

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

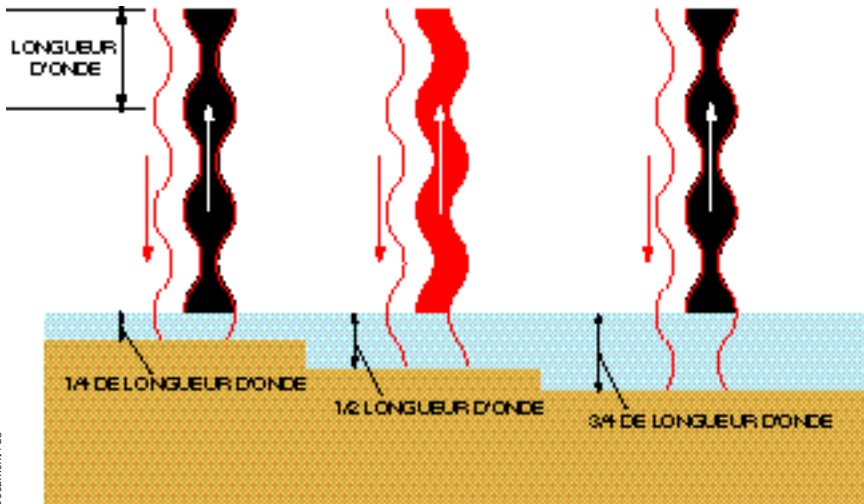
réfléchi par cette surface est la combinaison des ondes réfléchies par toutes les cibles élémentaires qu'elle contient, cailloux, rochers, branches, feuilles et, plus généralement, tout objet présentant des aspérités. Comme toutes ces réflexions se combinent de manière imprévisible, la phase pour un 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.

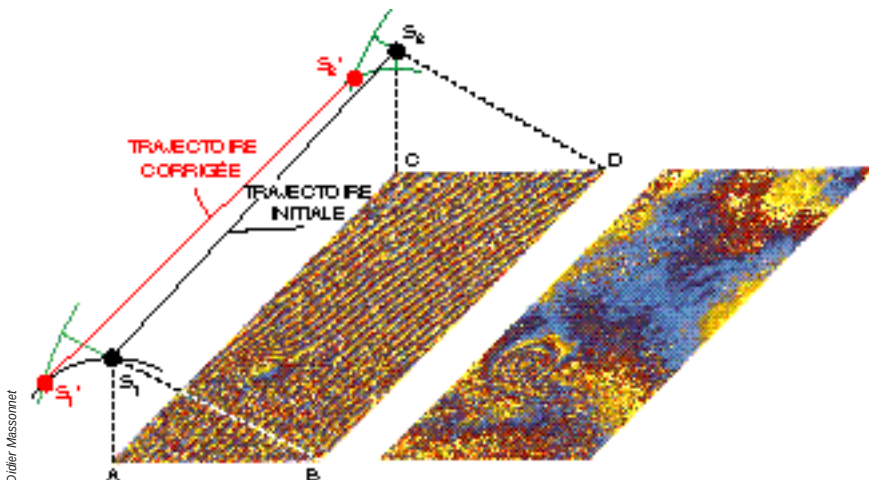
Le scintillement des images radar est atténué par le calcul de la moyenne des amplitudes des pixels voisins. Cette opération est faite au détriment de la précision des images. Celles-ci ressemblent ainsi davantage aux photographies aériennes en noir et blanc. Toute information sur la phase des pixels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

Les richesses de la phase

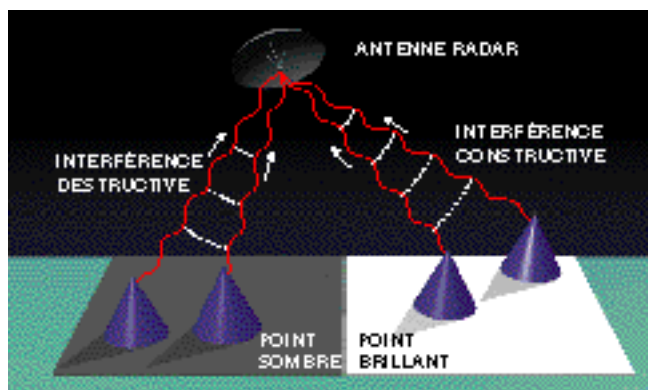
Le premier qui parvint à utiliser cette information fut L.C. Graham, de la Société Goodyear Aerospace : en 1974, il démontra que l'on peut mesurer la topographie du terrain à l'aide des phases mesurées par un radar aéroporté, équipé de deux antennes. Puis, dans les années 1980, une équipe du Laboratoire 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.



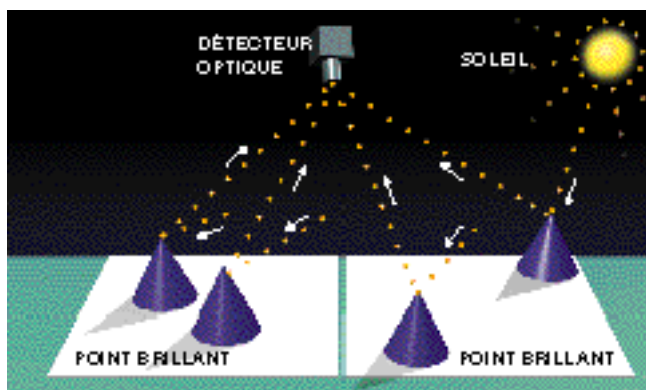
2. LES ONDES RÉFLÉCHIES par les deux faces d'une lame de verre interfèrent différemment selon l'épaisseur de la lame. L'onde réfléchi par la face inférieure parcourt une distance supplémentaire égale au double de cette épaisseur. Lorsque cette dernière est un multiple entier de la demi-longueur d'onde (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 minimes dans la disposition des objets peuvent donc modifier considérablement la brillance d'un point d'une image radar.

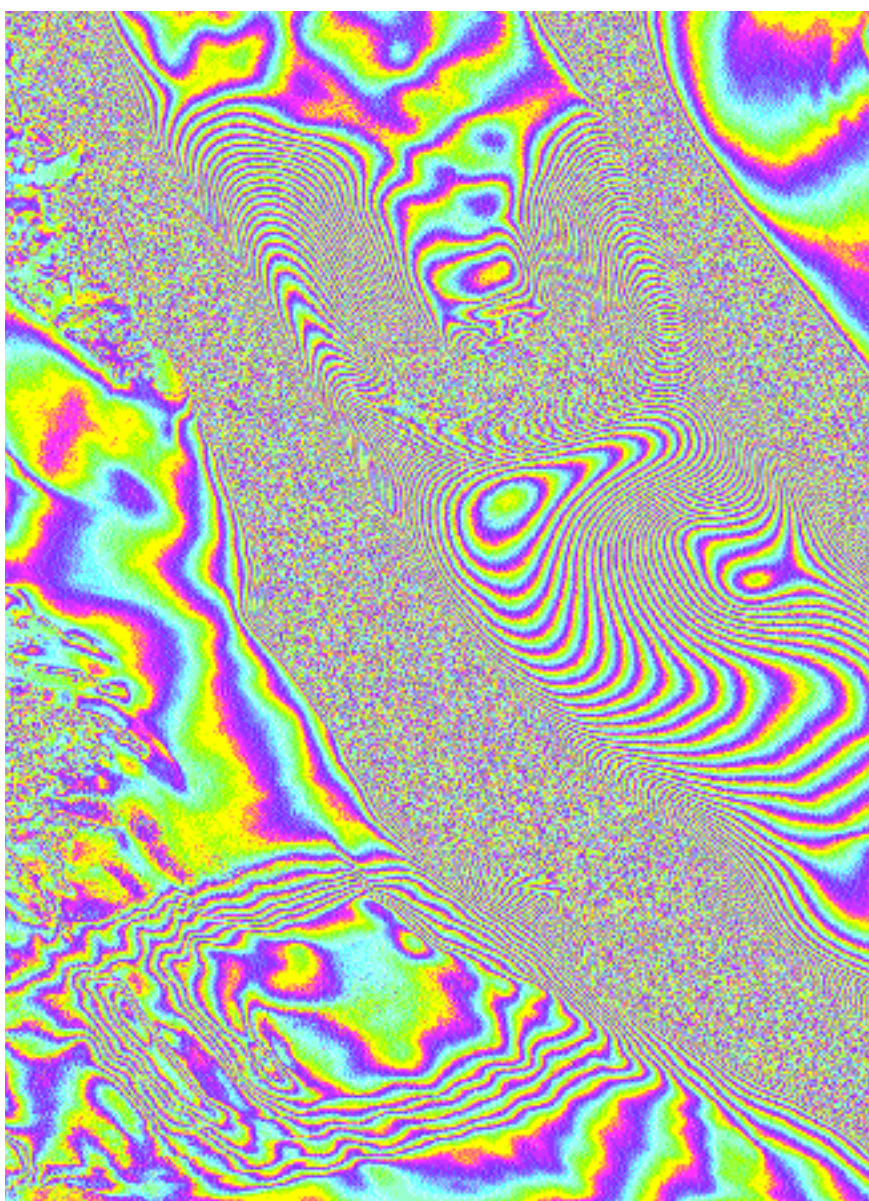


5. UN COUPLE D'OBJETS réfléchit toujours à peu près le même nombre de photons vers l'instrument, quelle que soit la position de ces objets dans la surface observée. La luminosité de celle-ci ne varie donc pas lorsque les objets sont légèrement déplacés.

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

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

