

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

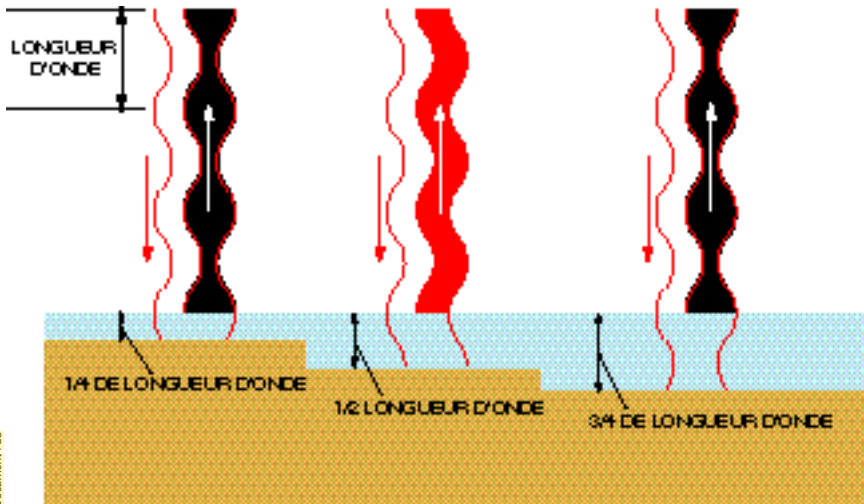
réfléchi par cette surface est la combinaison des ondes réfléchies par toutes les cibles élémentaires qu'elle contient, cailloux, rochers, branches, feuilles et, plus généralement, tout objet présentant des aspérités. Comme toutes ces réflexions se combinent de manière imprévisible, la phase pour un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

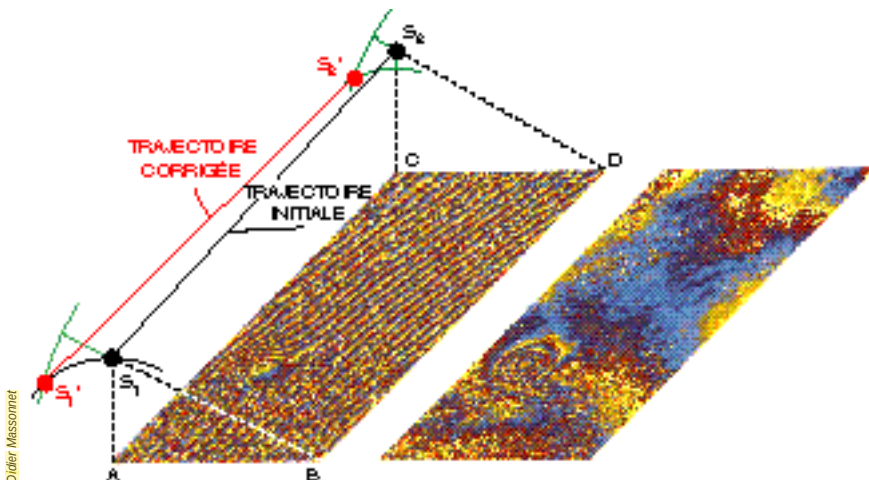
Les richesses de la phase

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.



Document A.S.

2. LES ONDES RÉFLÉCHIES par les deux faces d'une lame de verre interfèrent différemment selon l'épaisseur de la lame. L'onde réfléchie 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.



Diéier Massonnet

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).