

La télésurveillance par interférométrie radar

Didier MASSONNET
Ingénieur en chef de l'Armement
Centre national d'Etudes spatiales
Département « Performances des systèmes Radar »

RÉSUMÉ

La surveillance de la déformation des ouvrages et des sites peut tirer parti des techniques d'interférométrie basées sur des images de radars en orbite. La théorie et les conditions de la mise en œuvre de ces techniques sont exposées après une brève présentation de l'imagerie radar et de ces propriétés géométriques classiques. Ces conditions expliquent la nécessité d'avoir recours à des capteurs aussi lointains que des satellites même pour des études qui peuvent être locales. Des alternatives recourant à d'autres porteurs sont envisagées. Les limites physiques de ces méthodes sont également présentées ainsi que leur corollaire, les limites logiques, qui cernent la capacité d'un utilisateur à discriminer, dans un jeu de résultats interférométriques, la part des phénomènes qui l'intéressent.

Les logiciels développés par le Centre national d'Etudes spatiales (CNES) sont décrits, ainsi que leur spécificité et leurs conditions d'utilisation. Un certain nombre de résultats, principalement obtenus sur de grands champs de déformation, sont exposés. Les quelques applications déjà réalisées sur des sites peu étendus sont discutées.

MOTS CLÉS : 53-61 - Surveillance - Radar - Déformation - Structure (constr.) - Traitement d'image - Capteur - Logiciel - Limite - Méthode - Mesure - Glissement (terrain) - Risque - Séisme - Volcan.

Les images radar

La possibilité de réaliser des images du sol par radar a été explorée dès la fin des années cinquante, mais l'utilisation scientifique en a véritablement commencé à l'occasion du satellite SEASAT (1978). Un radar est avant tout un moyen de mesurer la distance des objets, et les « images » des échos de sol ont été considérées comme des effets indésirables jusqu'à ce qu'on perçoive l'intérêt de faire la cartographie du sol, d'abord à des fins de détection, ce qui restait proche des utilisations usuelles, puis pour en analyser la radiométrie, ce qui ouvrait une nouvelle fenêtre d'observation.

Il fallait pour cela déplacer les radars vers des sites variés pour en assurer le balayage, et donc, le plus naturellement, les embarquer dans un avion [1]. La résolution en distance ne pose pas de problème particulier, il suffit de ranger les échos par leur temps de vol après émission d'une impulsion radar. L'avancement de l'avion a également un effet résolvant puisqu'il change le paysage observé. Si l'on veut séparer ces deux effets résolvants, et les faire travailler le plus efficacement possible en complémentarité, il faut que le radar regarde sur le côté de la trajectoire. La résolution latérale est alors obtenue par le rangement en distances croissantes des mesures du radar, la résolution longitudinale par le renouvellement du paysage observé par une antenne dont le pinceau doit être aussi étroit que possible. D'où le nom de radar à visée latérale. Cependant, quelle que soit l'étroitesse du pinceau, proportionnelle à la longueur de l'antenne, la résolution longitudinale se dégrade linéairement avec la distance. La figure 1 expose la géométrie de prise de vue d'un radar à visée latérale.

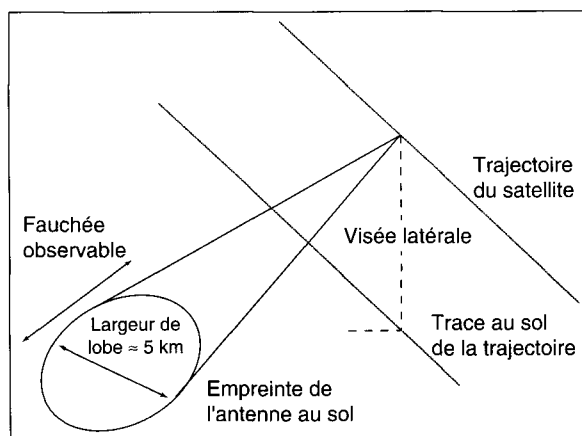


Fig. 1 - Géométrie de la prise de vue radar.

La résolution d'une image radar peut être obtenue par analyse du temps de vol des échos, ce qui produit une discrimination en distance, et par analyse de l'effet Doppler imprimé au signal par les cibles au sol, ce qui produit une discrimination dans le sens du vecteur vitesse du radar. Pour que ces deux principes résolvent se complètent efficacement, il faut que le radar « regarde » sur le côté.

Aspects opérationnels

La physique de l'observation par radar imageur repose donc sur l'utilisation d'un instrument actif dans une gamme de longueur d'onde telle que la plupart des effets atmosphériques (nuages, brumes, fumées et aérosols, etc.) sont traversés sans perte sensible de signal. Cette gamme va de la bande X (longueur d'onde de 3 cm) à la bande L (longueur d'onde de 24 cm), mais l'imagerie radar est restreinte à un certain nombre de fenêtres par les règles d'attribution des fréquences. Les images radar sont surtout connues pour leur insensibilité aux conditions météorologiques et leur capacité à travailler de nuit. Cette propriété suffit à leur garantir un très grand caractère opérationnel dans un rôle de détection, qui est essentiellement l'apanage des militaires, mais qui trouve également des usages civils, comme la surveillance de la progression des glaces en mer ou la détection des linéaments en géologie. Les espoirs suscités par l'utilisation scientifique de l'amplitude du signal sur les cibles étendues naturelles (telles que forêts et champs) trouvent eux aussi un encouragement dans la capacité tout temps de l'image radar, dans la mesure où elle permet la surveillance de phénomènes rapides, comme l'évolution des cultures, sans plus dépendre de l'aléa météorologique qui pénalise l'imagerie optique. Pour parfaire l'efficacité opérationnelle et acquérir une dimension planétaire, il devenait indispensable de placer le radar sur satellite.

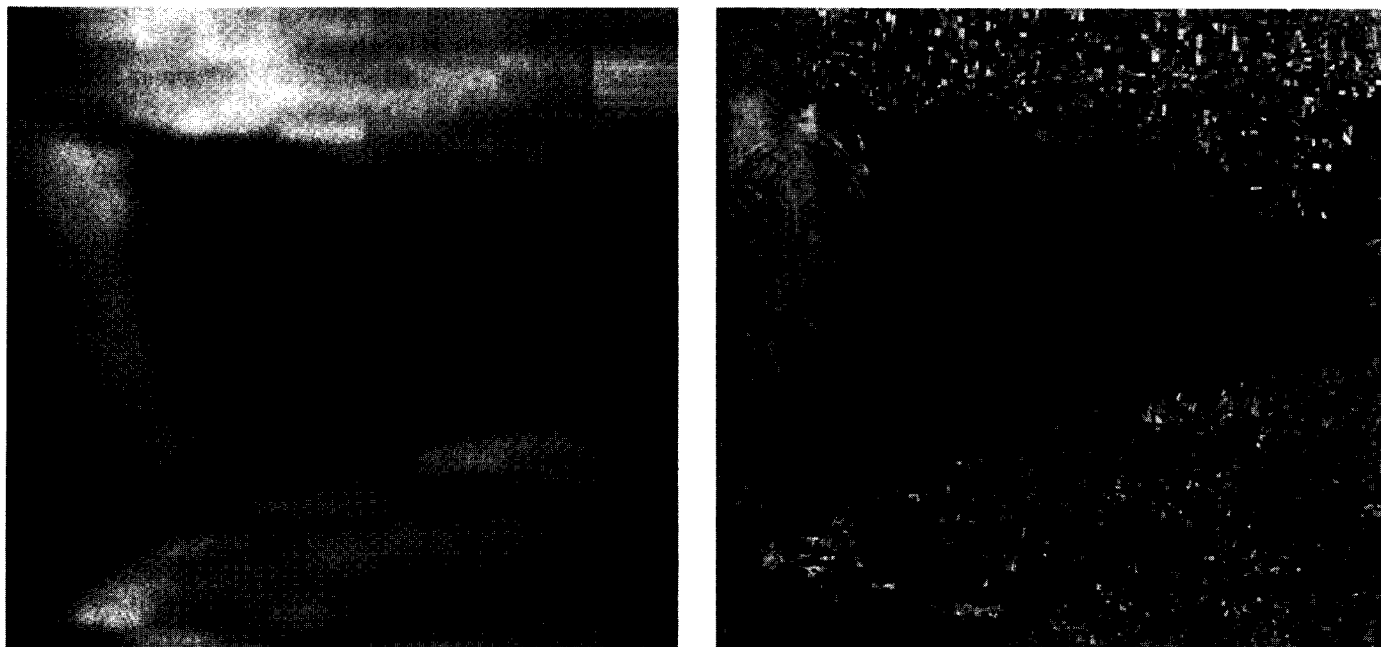
Synthèse et propriétés géométriques

La résolution naturelle d'un instrument radar en orbite est cependant très médiocre, en raison du rapport longueur d'onde/ouverture, très défavo-

rable par rapport aux systèmes optiques. En effet, même si « l'ouverture » du système atteint 10 m (taille de l'antenne), taille des plus grands télescopes optiques, la longueur d'onde est environ cent mille fois plus grande... On peut donc espérer, au mieux, une résolution naturelle de l'instrument équivalente à une dizaine de kilomètres au sol, si celui-ci est observé d'une distance de 1 000 km. Le passage au satellite changeait donc les règles du jeu et forçait le recours à la technique d'ouverture synthétique, déjà expérimentée sur avion, dont le principe est le suivant : le rythme d'émission des impulsions devient très supérieur à ce qui est nécessaire pour couvrir le sol. Par exemple, si l'empreinte au sol de l'antenne dans le sens d'avancement est de 5 km, on enverra des impulsions à un rythme tel que le satellite n'avancera que de 5 m entre chaque impulsion (compte tenu de la vitesse sol du satellite, ce rythme est donc de l'ordre de 1 kHz). On se trouvera alors devant le problème mathématique posé par une collection de signaux dont chacun mélange mille échantillons de 5 m, chaque échantillon participant à mille signaux. L'inversion de ce problème conduit, dans notre exemple, à reconstituer la contribution propre de chaque cellule de 5 m, par une technique similaire à l'imagerie médicale par rayons X. On montre que, pour que cette inversion soit possible, il faut que l'antenne soit au moins deux fois plus longue que la cellule élémentaire (donc qu'elle ait 10 m de longueur dans notre exemple). La figure 2 montre le changement spectaculaire de résolution apporté par la technique de synthèse d'ouverture. Notons au passage qu'un tel traitement nécessite quelques 300 milliards d'opérations...

L'introduction de cette technique de reconstruction mathématique a aussi profondément changé la nature géométrique de l'image radar. Chaque point de l'image est défini géométriquement par sa relation avec les vecteurs position et vitesse du satellite. En d'autres termes, les contributions des points du sol sont positionnées dans un référentiel défini par rapport à ces vecteurs, et ces positions sont indépendantes de l'orientation de l'instrument. Comme la position et la vitesse d'un satellite peuvent être très bien connus, les localisations des points d'une image radar sont caractérisées par une précision qui ne dépend que de la résolution de l'image, si l'on connaît l'altitude du terrain. En travaillant avec des images provenant d'orbites croisées, telles que celles acquises sur un même site de jour et de nuit (orbites dites « montantes » ou « descendantes »), on peut localiser un point reconnu sur les deux images sans connaître son altitude *a priori*. La précision géométrique des images optiques restera, par contre, encore longtemps tributaire de l'imprécision de la connaissance des angles d'orientation de l'instrument, qui force le recours à de nombreux points de contrôle.

Fig. 2 - Effet de la synthèse d'image radar



Une image ERS1 acquise sur la Crimée avant synthèse (à gauche) et après synthèse (à droite). La résolution naturelle d'un radar en orbite est très médiocre. Dans la direction de vol du satellite (de haut en bas sur l'image), elle est égale à la trace au sol de l'ouverture de l'antenne (5 km). Dans le sens perpendiculaire au vol (de gauche à droite sur l'image), elle est égale à la projection de la longueur d'impulsion émise par le radar (10 km). Le traitement restitue la résolution optimale en effectuant plusieurs centaines de milliards d'opérations, une performance aujourd'hui banale, à la portée de la moindre station de travail.

Alors même que la plupart des utilisateurs mettent désormais l'accent sur l'utilisation de l'amplitude radar à des fins d'analyse de l'environnement et insistent sur l'étalonnage de ce signal, l'image radar par satellite est un extraordinaire outil géodésique, capable de créer des banques de points cotés sur toute la planète sans aucune aide extérieure : une propriété des systèmes radar spatiaux qui n'est toujours pas reconnue ni utilisée à grande échelle.

Il ne faut cependant pas passer sous silence les difficultés liées au principe d'imagerie par distance croissante, en particulier le phénomène de recouvrement. Lorsque la pente locale du terrain est supérieure à l'angle d'incidence de l'onde radar, des points très différents du sol se retrouvent à la même distance du radar et leurs contributions se recouvrent. Cet effet est particulièrement gênant dans le cas de régions à fort relief observées sous des incidences faibles.

Propriétés de l'amplitude de l'image radar

L'amplitude de l'image radar est déterminée par la capacité du terrain à renvoyer l'énergie incidente vers le radar. Le principe de visée latérale est un élément très important de l'aspect des

images radar. C'est ainsi qu'une surface d'eau calme ne renverra aucun signal car elle agira comme un miroir renvoyant l'onde à l'opposé (on ne se voit pas dans un miroir lorsqu'on n'est pas devant). Si l'eau est agitée, elle contribuera au signal grâce à deux mécanismes : d'une part, la surface sera constituée de petites facettes moins directives (leur taille étant petite par rapport à la longueur d'onde), donc une partie de l'énergie pourra être émise en retour vers le radar. D'autre part, certaines de ces facettes pourront faire face au radar (surtout si celui-ci travaille à une incidence faible - cas d'ERS1). Le radar sera alors devant le miroir. La plupart des objets naturels sont caractérisés par la réflexion diffuse, qui renvoie une part plus ou moins importante du signal vers le radar. Les réflecteurs les plus efficaces sont ceux qui peuvent organiser une double réflexion agissant comme un jeu de miroirs à angle droit (principe de la Cataphote en optique). Ainsi, des arbres plantés sur un sol recouvert d'eau peuvent être très brillants, car la première réflexion sur l'eau est complétée par une seconde réflexion, sur les troncs, qui renvoie le signal vers le radar. Ce principe explique que des structures telles que les bords de trottoirs, de fenêtres, de toits, ainsi que les failles ou fissures au sol donnent un signal très

visible, y compris si ces dernières sont couvertes par une végétation pas trop dense que l'onde radar peut pénétrer. La pénétration du signal dans le sol est d'autant plus prononcée que celui-ci est peu conducteur, donc sec. Sécheresse signifiant absence d'eau liquide, on rencontre cette situation dans les déserts arides ou les surfaces de glaces très froides. Bien que quelques exemples spectaculaires aient été présentés, la pénétration des ondes radar reste anecdotique aux longueurs d'ondes utilisées couramment sur les paysages usuels, même par temps sec.

Propriétés de la phase de l'image radar

Comme tout signal radioélectrique, le radar produit une amplitude et une phase. En d'autres termes, les données sont des nombres complexes. Cette caractéristique est vitale pour le processus de reconstruction de la résolution que nous avons évoqué précédemment. La phase survit cependant à ce processus et l'image radar elle-même donne sur chaque point, en sus de l'amplitude, une phase. Celle-ci est la résultante d'effets si divers qu'elle en est inexploitable. L'analyse de la phase d'une image radar révèle, en effet, une répartition uniforme et aléatoire entre 0° et 360° . Comme on va le voir, la phase ne devient significative que lorsqu'on isole certains de ces effets par des comparaisons d'images radar.

La phase de l'image radar et l'interférométrie

L'impossibilité d'utiliser la phase de l'onde radar est regrettable d'un point de vue quantitatif, car elle constitue la moitié de l'information, et qualitatif, car elle contient évidemment les informations géométriques les plus fines, comme c'est le cas dans les techniques de GPS (Global Positioning System) ou de VLBI (Very Large Baseline Interferometry).

Principe de l'interférométrie

Le principe de l'interférométrie [2] est basé sur l'exploitation de différences maîtrisables entre images radar. Une condition essentielle en est la suppression de la contribution interne de la phase, c'est-à-dire sa partie aléatoire décrite au paragraphe suivant. Du point de vue du traitement d'image, il est nécessaire de créer des images parfaitement superposables sans altérer la valeur de la phase. Les précisions nécessaires dans les opérations de rééchantillonnage sont inhabituelles, et conduisent à limiter les erreurs à quelques centièmes de pixels et à utiliser des filtres interpolateurs complexes. Le résultat de ces étapes de traitement d'image est une image des différences de phase accompagnée d'une image

dite « de cohérence », qui est un indicateur de la fiabilité des mesures de phase, produit au cours du traitement.

La différence de phase n'est alors plus aléatoire, mais constitue un nouveau type d'image appelé interférogramme (fig. 3, 4, 5 et 6), constitué de « franges », dont chacune correspond à un tour complet de la phase, ou cycle, et qui contiennent les informations de l'interférométrie, c'est-à-dire des effets géométriques d'origine topographique ou orbitale, des effets de déplacements et des effets de propagation atmosphérique.

Contribution interne

La surface représentée, au sol, par un pixel d'une image radar contient, dans le cas général, des centaines de cibles élémentaires. Chacune de ces cibles contribue au pixel par un nombre complexe qui la caractérise en amplitude et en phase (les propriétés radioélectriques de la cible peuvent en effet induire un déphasage à la réflexion). La position relative de la cible à l'intérieur du pixel intervient également, dans la mesure où l'onde est plus ou moins retardée par rapport à une position de référence, par exemple le centre du pixel. Cette position relative se traduit donc par un déphasage qui peut prendre n'importe quelle valeur, la longueur d'onde étant beaucoup plus petite que celle du pixel (d'un facteur environ 300 dans le cas d'ERS-1). La phase résultante du pixel est donc celle d'un nombre complexe qui est la somme de centaines de nombres complexes dont aucun n'est connu ! Si l'amplitude croît statistiquement (encore que de façon stochastique) avec le nombre et la brillance des cibles élémentaires, la contribution « interne » au signal de phase reste désespérément imprévisible.

La seule solution est donc d'éliminer cette contribution par différence des phases de deux images, afin d'avoir accès aux autres contributions du signal de phase, ou du moins à leur évolution entre deux images. La condition est évidemment que les cibles élémentaires soient stables. Nous reviendrons sur cette condition, automatiquement vérifiée lorsque les deux images sont prises au même instant. Une autre condition, plus géométrique, est que l'inévitable différence de point de vue entre les deux images ne change pas la manière dont les cibles élémentaires interagissent à l'intérieur d'un pixel. Pour cela, il ne faut pas que le pixel soit étiré ou comprimé de plus d'une fraction de longueur d'onde d'une image à l'autre, sans quoi la somme de nombres complexes évoquée au paragraphe précédent changera totalement de phase d'une image à l'autre et nous ne pourrions plus l'éliminer par différence. En d'autres termes, si L représente la longueur perpendiculaire à la trajectoire, au sol, d'un pixel (environ 20 m sur le satellite ERS-1), λ la longueur d'onde (56 mm

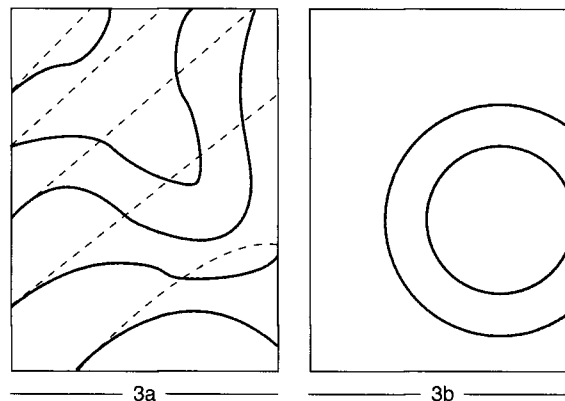
pour ERS-1), et i_1 (resp. i_2) l'angle d'incidence local de l'onde sur le pixel de la première (resp. deuxième) image. Le pixel sera vu « en distance aller-retour » par le radar comme : $2L \cdot \sin(i_1)$ et la condition s'exprime par : $2L |\sin(i_1) - \sin(i_2)| < \lambda$.

Cette relation limite sévèrement l'écart orbital tolérable lors des deux prises de vue. Celui-ci doit rester inférieur à 1 km (ERS-1). Fort heureusement, les orbites des satellites sont conçues pour se répéter à l'identique au bout d'une période appelée cycle orbital, avec une précision souvent meilleure que le kilomètre.

Contribution des trajectoires

Dans l'image des différences de phases, maintenant débarrassée de la contribution interne, l'essentiel de la différence de marche observée correspond au changement de point de vue et à l'évolution des trajectoires orbitales lors des deux passages du satellite. Ces dernières sont en principe connues, et l'essentiel de cette contribution peut être éliminé afin de révéler de façon plus claire les contributions sous-jacentes, en général beaucoup plus intéressantes (déplacements, topographie...). D'après le paragraphe précédent, les images ne peuvent se décaler d'une longueur d'onde (c'est-à-dire une frange) par pixel, sous peine de perdre l'effet interférométrique. Comme une image peut être large de 6 000 pixels, il est clair que la différence de point de vue peut couramment créer plusieurs centaines de telles franges. La convergence ou la divergence, même limitée à quelques dizaines de centimètres, des trajectoires orbitales le long de l'image, peut également créer plusieurs franges ou plusieurs dizaines de franges. Une fois que toute la connaissance *a priori* des orbites a été utilisée pour éliminer ce type de contribution, il peut rester des franges résiduelles du type de celles schématisées sur la figure 3, où nous supposons qu'un effet dynamique est superposé. Un simple comptage des franges aux quatre coins de l'interférogramme permet alors de créer une modélisation plus fine des orbites et d'isoler les autres effets, comme expliqué sur la figure. Deux remarques s'imposent à ce stade : d'une part, une retombée de cette opération de « réglage orbital » est la connaissance du second passage par rapport au premier avec une précision centimétrique. Une performance dont peu de moyens de calcul d'orbite peuvent se prévaloir. D'autre part, seule une trajectoire aussi extraordinairement régulière que celle d'un satellite peut être affinée avec seulement quatre paramètres. Même s'il est possible de réaliser une prise de vue à deux passes avec un avion, pour lequel les conditions de respect des angles d'incidences locaux constituent déjà

Fig. 3 - Exemple de franges orbitales à supprimer



La figure 3a montre le signal dynamique occulté par des effets orbitaux incomplètement éliminés (0 et 3 franges en haut, 4 et 5 en bas). Les pointillés montrent ce qu'auraient été les franges orbitales en l'absence de signal dynamique.

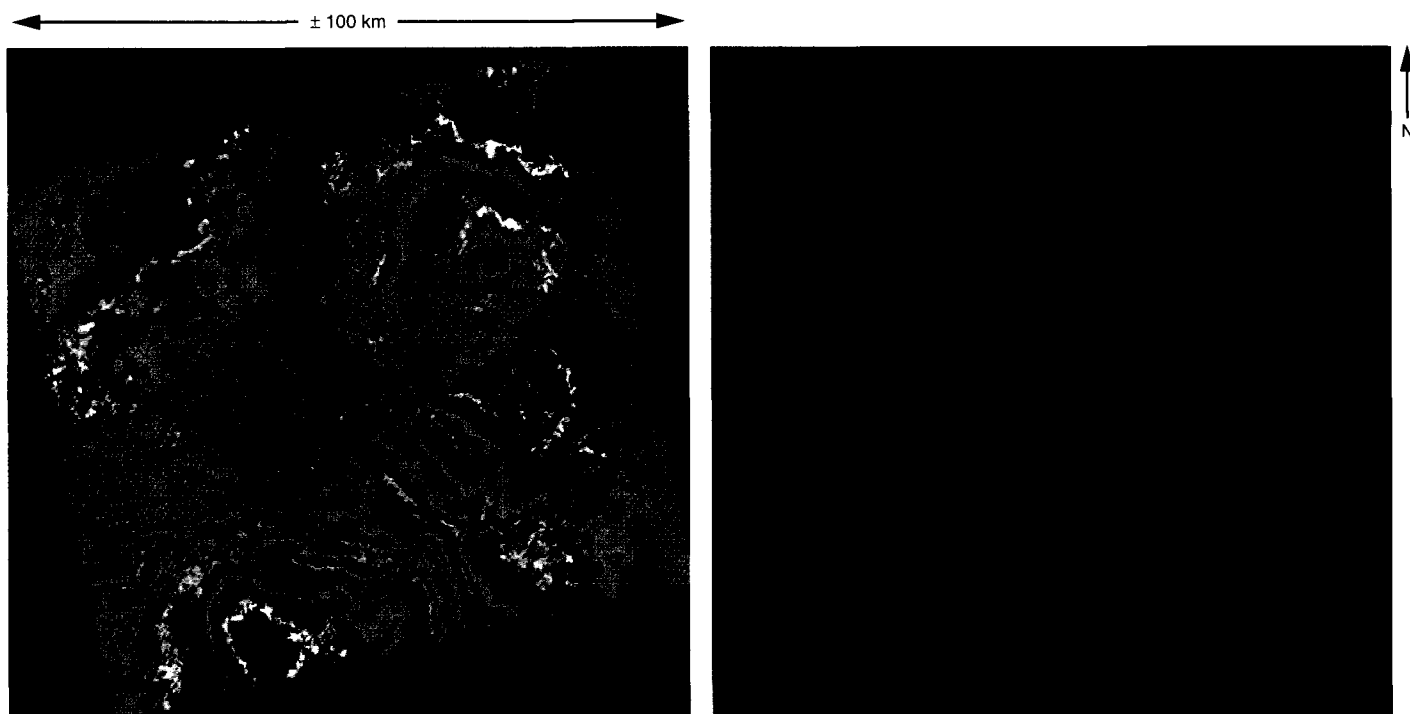
La figure 3b montre le signal dynamique après correction de ces effets.

un tour de force, les moyens de restitution de la trajectoire ne permettent pas d'éliminer la contribution « orbitale ».

Contribution de la topographie

Une fois que les différences de marche dues aux trajectoires ont été soustraites de l'interférogramme, ce qui en suppose une connaissance *a priori* ou affinée (cf. paragraphe précédent) ainsi qu'une hypothèse sur la forme du terrain (par exemple l'ellipsoïde terrestre), il reste la contribution de la topographie [3]. Le terrain est observé sous un point de vue légèrement différent dans les deux images radar, ce qui donne lieu à une sorte d'effet stéréoscopique dans le détail duquel nous n'entrerons pas. Nous nous contenterons d'observer que la topographie change la pente du terrain, donc l'incidence locale de l'onde, ce qui conduit à des effets similaires à la contraction évoquée précédemment, donc à la création de « franges de relief ». Il est commode, pour donner des ordres de grandeur, d'utiliser la notion d'altitude d'ambiguïté, ou changement d'altitude nécessaire pour produire une frange de relief. Dans le cas, assez typique, du satellite ERS-1, celle-ci peut aller de l'infini, dans le cas où le satellite serait repassé exactement au même endroit lors des deux prises de vue (il n'y a alors pas d'effet stéréoscopique) à des valeurs de l'ordre de 10 m, lorsque l'écart orbital est le plus grand que puisse tolérer la technique interférométrique (soit environ 1 km, effet stéréoscopique maximal). La figure 4 illustre le calcul d'un modèle numérique de terrain par interférométrie.

Fig. 4 - Mesure de la topographie par interférométrie



Deux images ERS1 séparées par six jours ont été utilisées pour produire l'interférogramme de gauche. Les images choisies correspondent à des orbites très écartées (environ 1 km), proches de la limite de l'effet interférométrique, mais de sensibilité maximale à la topographie (altitude d'ambiguïté de 10 m).

L'interférogramme a été transformé en modèle numérique de terrain (à droite) par la société ISTAR sous contrat du CNES. Une analyse détaillée de ce produit révèle des détails submétriques.

Contribution des déplacements

Enfin, lorsque la topographie est connue, on peut envisager, en la combinant avec l'information de trajectoire, de supprimer sa contribution [4]. On obtient alors les éventuels déplacements dans la ligne de visée. C'est naturellement cette application que nous avons particulièrement développée, car elle correspond à une possibilité unique. Il y a bien d'autres manières de calculer les trajectoires orbitales et la topographie, mais établir la cartographie des mouvements avec une précision de l'ordre de la fraction de longueur d'onde, selon la manière dont le rapport signal à bruit ou la lisibilité des franges permettent de « couper en tranches » la longueur d'onde, offre des perspectives vertigineuses, y compris opérationnelles, dans la mesure où aucune instrumentation sur le terrain n'est requise. Tout déplacement d'une partie du paysage s'inscrit directement comme un décalage de phase, détectable par rapport à la stabilité de la phase sur le reste du paysage, alors que la topographie est vue par une base stéréoscopique très faible (moins de 1 km), ce qui explique que la précision du calcul topographique soit « seulement » métrique. Si un groupe de pixels s'éloigne de 1 cm sur l'axe du radar, entre les deux prises

de vue, la distance aller-retour va changer de 2 cm, soit près de 40 % d'une longueur d'onde (pour ERS-1). Cet écart est aisément détectable. En pratique, tout éloignement ou rapprochement, sur l'axe de visée, d'une demie longueur d'onde crée une frange (soit 28 mm pour ERS-1). La figure 5 montre comment le champ de déformation produit par un tremblement de terre est vu par interférométrie [5]. Des ruptures du réseau de franges indiquent également la présence de glissements de faille, très vraisemblablement causés par le tremblement de terre principal. Les plus petits glissements repérés ne font que quelques millimètres [6].

Contribution atmosphérique

L'état de l'atmosphère n'est pas identique si les deux prises de vue sont effectuées à des moments différents. Comme cette situation est indispensable pour détecter les déplacements, l'hétérogénéité de la troposphère ou de l'ionosphère combinée sur les deux dates interviendra dans le calcul de la différence de marche en causant des variations d'épaisseur atmosphérique. Nous avons maintenant plusieurs exemples d'effets

dans la troposphère [7], que nous avons pu relier à la présence de nuages d'orage en formation causant de la turbulence ou à des ondes de pression dues à l'interaction de vents d'altitude et de relief [8]. Ces effets se traduisent par un allongement du trajet des ondes sur l'image concernée. Il existe également des effets de raccourcissement du trajet que nous attribuons à l'ionosphère [7], causés par des neutralisations locales et un abaissement de la densité électronique. Enfin, même un changement homogène de l'atmosphère (pression, humidité et température), qui passerait normalement inaperçu car l'interférométrie fournit une mesure relative, peut être révélé par un fort relief, qui module l'épaisseur de troposphère que le signal doit traverser [8].

Autres contributions

D'autres contributions au contenu en phase de l'image ont été observées. Elles peuvent être d'origine purement technologique, comme l'instabilité de l'oscillateur du radar [9]. Dans tous les systèmes actuels, celui-ci est en effet conçu pour permettre la synthèse de l'image, c'est-à-dire pour maintenir une cohérence stricte de l'instrument pendant des durées typiques de l'ordre de la seconde. Au-delà, des changements lents de la fréquence peuvent apparaître. On observe alors, sur de longs segments où les données ont été combinées par interférométrie, des réseaux de franges perpendiculaires à la trace du satellite, et qui correspondent à l'interférence de l'instrument avec lui-même. La correction de cet effet, obtenu par une amélioration des oscillateurs, ne pose aucun problème de réalisation, mais doit être dorénavant pris en compte dès la conception des missions radar.

On peut également imaginer que le déphasage de l'onde lors de sa réflexion sur le sol puisse changer en fonction des caractéristiques radio-électriques du sol, elles-mêmes liées aux conditions d'humidité. De tels effets ont été détectés [10] et, bien qu'ils soient encore mal compris, pourraient faire déborder l'interférométrie de son cadre géométrique et géodésique actuel, et lui trouver des applications dans le domaine de la surveillance de l'environnement végétal.

Les limites de la mesure interférométrique

Nous avons défini le domaine de validité géométrique de l'interférométrie, capable de mesurer les déplacements relatifs du sol le long de la ligne de visée pourvu que l'écart orbital des deux prises de vue soit compris entre certaines bornes. Les limites de cette technique peuvent prendre d'autres formes.

Conservation de surface

Une condition essentielle à la suppression, par différence des phases de deux images, de la contribution « interne » est que celle-ci soit restée stable. Les cas extrêmes sont les surfaces recouvertes d'eau, qui n'ont aucune stabilité. Il en est de même, par exemple, du littoral soumis à la marée. Les surfaces agricoles, périodiquement retravaillées, ne peuvent être considérées comme stables sur des périodes supérieures à quelques jours. Il n'est, cependant, pas exclu que certaines cibles stables, telles que bornes, fossés ou clôtures, subsistent dans un paysage agricole et permettent un effet interférométrique partiel, mais à long terme. L'autre extrémité de la condition est constituée par les surfaces très stables, telles que les étendues rocheuses ou les zones urbaines, si l'on fait abstraction des véhicules, de contribution négligeable. D'autres zones préservent la phase malgré leur fragilité, parce qu'aucun facteur climatique ne vient les altérer. Tel est le cas des déserts sédimentaires arides (Atacama au Chili ou Mojave en Californie).

En dehors de ces cas, la stabilité de la surface dépend de façon critique du couvert végétal et de la manière dont le radar le perçoit. Les grandes longueurs d'onde sont capables de pénétrer une partie du couvert végétal et donc offrent un signal presque toujours constitué au moins partiellement par la contribution du sol. Selon la stabilité de la surface et l'aspect de la combinaison interférométrique résultante, on parlera d'interférogrammes plus ou moins cohérents (ce qui signifie que la réflexion en surface est restée cohérente d'une prise de vue à l'autre).

Gradient

La stabilité physique de la surface doit être complétée, comme on l'a vu, par une stabilité de perception, ou de point de vue, qui implique que les trajectoires ne soient pas trop éloignées. Cette condition se traduit par un gradient inférieur à une frange par pixel. Dans le cas des déplacements, il ne faut pas que le déplacement lui-même se charge de créer de tels gradients par une compression ou une extension physique du pixel. Cette situation n'est nullement invraisemblable et peut être observée sur la figure 5 au voisinage de la faille de Landers, locus d'un tremblement de terre de magnitude 7,3 qui a comprimé le sol de façon à le faire sortir des conditions interférométriques. Il ne s'agit pas d'un dérangement de l'état de surface lié à la secousse, car celle-ci n'était guère moins intense à 3 km de la faille (la rupture se prolonge jusqu'à 15 km de profondeur) et l'état de surface y est bien conservé.

Le gradient maximal que peut mesurer un interférogramme est aisé à calculer : il ne doit pas atteindre une frange par pixel soit $1/284$ ou 3.10^{-3} dans le cas d'ERS-1 (rapport de la taille de pixel et de la longueur d'onde). Cette valeur dépend du satellite (elle vaut 13.10^{-3} pour J-ERS). Dans les cas de mouvements progressifs, on devra veiller, dans le choix des écarts de temps entre images, à ce que le gradient limite ne puisse être atteint. Certaines déformations ne seront donc pas mesurables si elles créent un tel gradient en un temps plus court que le cycle orbital du satellite.

Ambiguïté

La phase ne fournit de mesure que modulo la longueur d'onde. Tous les résultats sont donc ambigus ; par exemple, la topographie se traduit par des franges qui ressemblent à des lignes de niveaux, mais qui ne portent aucun chiffre. Il s'est donc développé toute une série de méthodes pour « dérouler la phase », c'est-à-dire pour lui rendre un caractère absolu. Le problème est très simple à exposer, mais beaucoup plus difficile à résoudre. Le numéro relatif de deux franges doit évidemment être indépendant du chemin suivi sur l'interférogramme pour aller d'une frange à l'autre. Cette propriété est mise à profit pour contourner les zones difficiles, soit parce que les franges sont illisibles (perte de cohérence de la surface entre les prises de vue), soit parce qu'elles sont trop serrées (limite du gradient). L'ambiguïté n'est guère gênante en pratique pour l'étude des déplacements. Une zone stable, loin de la zone déformée, peut servir de référence, et la déformation ne crée en général que des franges peu nombreuses et peu serrées.

Continuité

Pour garantir une appréciation correcte de la mesure absolue des déplacements, il faut être capable de compter les franges, à partir d'un point ou d'une zone de référence, donc disposer d'une continuité spatiale de la mesure. Cette exigence souffre quelques exceptions : la traversée d'une rivière (non cohérente) dans une zone de gradient faible ne fait pas réellement peser de doutes sur le comptage des franges, la visualisation d'un glissement de faille (fig. 5) est renforcée plutôt que mise en péril par une discontinuité. Cependant, si l'on veut mesurer l'enfoncement ou la surrection d'une île, il faudra disposer d'au moins une mesure absolue (un point GPS, par exemple). Cette condition de continuité ne doit pas nécessairement s'exprimer sur une surface. Une continuité linéaire suffit. Ainsi, nous avons pu observer la continuité de la mesure de phase sur des ponts. Une ligne manifestement cohérente « traversait » un fleuve incohérent, où la phase

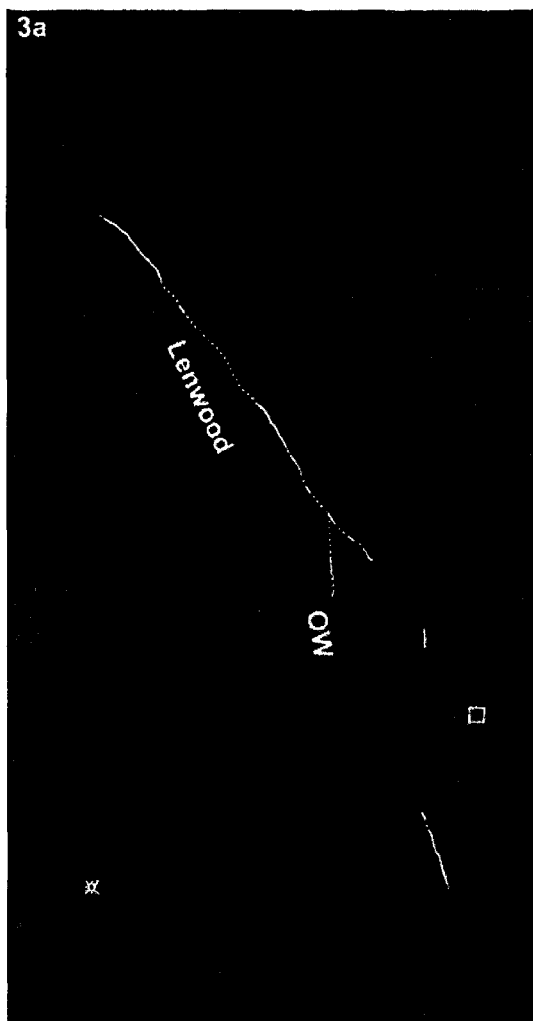
apparaissait comme un bruit ! Les ponts et barrages, ainsi que leurs déformations, peuvent donc être l'objet d'études par interférométrie radar à partir de satellites. Ils offrent en général des éléments assez brillants, au sens du radar, et régulièrement répartis (rambarde, réverbère, arches, etc.). Ces éléments de rapport signal à bruit élevé doivent garantir une lecture continue de la mesure, pour laquelle nous n'avons plus le choix du chemin à suivre, puisque nous sommes forcés de suivre l'ouvrage d'art d'une extrémité à l'autre. Des précisions de quelques millimètres sur les déformations peuvent être obtenues. Là encore, le gradient de déformation ne doit pas excéder la valeur limite d'un point au suivant. Le cycle orbital du satellite (*cf. infra*) impose également un rythme de surveillance maximal qui peut être inférieur au minimum nécessaire.

Interférométrie autre que spatiale

Il est bien sûr envisageable de mettre en œuvre la technique d'interférométrie à partir de capteurs autres que des satellites. On veillera cependant à conserver la technique de synthèse d'ouverture, qui seule permet d'obtenir des résolutions relativement fines avec des tailles d'antenne raisonnables. Nous devons donc explorer les possibilités d'embarquer un radar sur tout véhicule capable de passer par le travers de la zone à observer avec une vitesse relativement stable. Cette dernière condition nous conduit à éliminer les ballons et les bateaux, mais restent les avions, hélicoptères, camions, trains et téléphériques. Ces deux derniers moyens semblent condamnés par la rareté des parcours susceptibles d'être équipés, à moins qu'un système radar générique, autonome et compact ne soit développé, qui permette de travailler de façon opportuniste avec plusieurs porteurs en sélectionnant la meilleure « trajectoire » disponible pour l'observation. Un autre critère est la capacité de viser vers le bas, puisque beaucoup d'applications concernent des mouvements verticaux tels les subsidences. Sauf cas exceptionnels (ponts, parcours en corniche, etc.), seuls l'avion, l'hélicoptère et le téléphérique offrent cette visée. Viennent ensuite les conditions sur la répétition de trajectoire et sur sa restitution, que nous avons déjà évoquées.

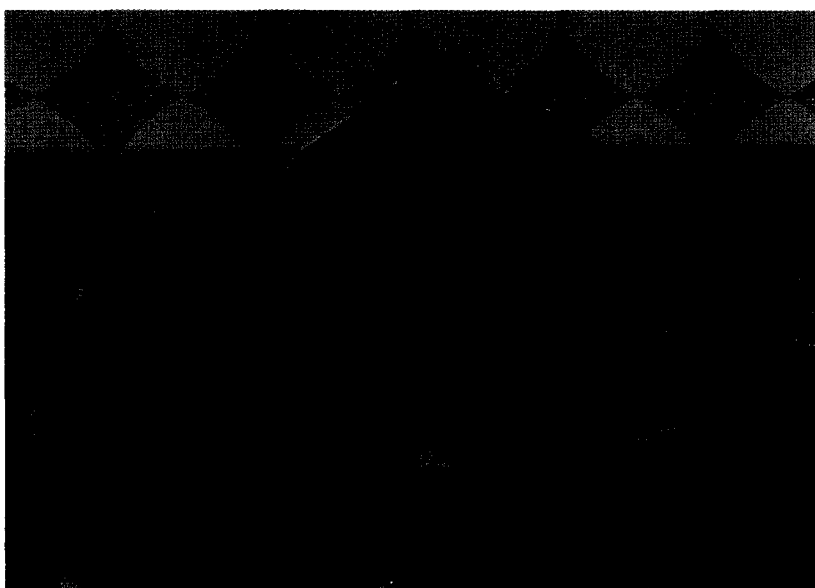
Les coûts et les conditions géométriques privilégient donc l'utilisation des satellites. Il n'est cependant pas exclu que les progrès des systèmes de navigation permettent la mise en œuvre à partir d'avions ou d'hélicoptères. Les coûts de ces opérations seraient de toute façon élevés. Il existe peut-être une possibilité relativement peu coûteuse basée sur un radar embarqué sur camion. Le respect approximatif de la trajectoire est aisé, sa restitution précise ultérieure est envisageable à partir d'un système d'imagerie

Fig. 5 - Mesure des champs de déformation



À gauche, on peut observer la partie centrale de la zone de déformation associée au séisme de Landers. La déformation est essentiellement continue, sauf au voisinage de la rupture au sol, où le gradient de déformation devient suffisant pour nous faire sortir du domaine de validité de l'interférométrie. On observe aussi une rupture du réseau de franges, d'une valeur maximale d'une demie frange, sur la faille Ide Lenwood, qui a donc glissé avec une amplitude dont la projection sur l'axe sol satellite vaut 14 mm. La déformation associée au tremblement de terre de Fanwnskin, qui s'est produit quatre mois après Landers, est également perçue sur cet interférogramme créé à partir de deux images ERS1 séparées par plus d'un an.

À droite, on peut observer, en perspective, la déformation du Mont Etna sur plus d'un an. La déformation au sommet est une déflation de 14 cm, à mi-hauteur du cône, elle n'est plus que de 11 cm (une frange en moins), et de 8 cm à la base de l'édifice. Le reste de la déformation est absorbé par la région environnante, ce qui s'expliquerait par une grande profondeur de la source de déformation. Les zones sombres correspondent à des pertes de cohérence du signal.



optique auxiliaire (surtout sur les portions de route avec ligne continue). Un tel système ne peut viser vers le bas, mais pourrait surveiller les glissements de terrain (surtout ceux qui menacent les routes) avec un rythme de surveillance très flexible. Le CNES pourrait tester prochainement une telle possibilité, sur un site de glissement de terrain.

Les moyens développés au CNES

Méthode

La méthode interférométrique que nous avons proposée il y a une dizaine d'années [4] est basée sur l'idée très simple qui consiste à tirer parti de toute l'information externe disponible sur un site, en particulier l'information topographique. Cette dernière intervient à plusieurs

étapes clés du traitement, et précisément en cinq étapes.

❶ Le recollage nécessaire entre les deux images radar dont on veut former un interférogramme doit être obtenu avec une précision égale à une petite fraction de pixel. Ce recollage nécessite des corrections à grande échelle ; erreur de datation du début d'image, erreur de distance du début d'image, différence globale de point de vue entre les deux images... et des corrections à petite échelle liées aux déformations, en général très inférieures à la taille du pixel, produites par le relief (il ne s'agit que de l'effet stéréoscopique classique rendu minuscule par la faiblesse de la base stéréoscopique permise en interférométrie). Même si, à ce stade du traitement, les orbites ne sont pas encore parfaitement connues, le gros de l'effet du relief peut être pris en compte et permet aux cellules de corrélations locales organisées sur toute la surface de l'image de coopérer

pour trouver les quelques paramètres de la déformation globale. Dans une seconde étape, les paramètres de la déformation globale, d'origine orbitale, couplés avec le modèle topographique, permettront de prédire la déformation locale, même aux endroits où la corrélation locale a échoué. On obtient une précision aussi bien locale que globale de l'ordre de quelques centièmes de pixel.

② Le positionnement absolu de l'une des images radar sur le site. Cette opération est réalisée par simulation d'une image radar dont l'amplitude dépend de la pente locale, que l'on corrèle ensuite avec l'image réelle. La précision obtenue est de l'ordre de la moitié de la cellule de résolution du modèle topographique utilisé. Cette précision est dégradée sur les terrains très plats, mais dans ce cas l'utilité du calage par rapport à la topographie décroît dans les mêmes proportions (du point de vue des franges résiduelles, mais pas de celui du positionnement absolu).

③ L'utilisation de filtres en fonction de la pente locale au cours du processus de fusion interférométrique entre les deux images. Ces filtres, qui améliorent considérablement les résultats, surtout dans les cas difficiles (pentes fortes), sont basés sur des considérations d'optimisation des réponses impulsives qui sortent du cadre de cet article.

④ La soustraction de la contribution topographique, après simulation des franges d'interférence attendues en fonction du relief. Il est à noter que l'on peut parfaitement soustraire un réseau de franges « non déroulées » d'un autre, il suffit d'oublier « la retenue » (qui agit sur des nombres entiers inconnus à ce stade). Cette démarche est extrêmement productive, même dans le cas où l'interférométrie est utilisée pour calculer la topographie. On a tout intérêt à tenir compte de la topographie telle qu'elle est connue, afin que les franges ne représentent que l'erreur commise sur cette dernière, qui aura quand même permis au traitement de tirer parti des trois aspects précédents.

⑤ La correction géométrique du produit final et son expression en coordonnées cartographiques ou géométriques. On ne peut pas demander aux utilisateurs non spécialistes du radar d'analyser le produit final dans une géométrie de distance au radar.

Le logiciel que nous avons développé selon ces principes peut fonctionner automatiquement, dans la plupart des cas, à partir des données brutes du radar (les moins coûteuses) et du modèle numérique de terrain jusqu'au produit final présentant les franges résiduelles dans un repère cartographique. Le produit comprend éga-

lement une combinaison des amplitudes des deux images radar sources et une image de cohérence, que l'on peut considérer comme une mesure locale de la fiabilité des mesures de phase. Ces deux dernières composantes sont livrées dans la même géométrie que le signal de phase résiduel. La sensibilité géométrique aux différents mouvements du sol est exprimée par un vecteur normé indiquant la projection du vecteur de visée moyen sur les axes est-ouest, nord-sud et bas-haut. Comparé à la plupart des produits d'analyse permis par le radar, le produit interférométrique est donc remarquablement simple, étant fondamentalement une mesure directe exprimée en unités de longueur et n'impliquant pas d'inversion ni d'étalonnage.

Disponibilité

Il est prévu de rendre disponibles les logiciels interférométriques du CNES, sous forme de deux licences d'exploitation, dont l'une serait à vocation commerciale et l'autre à vocation scientifique. Les logiciels s'appliquent à tous les types de radars spatiaux. L'utilisation de l'interférométrie par des groupes qui ne sont pas spécialisés dans le radar suppose la maîtrise de trois éléments :

- la sélection des images radar, qui dépend du choix disponible et des orbites associées, ainsi que de la date à encadrer si l'événement à mesurer est ponctuel dans le temps. Des éléments extérieurs, qui font appel à la connaissance du site, interviennent également. On peut citer les effets saisonniers (périodes de forte probabilité de présence de neige) couplés ou non à des caractéristiques du paysage (arbres à feuillage caduc ou permanent) ;
- le traitement des images radar est théoriquement réalisé de façon automatique par notre logiciel. L'avenir dira s'il est suffisamment robuste pour traiter sans intervention tous les cas ;
- l'interprétation des résultats nécessite une connaissance des différentes techniques de discrimination [7] qui permettent, si une série d'interférogrammes est disponible sur le site, d'identifier les effets liés aux erreurs topographiques, à la propagation atmosphérique ou aux déplacements. En pratique, il suffit d'avoir analysé quelques interférogrammes et d'y avoir reconnu les différentes signatures, ce qui peut s'acquérir en quelques jours.

Satellites utilisables

Les satellites utilisés jusqu'à présent pour les premières expériences sont :

- les satellites européens ERS-1, et son frère ERS-2, qui observent la Terre entière à la même heure locale sur un cycle de 35 j et sous un angle

d'incidence fixe dont la valeur au centre de l'image est de 23° . La longueur d'onde est de 56 mm. Une frange correspond donc à un déplacement de 28 mm dans la ligne de visée joignant le sol et le satellite. ERS-1 a également été placé, dans le passé, sur des orbites au cycle de 3 j, plus répétitives mais qui ne couvraient pas l'ensemble du globe. Les images provenant de l'un de ces cycles de 3 j (il y a eu deux cycles distincts) ne peuvent se combiner qu'entre elles. Il n'est pas prévu de nouvelles acquisitions selon l'un des cycles à 3 j ;

- le satellite japonais J-ERS1 observe lui aussi la Terre entière sur un cycle de 44 j, en bande L (24 cm), et sous un angle d'incidence moyen de 35° . En termes de déplacement, une frange correspond donc à environ 12 cm. Ce satellite produit des images de moins bonne qualité qu'ERS. Le rapport signal à bruit (S/B) est plus faible et le radar est sensible aux interférences causées par des radars au sol. La précision des mesures est donc plus faible à la fois parce que le cycle de phase correspondant à une distance quatre fois plus longue, et parce que l'on peut moins diviser que celui d'ERS-1, en restant significatif (car S/B est plus faible). En revanche, on peut espérer que le radar J-ERS1 sera moins sensible aux variations du couvert végétal, dans la mesure où la bande L pénètre la végétation dans une plus large proportion, ce qui devrait lui permettre de conserver une meilleure cohérence, surtout à long terme ;

- le satellite Radarsat, lancé par le Canada en novembre 1995, observe la Terre entière sur un cycle de 24 j, à plusieurs résolutions et sous un angle d'incidence variable. La longueur d'onde est à peu près identique à celle d'ERS-1. L'angle d'incidence variable permet une plus grande flexibilité et permet de travailler plus facilement dans le relief. En revanche, l'archive de Radarsat risque d'être plus disparate que celle d'ERS, car la multiplicité des modes de prises de vue et des angles d'incidence rendra beaucoup moins probable les longues séries d'images prises dans les mêmes conditions qui sont très favorables à l'application interférométrique. Le calage « 6h-18h » de l'orbite Radarsat fait que le satellite est éclairé par le soleil en permanence, ce qui est excellent pour ses panneaux solaires mais pourrait dégrader ses performances en interférométrie, en raison de l'activité ionosphérique maximale à ces heures ;

- la navette spatiale a effectué plusieurs missions équipée d'un ou de plusieurs instruments radar. Ces missions apportent une grande moisson de renseignements en raison des configurations radar variées que la navette peut explorer et de la grande puissance électrique disponible à bord. Les vols ne durent malheureusement que deux semaines au plus, et chaque tir coûte très cher. La navette ne peut donc être

considérée comme un moyen opérationnel de détection des déplacements.

Il est clair que les missions actuelles garantissent la faisabilité de l'interférométrie pour de nombreuses années. Il importera aux communautés concernées par l'interférométrie de faire en sorte que de telles missions soient poursuivies au-delà des missions prévues (poursuite de la série Radarsat, satellite Envisat de l'Agence spatiale européenne), si les autres usagers du radar ne s'en chargent pas. L'archive historique du système ERS, en bande C, introduit un standard de fait en interférométrie, par sa couverture planétaire qui constitue une véritable « mémoire de la Terre ». Même si la mission n'est pas totalement adaptée, en termes de longueur d'onde, d'orbite ou d'angle d'incidence, tout instrument spatial qui dupliquerait, vers 2005 par exemple, les caractéristiques de l'instrument, de l'orbite et de la visée d'ERS-1, permettrait d'utiliser les images ERS-1 avec des données fraîches et obtiendrait ainsi des évolutions du terrain sur quinze à vingt ans. Une telle continuité, même interrompue par des lacunes de quelques années, rendrait détectables des mouvements de l'ordre du millimètre par an.

Résultats en géophysique

La méthode interférométrique a trouvé un vaste champ d'application en géophysique, d'abord dans l'analyse des mouvements causés par des séismes, puis dans la surveillance des volcans. Des applications spectaculaires ont également été obtenues dans l'observation des mouvements des glaciers. Cependant, cette dernière application semble plus relever de l'étude des sites peu étendus, traitée au paragraphe suivant, car les glaciers géants de l'arctique ou de l'antarctique [11] sont des exceptions, au même titre que les cycles orbitaux courts (3 j) avec lesquels ils ont été observés. Les glaciers alpins par exemple sont assimilables, en taille et en vitesse de déplacement, à des glissements de terrain.

Le CNES a fait un effort particulier pour caractériser, en liaison avec différents laboratoires de géophysique, mais principalement avec le GRGS, à Toulouse, les mouvements produits par plusieurs tremblements de terre. Ces études ont commencé avec le séisme de Landers, cas idéal puisque :

- situé dans une zone désertique, donc propice au maintien de l'état de surface ;
- ayant causé un déplacement important ; jusqu'à 6 m au niveau du sol, ce qui correspond à plus de 1 m selon la ligne de visée, soit plus de trente cycles ;
- instrumenté par l'un des plus denses réseaux de surveillance conventionnels au monde (GPS

et sismique), ce qui rendait possible la comparaison des méthodes, et donc la validation de l'interférométrie. Cette étape était indispensable car nous avons eu l'occasion d'observer le scepticisme de la plupart des géophysiciens à l'égard de la méthode au cours des années précédentes. Il fallait plus que quelques équations pour les convaincre.

Nous avons obtenu des cartes de champ de déformation pour les séismes de Landers (Californie, magnitude 7,3, 28 juin 1992), Big Bear (Californie, magnitude 6,7, 28 juin 1992), Fawnskin (Californie, magnitude 5,2, 4 décembre 1992), Joshua Tree (Californie, magnitude 6,3, 23 avril 1992), Eureka Valley (Californie, magnitude 6, 17 mai 1993), Moonridge (Californie, magnitude 5,2, 12 juillet 1992), Northridge (Californie, magnitude 6,7, 17 janvier 1994), Latur (Inde, magnitude 6,2, 30 septembre 1993) et Arthur's pass (Nouvelle-Zélande, magnitude 6,7, 18 juin 1994). La plupart de ces cartes ont été publiées et ont fait l'objet d'analyses géophysiques détaillées afin de déterminer, aussi précisément que possible, le mécanisme au foyer des séismes [13]. La précision obtenue se compare favorablement à celle des méthodes sismiques dans les zones de réseaux denses. Elle est évidemment très supérieure en dehors de ces réseaux. Nous avons travaillé principalement avec des données du satellite ERS-1, mais aussi avec des données de J-ERS. Les données radar qui permettent une analyse quantitative d'éventuels mouvements avant un séisme sont rares. Les différents effets liés à la propagation dans l'atmosphère rendent, par ailleurs, difficile l'étude des phénomènes géophysiques d'amplitude inférieure au centimètre et dont l'extension spatiale est de l'ordre de la dizaine de kilomètres ou supérieure. Toujours est-il que nous n'avons jusqu'ici observé aucune déformation

présismique. L'étude des volcans donne plus d'espoir de signaux annonciateurs, en particulier le gonflement des édifices avant éruption, liés à l'augmentation des volumes et pressions internes. Nous avons observé, en collaboration avec l'USGS, le gonflement de la caldeira de Long Valley (Californie) et surtout, sur plus d'un an, le dégonflement du Mont Etna [12] vers la fin de sa dernière éruption, en collaboration avec l'IPGP (fig. 5). L'étude a permis des conclusions inattendues sur la profondeur de la source de pression (16 km). Il est tout à fait révélateur de la puissance de la technique interférométrique que l'on puisse apporter des éléments nouveaux à l'étude des sites les plus surveillés par les méthodes conventionnelles (Californie et Etna). Des résultats préliminaires nous indiquent que des volcans situés en milieu équatorial, tels que la Merapi (Indonésie), peuvent être étudiés par interférométrie. La surveillance glo-

bale et permanente de tous les volcans actifs de la Terre avec les données des systèmes spatiaux existants est une possibilité à court terme.

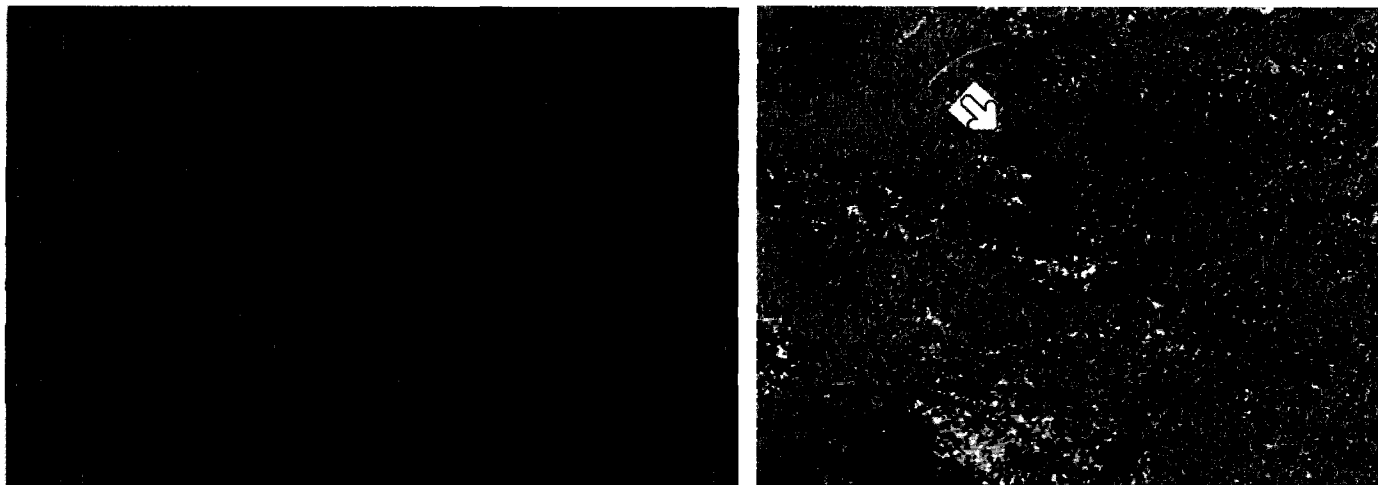
Résultats sur sites peu étendus

Une mention particulière doit être faite des cibles peu étendues, qui constituent l'essentiel de la surveillance des sites et des ouvrages au sens propre. En effet, compte tenu des résolutions spatiales des systèmes actuels, de l'ordre d'une dizaine de mètres, les plus grands ouvrages d'art ne dépasseraient guère une centaine de pixels. Il en est de même des sites dangereux usuels (affaissements et glissements de terrain). Même si l'échelle de l'image par satellite est inadaptée, en couverture et en résolution, à de tels sites, l'interférométrie par radar n'y souffre pas, ou peu, de sa limitation la plus fondamentale : la dimension des phénomènes liés à l'hétérogénéité de l'atmosphère excède en effet nettement la taille des sites peu étendus ou des ouvrages d'art. La mesure sur ces derniers n'est donc pas affectée par ces artefacts, comme on a pu le vérifier lors de l'analyse de la zone de déformation du tremblement de terre de Fawnskin. Celle-ci n'a que 5 km de diamètre et la modélisation géophysique a pu être poussée jusqu'à ne laisser qu'un résidu de 4 mm inexpliqué [13]. La forme du résidu suggère d'ailleurs une insuffisance de la modélisation et nous estimons que la précision de la mesure elle-même s'établit à 1 mm. Tous les affaissements ou gonflements sur les zones dépourvues de relief peuvent être détectés ou mesurés par radar (fig. 6). On peut citer les opérations de pompage (pétrole, gaz, eau) et de stockage (gaz, extraction assistée à la vapeur), les excavations (exploitations minières, tirs souterrains d'explosifs nucléaires, lavage de sel), ou encore le suivi des cavités anciennes.

L'application aux glissements de terrain paraît beaucoup plus délicate pour plusieurs raisons :

- par définition, un glissement de terrain se situe dans une zone de relief, même très local. Les propriétés géométriques de l'image radar, en particulier le phénomène de recouvrement, ne permettent pas, en général, d'isoler la paroi en glissement de son environnement ;
- un glissement altère très souvent la couverture de surface, ce qui empêche la mise en œuvre de la technique interférométrique ;
- les constantes de temps typiques du phénomène sont peu compatibles avec les temps de revisite des satellites. La limite du gradient est très facilement atteinte ;
- la taille du site est en général faible (1 km^2), ce qui ne crée pas de bonnes conditions pour la reconnaissance structurelle du déplacement. Les pixels sont trop peu nombreux.

Fig. 6 - Mesure des petits champs de déformation



Deux exemples d'application de la technique interférométrique à des petits champs de déformation. L'interférogramme de gauche représente la subsidence causée par l'exploitation minière de Gardanne, que nous étudions en collaboration avec le BRGM, à l'aide de données ERS1 et d'informations gracieusement fournies par les Houillères (HBCM). Les fronts de taille situés à 1 000 m de profondeur sont schématisés. Cette application est tout à fait généralisable.

L'interférogramme de droite montre le glissement de terrain de La Clapière sur l'un des interférogrammes de la série temporelle que nous étudions également avec le BRGM. Ce site a aussi fait l'objet d'une étude par l'IPGP et l'Institut Polytechnique de Milan. L'orientation des prises de vue radar était très favorable dans cette zone très pentue, et constitue un cas exceptionnel. Les études de glissements de terrain par interférométrie radar pourraient s'orienter vers le développement de radars à synthèse d'ouverture de haute résolution portés par des véhicules terrestres.

Des résultats intéressants ont été obtenus par notre équipe et celle de l'IPGP sur le glissement de la Clapière (fig. 6), observé dans des conditions géométriques exceptionnelles (la ligne de visée du radar étant, par hasard, alignée avec la ligne de plus grande pente). Les tentatives que nous avons faites sur d'autres sites ou en utilisant des orbites du cycle à 35 j ont échoué. Le même type de limitations s'applique à la mesure du déplacement des glaciers alpins, surtout dans les sites encaissés.

Pour ce qui concerne les ouvrages, on peut noter des avantages et des inconvénients spécifiques de la technique. Au chapitre des inconvénients, les sites à surveiller sont en général linéaires. La reconstruction de la phase absolue (déroulement) doit impérativement emprunter cette ligne, qui ne doit pas être interrompue par des pertes de cohérence. Par ailleurs, la répartition des cibles utilisables le long de l'ouvrage peut être telle que la condition sur le gradient de déformation soit plus stricte. Si l'ouvrage ne présente de cibles brillantes que tous les 100 m par exemple, il ne faudra pas dépasser un tour de phase en 100 m. Il existe cependant des avantages très réels. Les cibles disponibles sur un ouvrage peuvent présenter un fort rapport signal à bruit permettant un découpage de la

phase plus fin tout en restant significatif. On peut d'ailleurs envisager de disposer volontairement de telles cibles sur un ouvrage. Des précisions de l'ordre du millimètre devraient être courantes. Ces cibles sont en général « interférométriquement » stables, car artificielles, et autorisent une surveillance à long terme. Enfin, la connaissance préalable de l'ouvrage permet d'attendre des déformations dans des limites étroites.

Conclusion

L'interférométrie par radar spatial est une technique très puissante, bien qu'elle ait été développée à partir des données de satellites qui n'ont nullement été conçus à cette fin. Elle s'applique à la surveillance des ouvrages et des sites en raison de ce même principe d'opportunité : les satellites radar existent durablement et les techniques de traitement interférométrique sont maintenant parfaitement au point. Deux images radar adéquates peuvent être combinées à l'aide d'un logiciel spécifique installé sur des stations de travail standard (type SUN, DECA, etc.), disponibles dans la plupart des laboratoires ou organismes. Chaque image coûte, typiquement, 4 000 F et offre une couverture de 10 000 km².

Des images supplémentaires multiplient très rapidement le nombre de combinaisons interférométriques possibles. La formation à la lecture et à l'interprétation des interférogrammes peut être obtenue en quelques jours. Un effort tout à fait raisonnable permettrait donc à cette technique de se répandre et de

contribuer à la surveillance des ouvrages et des sites. À moyen terme, le développement d'une instrumentation spécifique pourrait rendre possible une adaptation de l'interférométrie par radar à synthèse d'ouverture aux exigences de résolution et de fréquence des visites posées par une telle surveillance.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] HOVANESSIAN A., *Synthetic Aperture Radar*, Artech House.
- [2] GRAHAM L.C. (1974), *Synthetic interferometer radar for topographic mapping*, Proc. IEEE, 62, 6, pp. 763-768.
- [3] ZEBKER H.A., GOLDSTEIN R.M. (1986), Topographic mapping from interferometric SAR observations, *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, B5, 10 avr.
- [4] MASSONNET D. (1985), *Étude de principe d'une détection de mouvements tectoniques par radar*, CT/PF/TI/IA, 326, note interne, 16 nov.
- [5] MASSONNET D., ROSSI M., CARMONA C., ADRAGNA F., PELTZER G., FEIGL K., RABAUTE Th. (1993), The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, vol. 364, 6433, 8 juil.
- [6] MASSONNET D., FEIGL K., ROSSI M., ADRAGNA F. (1994), Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake, *Nature*, vol. 369, 19 mai, pp. 227-230.
- [7] MASSONNET D., FEIGL K. (1995), Discriminating geophysical Phenomena in Satellite Radar interferograms, *Geophys. Res. Lett.*, 22, pp. 1537-1540.
- [8] TARAYRE H., MASSONNET D. (1995), *Geophys. Res. Lett.*
- [9] MASSONNET D., VADON H. (1995), ERS-1 Internal Clock Drift Measured by Interferometry, *IEEE (TGARS)*, vol. 33, 2, mars, pp. 1-8.
- [10] GABRIEL A.K., GOLDSTEIN R.M., ZEBKER H.A. (1989), Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry, *Journal of Geophysical Research*, 94, pp. 9183-9191.
- [11] GOLDSTEIN R.M., ENGELHARDT H., KAMB B., FROELICH R.M. (1993), *Science*, 262, pp. 1525-1530.
- [12] MASSONNET D., BRIOLE P., ARNAUD A. (1995), Deformation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, *Nature*, vol. 375, 15 juin, pp. 567-570.
- [13] FEIGL K., SERGENT A., JACQ D. (1995), Estimation of an earthquake focal mechanism from a satellite radar interferogram: Application to the December 4, 1992, Landers aftershock, *Geophys. Res. Lett.*, 22, pp. 1037-1040.

ABSTRACT

Remote Monitoring by Radar Interferometry

D. MASSONNET

Interferometric techniques based on satellite radar images can be used in monitoring the deformation of structures and sites. The theory and conditions of application of these techniques are described after a brief presentation of radar imaging and its classical geometrical properties. These conditions explain the need to have sensors as far away as satellites even for local studies. Alternatives making use of other carriers are considered. The physical limitations of the methods are also explained, together with their corollary, the logical limitations, which place an upper bound on a user's capacity to discriminate. In a set of interferometric results, the fraction of the phenomena that are of interest.

The programs developed by the Centre National d'Etudes Spatiales are described and their specific features and conditions of use explained. A number of results, most of them obtained on large strain fields, are presented. The few applications already made at relatively small sites are discussed.