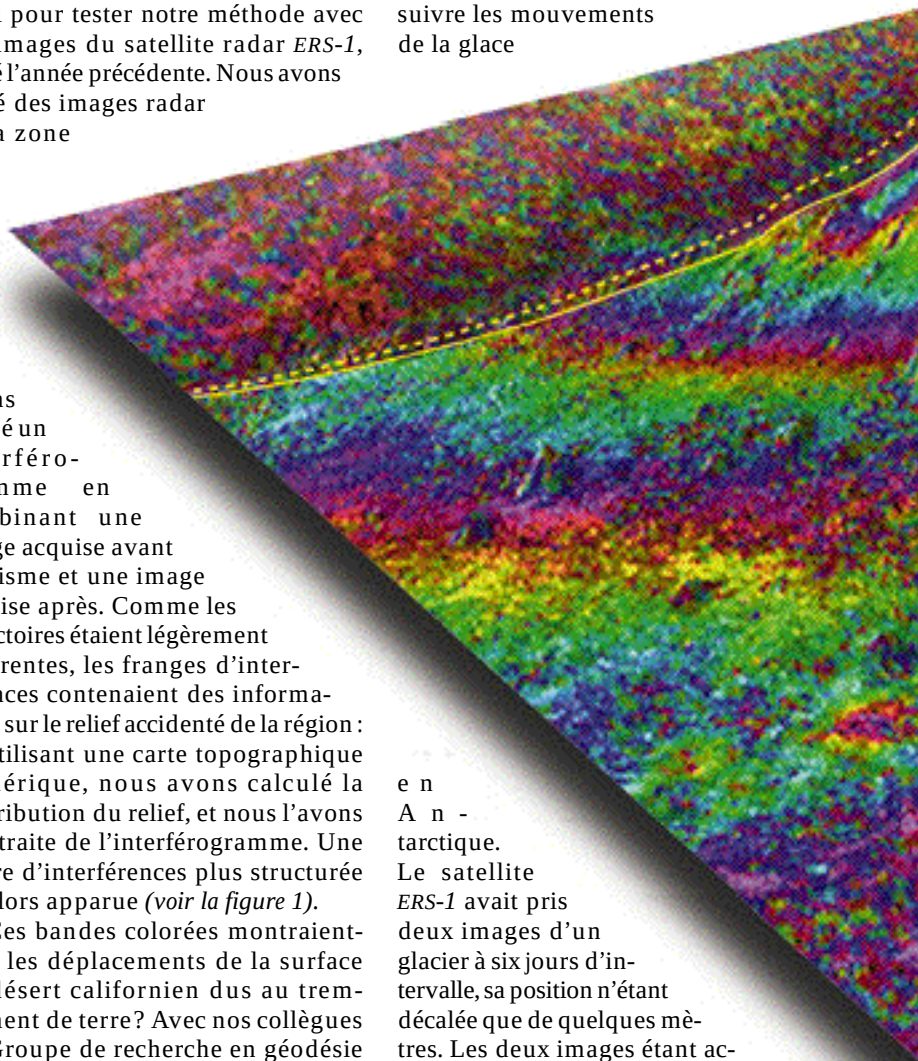
Ces bandes colorées montraient-elles les déplacements de la surface du désert californien dus au tremblement de terre ? Avec nos collègues du Groupe de recherche en géodésie spatiale de Toulouse, nous avons calculé les déformations de la croûte terrestre dans cette région à partir des mesures des déplacements 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.

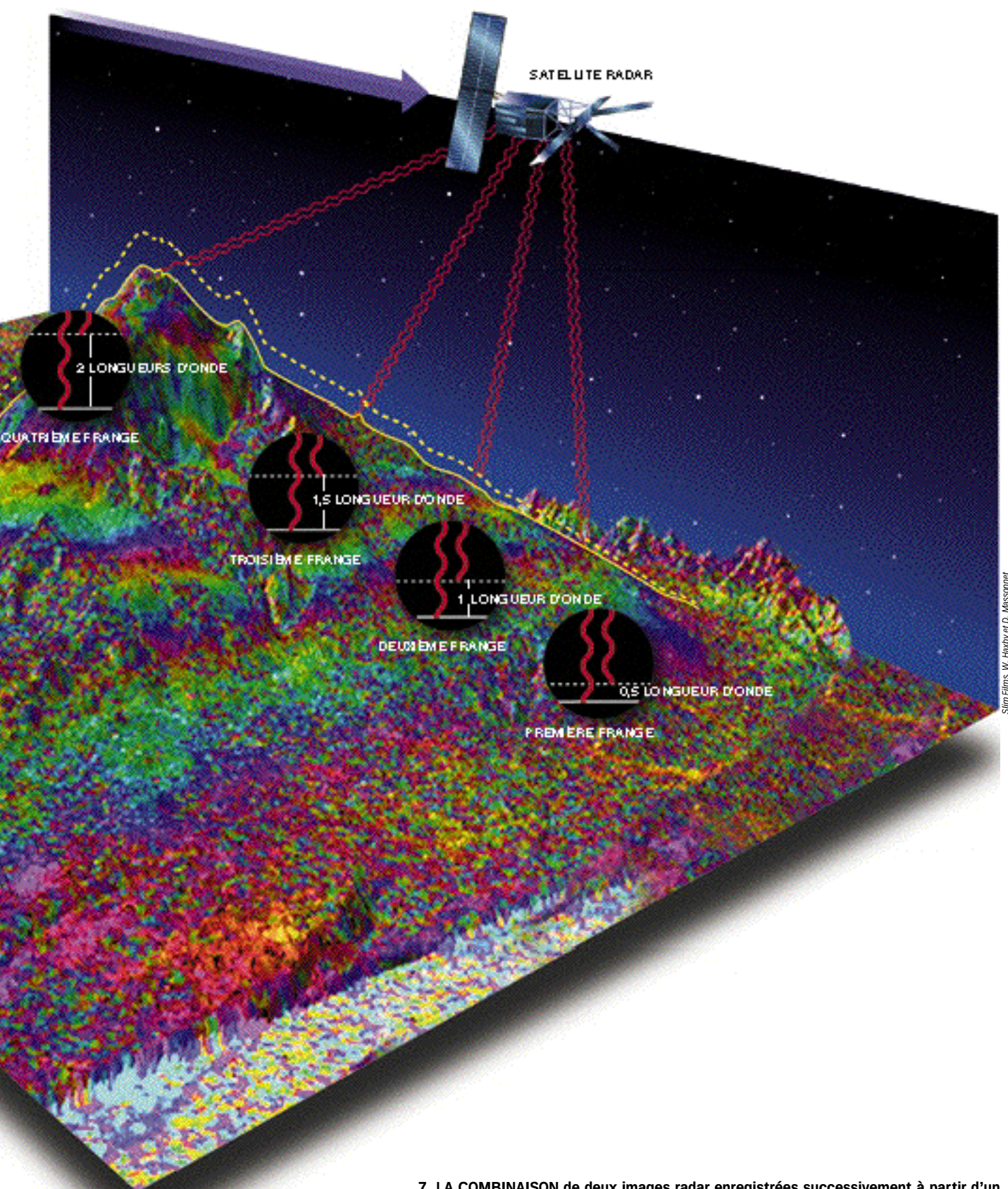
En outre, ce dernier montrait des détails nouveaux, telles de petites discontinuités sur des failles géologiques connues. Par exemple, sur notre interférogramme, à 100 kilomètres de l'épicentre du séisme, on distingue une discontinuité de sept millimètres, située sur une portion de faille de 20 kilomètres 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

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





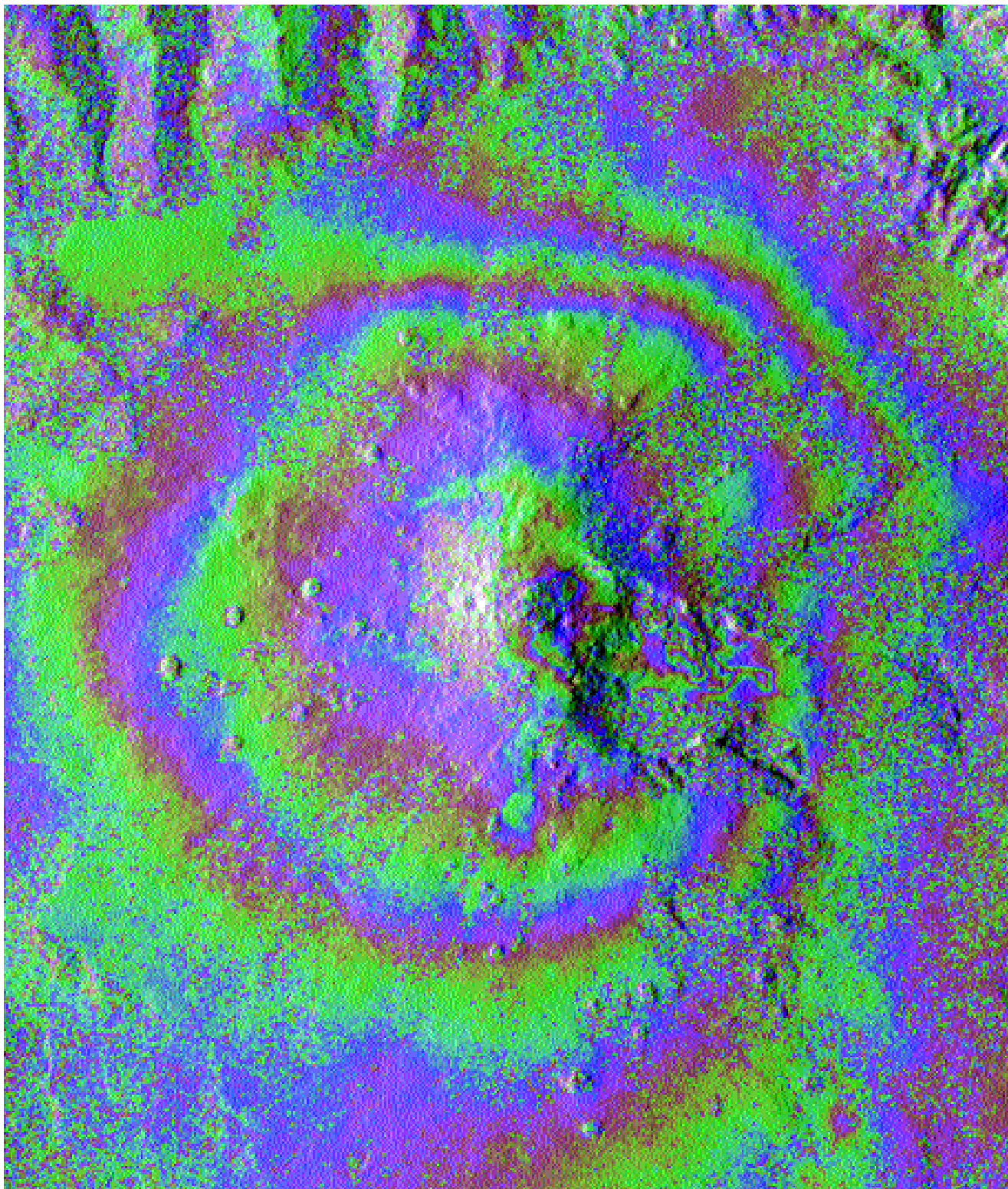
Slim Films, W. Haxby et D. Massonnet

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.

L'émergence précoce du Néolithique au Sahara

GINETTE AUMASSIP

Il y a plus de 9 500 ans, dans le Sahara, des hommes prennent conscience qu'ils peuvent agir sur leur environnement. Ils fabriquent de la poterie, développent l'agriculture et l'élevage, et peignent leurs activités sur les roches.

Les préhistoriens ont longtemps pensé que le Croissant fertile, qui s'étend de la Méditerranée au Golfe persique, avait été le seul lieu d'émergence du Néolithique. Dans cette région, l'homme invente l'agriculture au cours du VIII^e millénaire avant J.-C. Il sème des graminées, pratique l'élevage et fabrique des poteries. Au Paléolithique, l'homme vivait de chasse et de cueillette. Au Néolithique, de prédateur, il devient producteur.

Ce nouveau mode de vie diffuse. Vers l'Ouest, une voie terrestre achemine le Néolithique jusque dans le Bassin parisien, en passant par le Nord des Balkans et par le bassin du Danube. Plus rapide, une voie maritime qui traverse l'Adriatique atteint la Méditerranée occidentale au VI^e millénaire avant J.-C. Franchissant le détroit de Gibraltar, le Néolithique se développe sur une étroite frange du littoral méditerranéen de l'Afrique, sans dépasser Oran à l'Est.

Ailleurs dans le Maghreb règnent des cultures dont les outils et les armes sont plus complexes qu'au Paléolithique : ils sont notamment formés de l'assemblage de petites pierres taillées. La mieux connue de ces cultures, le Capsien, s'étend sur les Hautes Plaines constantinoise et tunisienne. Dans les régions méridionales subsistent des cultures paléolithiques.

Selon ce scénario, le reste de l'Afrique ne découvre le Néolithique qu'à partir du IV^e millénaire avant J.-C. Les techniques et le mode de vie caractéristiques de cette période semblent importés de la vallée du Nil,

où on en trouve des traces à partir du VI^e millénaire. Les modalités de cette importation sont toutefois imprécises : contact, invasion... on ne sait.

Ce déroulement est contredit pour la première fois en 1965, lorsque Jean-Pierre Maître découvre dans l'Ahaggar, vaste massif montagneux du Sahara central, des fragments de poterie de plus de 9 000 ans. Les fouilles menées depuis sur de nombreux sites confirment cette ancienneté : dès le VIII^e millénaire avant J.-C., la poterie est répandue sur une grande partie du Sahara central. Ces vestiges sont les plus anciennes traces de l'agriculture dans la région.

Ces découvertes ont conduit les préhistoriens à préciser les caractéristiques essentielles du Néolithique : plutôt qu'une révolution technique ou économique, c'est la période où les hommes prennent conscience de leur pouvoir sur le milieu. Ce changement de pensée est perceptible par une nouvelle maîtrise technique, par l'invention de la poterie et par la place prépondérante de l'homme dans l'art rupestre. Dans le Sahara, les preuves directes d'activités pastorales ne sont abondantes qu'après 5 500 avant J.-C., mais nous savons que les populations sahariennes, sédentaires ou nomades, ont cultivé la terre et ont pratiqué l'élevage à partir du VIII^e millénaire avant J.-C. Cette culture s'est développée pendant cinq millénaires, avant de disparaître à cause de l'aridité qui règne encore aujourd'hui dans cette région.

Qu'est-ce que le Néolithique ?

Comment définir le Néolithique ? Pour les préhistoriens, ce fut d'abord « l'âge de la pierre polie ». Des haches ou des herminettes, sortes de houes, produites par polissage de pierres dures, suffisaient à distinguer le Néolithique du Paléolithique, « âge de la pierre taillée ». Ces outils correspondaient à de nouvelles pratiques : travail du bois et défrichage pour les haches, travail de la terre pour les herminettes. En Afrique, où la pierre polie est rare et où des haches et des herminettes polies sont réutilisées jusqu'à l'époque actuelle, leur présence n'est toutefois pas significative.

Le Néolithique fut ensuite « le moment de la sédentarisation ». Cette idée reposait sur deux postulats. D'une part, les chasseurs-cueilleurs du Paléolithique auraient erré sans cesse à la recherche de leur nourriture. D'autre part, l'homme ne développerait l'agriculture qu'en vivant en permanence sur le même lieu, ce dont témoigneraient des constructions en matériaux non périssables. Au Proche-Orient, où un tel habitat construit « en dur » existe depuis plus de 10 000 ans, on supposait que la sédentarité, épuisant les ressources du milieu, avait engendré un besoin de production, donc l'agriculture.

Sédentarité et pratique de l'agriculture ne sont toutefois pas synonymes. En zone aride, des populations nomades actuelles ensemencent les terres inondables et n'y reviennent qu'au moment de la récolte. Au