

PRINCIPES DE L'INTERFEROMETRIE D'IMAGES RADAR POUR LA MESURE DE LA TOPOGRAPHIE ET DES DEPLACEMENTS DU SOL ET AVANCEES RECENTES

Elisabeth Simonetto¹, Bénédicte Fruneau², Daniel Raucoules³

1 : GeF, CNAM/ESGT, 1 Bd Pythagore, 72000 Le Mans, France, elisabeth.simonetto@lecnam.net

2 : Université Paris-Est, LaSTIG, IGN, UPEM, 5 bd Descartes, 77454 Marne-la-Vallée, France, benedicte.fruneau@u-pem.fr

3 : BRGM DRP/RAI, 3 avenue C. Guillemin, 45060, Orléans, France, d.raucoules@brgm.fr

Résumé

Cet article fournit quelques explications sur la mise en œuvre de la technique d'interférométrie d'images radar, les produits qu'elle permet d'obtenir et les contraintes de son utilisation. Depuis ses débuts à la fin des années 1980, cette méthode, grâce à la multiplication des acquisitions des images radar, à la considération de différents types de pixels et des géométries variables des images, ne cesse de progresser pour rendre son utilisation plus automatique et plus performante. Sans exposer les fondements théoriques ni tous les résultats, nous évoquons ici quelques-unes de ces avancées pour mieux cerner les usages possibles actuels et futurs.

Mots-clés : imagerie radar, InSAR, DInSAR, PSI, déformation, topographie

Abstract

This article gives some explanations on the technique of interferometry of radar images: how to use it, which products are obtained and what are the constraints to use it. Since its beginnings in the late 1980s, this method, thanks to the multiplication of acquisitions of radar images, the consideration of different types of pixels and the variable image geometries, knows constant progress to make its use more automatic and more efficient. Here we present some of these advances, which allows us to better identify current and future uses.

Keywords : radar imagery, InSAR, DInSAR, PSI, deformation, topography

1. Introduction

Les images RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) sont formées à partir d'ondes hyperfréquences émises et enregistrées par des systèmes radar aéroportés ou à bord de satellites. Ces systèmes mesurant les temps des trajets aller-retour des ondes, et donc des distances, sont sensibles à la topographie du terrain. La technique qui exploite cette particularité pour mesurer le relief à partir des images RSO est dénommée interférométrie radar à synthèse d'ouverture (InSAR pour *Interferometric Synthetic Aperture Radar*).

Si l'interférométrie radar avait déjà fait ses preuves pour cartographier les surfaces extraterrestres (Vénus, la Lune) dès la fin des années 1960, son application pour mesurer la topographie terrestre a été démontrée pour la première fois par Graham (Graham, 1974) puis dans Zebker et Goldstein (1986). Ces travaux s'appuyaient sur un système interféromètre radar embarqué sur un avion et composé de deux antennes séparées verticalement ou horizontalement dans le plan perpendiculaire à la trajectoire. Ces travaux ont confirmé que la précision de la mesure topographique était directement proportionnelle à la longueur de base (distance) entre les deux antennes.

Il est aussi possible de mesurer les déplacements de surface dans le temps, grâce à l'interférométrie différentielle (DInSAR). Cette fois, la sensibilité au

mouvement est proportionnelle à une fraction de la longueur d'onde du signal radar (quelques centimètres). Cette technique a été expérimentée pour la première fois avec trois images radar du satellite SEASAT mettant en évidence un phénomène de contraction/gonflement du terrain sur un site argileux (Gabriel et al., 1989). Les déplacements sont mesurés dans une seule direction, qui est celle de visée de l'antenne radar (LOS pour *Line-Of-Sight*). En acquisition satellite, du fait des angles de visée autour de 30°, la technique est plus particulièrement sensible aux mouvements verticaux du sol. Aujourd'hui, le traitement d'une pile d'images radar ainsi que la combinaison d'images acquises depuis des visées opposées permettent de fournir des produits interférométriques d'une fiabilité accrue, et d'accéder à la géométrie 3D des déplacements.

En ce qui concerne les applications topographiques, l'InSAR a permis de produire des MNT (Modèles Numériques de Terrain) à l'échelle globale avec des précisions altimétriques de quelques mètres (Polidori, 2019). Quant à la technique DInSAR, elle est utilisée dans des domaines variés, souvent en complément d'autres techniques géodésiques (GNSS, topométrie), pour détecter et surveiller les mouvements du sol en contexte urbain, industriel ou minier, les déformations d'infrastructures et ouvrages d'art (Raucoules et al., 2019), mais également en Sciences de la Terre : volcanologie (Froger et al., 2019), glaciologie (Fallourd et al., 2019), sismologie (Elliott et al., 2016), et suivi de glissements de terrain (Lazecy et al., 2015) notamment.

L'intérêt de l'interférométrie réside dans ses performances (avec des précisions potentiellement métriques voire sub-métriques pour les MNT et millimétriques pour les déplacements du sol), rendue possible grâce à l'automatisation des calculs, l'offre croissante de solutions logiciel (voir par exemple Simonetto et Follin, 2012 ; Crosetto et al., 2016) et l'abondance d'images radar satellite récentes et anciennes (Nicolas et al., 2019). Ces techniques ne nécessitent que rarement l'intervention sur le terrain (uniquement requise si l'on souhaite mesurer ou installer des points de référence ou de contrôle). Elles permettent de suivre une haute densité de points sur une large étendue équivalente à l'emprise des images. Du fait des archives d'images constituées au cours des 30 dernières années, elles permettent aussi d'étudier quantitativement des phénomènes plusieurs années après leur manifestation. Cependant, certaines limites clairement connues existent et font toujours l'objet de recherches actuelles.

Nous proposons dans cet article une explication rapide de cette technique (partie 2), puis nous présentons certaines limites (partie 3) et les méthodes avancées qui visent à améliorer les performances (partie 4). Nous nous contentons ici d'indiquer les pistes suivies dans les recherches actuelles sans en détailler tous les résultats.

2. Calcul et produits interférométriques à partir d'un couple d'images radar

Le calcul interférométrique consiste à calculer, à partir de deux images radar recalées entre elles, l'image de la différence de phase en chaque pixel, appelée interférogramme (chaque pixel étant représenté par un nombre complexe, i.e. amplitude et phase).

Dans une image radar, la phase d'un pixel dépend de la longueur d'onde, du temps de trajet aller/retour de l'onde entre le pixel éclairé et l'antenne (Figure 1) et de l'interaction de l'onde avec la surface (terme de phase propre). Outre la distance géométrique parcourue, le temps de trajet dépend aussi d'autres termes, tels que le délai dû à la propagation de l'onde dans l'atmosphère. En calculant la différence des phases mesurées lors de deux acquisitions radar (Figure 1, distance $R_2 - R_1$), l'interférogramme fait apparaître différents termes - phase topographique, phase orbitale, phase de déplacement, phase atmosphérique, différence des phases propres et bruit (Massonnet et Feigl, 1998).

La phase topographique permet d'estimer la topographie du terrain. Si un MNT est connu, on peut alors retirer ce terme de l'interférogramme et estimer, grâce à la phase de déplacement, le mouvement du sol qui s'est produit entre les dates d'acquisition des images radar. Dans les deux cas, il est nécessaire de connaître précisément les positions de l'antenne au cours de chaque acquisition afin d'estimer la phase orbitale. Celle-ci correspond à la contribution de phase que l'on obtient sur un terrain plat.

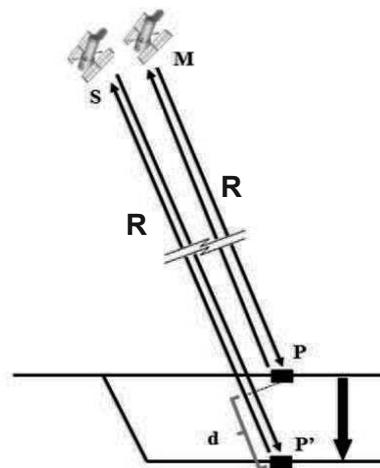


Figure 1 : Géométrie de l'acquisition interférométrique lors du parcours d'un satellite sur deux orbites, d'après Crosetto et al., 2016. M (maître) indique la position de l'antenne sur la première orbite et S (esclave) celle sur la seconde orbite. R_1 est la distance de trajet mesurée depuis M. R_2 est celle mesurée depuis S. d indique le déplacement du point au sol entre les deux acquisitions, de la position P à la position P'. Le déplacement d est mesuré par InSAR dans la direction LOS.

De plus, si les acquisitions ne sont pas simultanées, les variations atmosphériques ne peuvent pas être négligées et la phase atmosphérique n'est pas nulle. La différence des phases propres, résultant de phénomènes de décorrélation (cf. ci-après), est considérée comme du bruit, qui peut rendre la mesure interférométrique inexploitable. Le bruit provient également d'autres sources, multiples, notamment les erreurs lors de la synthèse des images radar et du recalage des images entre elles (Massonnet et Feigl, 1998).

La phase étant mesurée modulo 2π radians, l'interférogramme est composé de franges, une frange correspondant à un cycle de phase de $-\pi$ à $+\pi$ radians. Une frange de la phase topographique correspond à un dénivelé appelé altitude d'ambiguïté. Ce paramètre dépend de la longueur d'onde du capteur radar, de l'angle de visée, de la base perpendiculaire - composante de la base perpendiculaire à la direction de visée - et de l'altitude de l'antenne (Massonnet et Rabaute, 1993). Une frange de la phase de déplacement correspond à un déplacement d'une demi-longueur d'onde dans la ligne de visée du capteur (direction LOS, Massonnet et Feigl, 1998).

Le calcul interférométrique comprend différentes étapes (Hanssen, 2001 ; Massonnet et Feigl, 1998 ; Massonnet, 2015). Après avoir défini parmi les deux images, l'image maître (acquise depuis M sur la Figure 1) qui sert de référence et l'image esclave - la seconde (acquise depuis S sur la Figure 1) -, on réalise les étapes suivantes :

- corrélation des images et rééchantillonnage de l'image esclave pour recalibrer finement les deux images entre elles,

- b. différence des phases en chaque pixel pour calculer l'interférogramme,
- c. simulation de la phase due au terrain plat en utilisant les positions d'antenne et soustraction de cette phase orbitale de l'interférogramme,
- d. simulation de la phase due au relief en utilisant les positions d'antenne et un MNT (s'il est disponible) et soustraction de cette phase topographique de l'interférogramme,
- e. correction éventuelle du signal atmosphérique (cette étape peut être réalisée à ce stade de traitement ou après les filtrages voire après le déroulement de phase),
- f. filtrages éventuels pour mieux faire ressortir les franges,
- g. déroulement de phase,
- h. choix d'un point de référence (en altitude ou en déplacement),
- i. conversion de la phase restante (topographique ou déplacement) dans la dimension recherchée (hauteur ou déplacement),
- j. géocodage permettant de géoréférencer la mesure interférométrique dans une géométrie du terrain.

Lors de l'étape a, le recalage des images est sub-pixellique, de l'ordre du 10^{ème} de pixel lorsque l'on traite des images acquises typiquement en mode *Stripmap* (voir par exemple Moreira et al., 2013). Ce recalage est souvent réalisé par une méthode de corrélation des images. Le mode d'acquisition *TOPS* des satellites Sentinel-1 nécessite un recalage plus fin. En effet, une erreur de recalage induit la présence d'un terme de phase variant quadratiquement le long de l'axe azimutal qui peut être estimé et corrigé. L'estimation est aussi affinée en considérant les zones de recouvrement entre blocs (*bursts*) qui composent l'image radar acquise en mode *TOPS* (Grandin et al., 2015).

Les étapes b, c, et d ne posent pas de difficultés particulières. A l'étape e, lorsque les images sont acquises à des dates différentes, les effets atmosphériques se traduisent principalement par des retards de phase (allongements des distances antenne-pixel) qui résultent des variations de l'indice de réfraction atmosphérique dans la troposphère et l'ionosphère (Tarayre et Massonnet, 1996). Ces retards peuvent atteindre plusieurs centimètres. Plusieurs stratégies existent pour estimer et corriger en partie ces retards. Jolivet et al. (2014) distinguent deux approches, prédictives ou empiriques. L'approche prédictive utilise d'autres données, par exemple un modèle d'atmosphère global (Doin et al., 2009). L'approche empirique pose des hypothèses sur le signal recherché, la phase troposphérique pouvant être par exemple considérée comme corrélée à la topographie (Bekeart et al., 2015).

Après l'étape f, l'étape g vise à estimer le nombre entier de cycles de 2π radians en chaque pixel pour obtenir la phase absolue (somme de la phase enroulée et du nombre entier de cycles fois 2π). Plusieurs algorithmes de

déroulement de phase sont proposés dans la littérature et peuvent être classés en trois catégories (Pepe et al., 2017) : *minimal-norm*, *branch-cut*, *minimum cost flow*.

Une fois l'étape de déroulement effectuée, la mesure interférométrique obtenue reste relative : même si cette technique ne nécessite pas d'instrumentation *in situ*, la connaissance d'un point de référence est indispensable pour caler les mesures (étape h).

Les produits issus du traitement InSAR d'un couple d'images sont multiples : MNT, carte des déplacements de surface entre les deux dates dans la direction LOS, voire en 3D lorsque cela est possible avec 2 couples acquis selon des visées opposées (en orbite montante et descendante), et image de la cohérence interférométrique. La cohérence interférométrique est l'estimation en chaque pixel du degré de corrélation entre les images maître et esclave ; elle donne une information sur la qualité de l'interférogramme et des produits qui en découlent.

3. Contraintes d'utilisation de l'InSAR

Certaines limites d'applicabilité de la technique InSAR existent ; elles sont liées (Bovenga et al., 2018) :

- à l'acquisition des images, en particulier à l'échantillonnage spatial (taille du pixel), à la longueur d'onde, à la base perpendiculaire, à la base temporelle (intervalle de temps séparant les 2 images d'un couple interférométrique) ;
- au mouvement étudié : vitesse, étendue et direction du déplacement ;
- à l'environnement : présence de végétation dense, couvert neigeux, orientation des pentes, dénivelés.

La combinaison de certains de ces facteurs peut rendre impossible la mesure interférométrique.

La sensibilité de la phase interférométrique au relief est liée à l'altitude d'ambiguïté inversement proportionnelle à la base perpendiculaire. Plus cette base est importante, plus la sensibilité est forte. Ainsi, pour calculer un MNT, le couple d'images doit être choisi en fonction de sa base perpendiculaire, de sorte que ce paramètre soit adapté à la topographie (forte base perpendiculaire pour un relief peu marqué et au contraire moins importante sur les paysages montagneux, voir par exemple Bovenga et al., 2018). Si l'on cherche à mesurer les déplacements du sol, il est préférable dans ce cas d'utiliser des images avec une base perpendiculaire la plus faible possible pour ne pas subir l'effet des erreurs du MNT utilisé pour simuler la phase topographique.

Par ailleurs, le calcul n'est possible que si l'on respecte certaines conditions géométriques d'acquisition. Ainsi les images radar doivent être acquises par le même capteur ou des capteurs identiques conçus pour fonctionner en constellation (ERS-1 et ERS-2, Sentinel-1A et Sentinel-

1B, etc.), ou des images ERS-1, ERS- 2, Envisat qui peuvent être combinées sous certaines conditions et depuis des positions et angles de visée très proches (Massonnet et Feigl, 1998). Une trop forte base perpendiculaire (dont la limite physique s'exprime selon la longueur d'onde radar, la distance antenne-pixel et la taille du pixel), entraîne une décorrélation géométrique des deux images (Zebker et Villasenor, 1992).

Lorsque les images sont acquises à des dates différentes, la stabilité de la phase propre au cours du temps est soumise à des contraintes temporelles (Massonnet, 2015). Dans ces conditions, l'interférométrie n'est pas appropriée pour le suivi des surfaces d'eau et ne l'est pas non plus en présence de végétation dense dès lors que la base temporelle dépasse plusieurs jours ou quelques semaines - ceci dépend de la longueur d'onde du capteur (Zebker et Villasenor, 1992). De même, des destructions ou l'apparition de nouvelles constructions, des glissements de terrain rapides seront sources d'une décorrélation temporelle.

Décorrélations géométrique et temporelle sont visibles sur l'image de la cohérence interférométrique. La cohérence interférométrique est classiquement modélisée par cinq termes : la décorrélation géométrique, la décorrélation temporelle, mais aussi les termes de décorrélation dus au bruit thermique, aux erreurs de recalage et à la différence de fréquence Doppler entre les deux images qui intervient dans la synthèse de l'image RSO (Zebker et Villasenor, 1992 ; Pepe et al., 2017).

La sensibilité de la mesure au mouvement du sol est liée à la longueur d'onde ainsi qu'à la direction du mouvement. Pour détecter un mouvement de faible amplitude, on préfère exploiter des images provenant de capteurs de petite longueur d'onde, d'autant plus que les résolutions spatiales offertes par ces capteurs sont meilleures. En contrepartie, plus la longueur d'onde diminue, plus la décorrélation temporelle est rapide. Il faut également veiller à adapter l'échantillonnage temporel des images à la vitesse du mouvement. En effet, le gradient temporel ou spatial du déplacement ne doit pas dépasser en phase, π radians, c'est-à-dire le quart de la longueur d'onde, pour être correctement déroulé. Il s'agit d'un seuil théorique pour lequel il est souhaitable de rester bien en-deçà.

Du fait de la visée latérale des systèmes RSO, les problématiques géométriques intrinsèques à l'imagerie radar se retrouvent en interférométrie. Certaines zones ne sont pas visibles par l'antenne, les pentes faisant face à l'antenne sont compressées sur les images, tandis que les éléments de pentes supérieures à l'angle de visée apparaissent repliés dans la direction de l'antenne. Ces phénomènes rendent tout particulièrement difficile l'interprétation des interférogrammes sur certaines zones urbaines présentant de très hautes élévations ou encore en zone de fort relief. Il en résulte également qu'un mouvement orienté dans la direction perpendiculaire à la

direction LOS ne peut être détecté. Un mouvement qui a lieu parallèlement à la trajectoire orbitale ne peut pas non plus être mesuré par l'approche InSAR présentée (*across-track* InSAR). Il convient alors d'utiliser d'autres techniques. La corrélation sub-pixellique des images en amplitude (*offset tracking*, Michel et al., 1999) permet d'obtenir le mouvement 2D horizontal avec une précision de l'ordre de $1/10^{\text{ème}}$ de pixel. L'InSAR *along-track*, utilise la technique de division du faisceau (*split-beam* InSAR ou MAI pour *Multiple Aperture* InSAR, Bechor et al., 2006) pour calculer deux interférogrammes, l'interférogramme avant et l'interférogramme arrière. La différence entre ces deux interférogrammes donne le déplacement horizontal avec une précision de plusieurs dizaines de centimètres pour les images satellite acquises en mode *Stripmap*. Pour les images plus récentes acquises par les satellites Sentinel-1 en mode *TOPS*, les recouvrements des bursts dans chaque image permettent d'obtenir une mesure plus fine, de l'ordre de quelques centimètres (*Burst-Overlap* InSAR, Grandin et al. 2016). Ces approches présentent l'avantage d'être quasi-indépendante du signal atmosphérique mais la mesure du déplacement horizontal est nettement moins précise que celle du déplacement LOS accessible par l'*across-track* InSAR.

4. Méthodes InSAR avancées

Les méthodes avancées apportent certaines solutions face aux sources de bruit exposées précédemment et ont été développées pour améliorer la mesure des déplacements du sol. Elles consistent à exploiter non plus deux mais une pile d'images (au moins 15-20). Ces approches sont regroupées sous le nom d'InSAR multi-temporel ou MTI (*Multi-temporal* InSAR). Avec ces approches, des précisions de mesures de déplacement de 1 mm/an sont possibles. Plus le nombre d'images est important et plus les mesures seront précises. La perte de précision augmente par contre avec la longueur d'onde, la résolution spatiale et le bruit de phase. Il est préférable que les mouvements suivis soient de vitesse relativement constante dans le temps mais une faible non-linéarité du signal de déformation pourra aussi être restituée.

On peut distinguer deux approches (voir par exemple : Bovenga et al., 2018 ; Crosetto et al., 2016) : les méthodes des petites lignes de base (*Small BAseline Subset*, SBAS ; Berardino et al., 2002) et les méthodes des points stables (PS pour *Permanent Scatterers*, Ferretti et al., 2000), appelées également *Persistent Scatterers Interferometry* (PSI). Dans les deux cas, les algorithmes exploitent les phases différentielles, c'est-à-dire après correction de la phase topographique et de la phase orbitale. Les termes de phase traités sont alors la phase de déplacement, la phase provenant des erreurs altimétriques du MNT, la phase liée aux erreurs orbitales, la phase atmosphérique, et une phase de bruit, qui inclut toutes les autres sources de décorrélation. Certaines solutions ajoutent aussi un terme de dilatation thermique particulièrement utile lorsque l'étude concerne de

grandes structures anthropiques (Perissin et Rocca, 2006).

L'approche SBAS s'appuie sur un ou plusieurs ensembles d'interférogrammes dont les bases perpendiculaires et temporelles sont faibles afin de garantir des cohérences interférométriques élevées. Seuls les pixels de bonne cohérence sont considérés dans la suite des traitements. Ces pixels sont associés à des réflecteurs distribués (DS pour *Distributed Scatterers*) et ne contiennent pas d'éléments prédominants dans la cellule de résolution. Les DS correspondent par exemple aux zones désertiques, aux sols peu végétalisés ou à des zones de débris. Les DS sont donc sensibles aux phénomènes de décorrélation temporelle et géométrique, c'est pourquoi les bases géométriques et temporelles ont été limitées lors de la construction des interférogrammes. Généralement afin de réduire le bruit de phase, la résolution spatiale des images radar est préalablement dégradée. Les phases interférométriques sont de plus déroulées avant l'inversion des termes recherchés. Pour cela, les méthodes récentes de déroulement fonctionnent en 3D, dans les dimensions temporelle et spatiale (Pepe et al., 2017). Ensuite, les déplacements, les erreurs de MNT et les erreurs orbitales sont inversés par résolution de systèmes d'équations. Les mesures des déplacements obtenus sont ensuite nettoyées du terme atmosphérique par filtrage spatio-temporel, sachant que le signal atmosphérique est corrélé spatialement mais non temporellement. Des erreurs orbitales résiduelles sont parfois corrigées par soustraction d'une rampe (variation linéaire de la phase le long de l'axe azimutal).

La première méthode PSI a été présentée dans (Ferretti et al., 2000). Le principe est de sélectionner des points particuliers, les PS, que l'on va pouvoir suivre sur une longue période, même si les bases perpendiculaires des couples sont importantes, c'est-à-dire qu'un PS est peu sensible aux phénomènes de décorrélation temporelle et géométrique. Un point stable est un élément du sol de faible étendue (plus petit que le pixel) qui présente une rétrodiffusion stable dans le temps et dominante dans le pixel. C'est par exemple le coin entre le sol et la façade d'un immeuble, un affleurement ou un rocher. Par défaut, un PS est situé au centre du pixel et on ne peut pas savoir s'il en existe plusieurs dans la réalité. Cependant, un traitement par méthode PS fournit, outre la mesure du déplacement, la hauteur du PS (avec une précision d'environ 10 cm) indépendamment du reste du pixel, ce qui permettra d'en connaître une localisation améliorée. Celle-ci sera d'autant plus précise que les bases perpendiculaires définies par la pile d'images sont dispersées. Pour s'assurer de la présence et de la localisation du point suivi, il est également possible d'installer sur le terrain un coin réflecteur artificiel (CR pour *Corner Reflector*) dont la réflectivité dominera la réponse enregistrée dans la cellule de résolution correspondante. Un CR peut être réalisé par exemple en assemblant 3 plaques en aluminium, formant un trièdre,

dont la dimension doit être adaptée à la longueur d'onde du radar (Garthwaite, 2017).

Les PS sont sélectionnés selon différents critères (dispersion en amplitude, cohérence temporelle de la phase, ...). Sur ces points, les phases interférométriques sont calculées entre une image choisie comme image maître et toutes les autres images, quelles que soient les bases temporelles et perpendiculaires. Contrairement aux méthodes SBAS, les images ne sont pas dégradées spatialement. Après retrait de la contribution topographique et de la phase orbitale, les différents termes de phase sont ensuite inversés par des méthodes statistiques ou des filtrages (voir par exemple, Crosetto et al., 2016). Généralement les algorithmes s'appuient sur un graphe dont les arcs relient les PS entre eux dans les dimensions spatiales et temporelles. Le déroulement de phase, comme pour les méthodes SBAS, utilise les dimensions spatiale et temporelle, soit simultanément (3D) soit successivement (2+1D).

Afin d'obtenir davantage de points de mesure, notamment en zone non-urbaine, les deux approches SBAS et PSI peuvent être combinées. L'algorithme SqueeSAR (Ferretti et al., 2011) a la particularité de traiter en même temps les PS et les DS et permet d'accroître significativement leur densité en considérant que les DS se situent dans des groupes de pixels de comportement semblable.

Finalement, ces méthodes fournissent en chaque PS/DS : les mesures des déplacements moyens sur la période d'analyse, les séries temporelles des déplacements dans la direction LOS, la cohérence interférométrique, un indice de confiance spécifique à l'algorithme, et la position 3D réajustée du PS. De plus, d'autres produits sont généralement estimés : le signal atmosphérique à chaque date, et les erreurs résiduelles (erreurs d'altitude du MNT, erreurs orbitales).

Les résultats obtenus ne seront fiables que si la densité de DS/PS et l'échantillonnage temporel sont suffisants en regard du phénomène de déformation. La densité de PS/DS est importante en présence d'objets anthropiques (bâtiment, pylones, etc.) ou naturels (rocher, éboulis, etc) mais peut diminuer drastiquement en présence de végétation dense et de surface lisse (l'eau par exemple) ; les PS/DS seront perdus en cas de mouvement soudain (comme un effondrement) ou de changements importants (travaux, destruction). Bovenga et al. (2018) rapportent que la densité spatiale de mesure est meilleure avec des images mieux résolues et une longueur d'onde petite (bande X, environ 3 cm). Dans un contexte de décorrélation temporelle rapide, mieux vaut privilégier un bon échantillonnage temporel des images. En fait, les mouvements mesurables ne doivent être ni trop rapides – à cause de l'ambiguïté de phase et de la perte de cohérence – ni trop lents – à cause de la longueur d'onde et des périodes de temps permises par les acquisitions d'images. Les limites haute et basse dépendent de la

longueur d'onde, de la résolution spatiale, de la densité des PS/DS, de l'échantillonnage temporel et du gradient spatial du déplacement attendu. D'après Bovenga et al. (2018), des vitesses maximales de déplacements observables varient entre 10 cm/an et 180 cm/an selon ces différents critères, les vitesses minimales, dans le meilleur des cas, étant de l'ordre du mm/an. Il se peut aussi que certains PS ne présentent les caractéristiques de stabilité requise que sur une durée limitée de la période étudiée. C'est pourquoi Perissin et Wang (2012) proposent un algorithme adapté au suivi de cibles qui restent cohérentes de façon temporaire et pas sur la totalité de la période suivie.

Dans ces approches, les déformations corrélées à la topographie posent également des difficultés car elles peuvent être confondues avec les erreurs altimétriques et le signal d'atmosphère, en grande partie corrélé à la topographie.

Toutes ces avancées algorithmiques ont abouti aux développements récents de l'InSAR multi-track multi-capteur. Les mesures issues de plusieurs piles d'interférogrammes résultant de visées et de capteurs différents sont exploitées. Chaque pile est traitée de manière indépendante par une méthode InSAR avancée puis les différentes mesures des déplacements LOS sont combinées entre elles grâce à des méthodes statistiques (Pepe et Calo, 2017). L'avantage est alors de pouvoir augmenter l'échantillonnage temporel et spatial des mesures interférométriques (Bovenga et al., 2018). De plus, les composantes verticales et horizontales du déplacement peuvent être restituées. Notamment, la mesure de la composante horizontale dans la direction azimutale est fortement améliorée (précision de quelques centimètres) par rapport aux méthodes évoquées précédemment (en partie 3). Ces approches permettent aussi d'intégrer facilement d'autres sources d'information telles que des *mesures in situ* par GNSS.

5. Conclusion

Depuis plus de 40 ans, la technique InSAR n'a cessé de connaître des avancées significatives relatives aux modes d'acquisition et aux méthodes de traitement. Ainsi, les acteurs de l'InSAR proposent aujourd'hui des mesures dont la précision peut être quantifiée. Cependant, la fiabilité de la mesure dépend de nombreux facteurs (nombre d'images, capteur radar, algorithme utilisé, nature du terrain, ...) et l'interprétation des mesures interférométriques requiert une expertise.

Depuis 2015, la constellation des satellites Sentinel-1 de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) permet d'accéder librement à des images SAR avec une période de revisite de 12 ou 6 jours, ce qui en fait aujourd'hui la plus importante archive d'images radar jamais acquise. Grâce aux supercalculateurs et aux plateformes de calcul en

ligne (par exemple le service G-POD de l'ESA¹), on voit apparaître la possibilité de suivi d'un site en routine et la production de cartes de déplacement du sol à l'échelle d'un pays tout entier, par exemple l'Italie dans Ferretti et al. (2015). Les mesures interférométriques semblent vouées à devenir de plus en plus présentes dans le quotidien des utilisateurs de la mesure, au même titre que les autres mesures géodésiques.

Par ailleurs, cet article n'a pas évoqué la tomographie radar (tomoSAR) qui ouvre de nouvelles perspectives sur la couverture 4D de sites urbains, de forêts et d'ouvrages d'art (Reigber et Moreira, 2000), ni l'InSAR terrestre (Ground-based InSAR) qui permet également la surveillance de sites naturels (falaises, talus, etc.) et d'ouvrages d'art (Montserrat et al., 2014).

Références

- Bechor N.B., Zebker H. A., 2006. *Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair*. GRL, 33, L16311.
- Bekeart D.P.S., Hooper A., Wright T.J., 2015. *A spatially variable power law tropospheric correction technique for InSAR data*. JGR Solid Earth, 120 (2), pp. 1345-1356.
- Berardino P.; Fornaro G.; Lanari R.; Sansosti E., 2002. *A new Algorithm for Surface Deformation Monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms*. IEEE TGRS, 40, pp. 2375–2383.
- Bovenga F., Belmonte A., Refice A., Pasquariello G., Nutricato R., Nitti D.O., Chiaradia M.T., 2018. *Performance analysis of satellite missions for multi-temporal SAR interferometry*. Sensors, 18, 1359.
- Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-Gonzalez M., Devanthery N., Crippa B., 2016. *Persistent Scatterer Interferometry: A review*. ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, pp. 78-89.
- Doin M.-P., Lasserre C., Peltzer G., Cavalié O., Doubre C., 2009. *Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models*. Journal of Applied Geophysics, 69, pp. 35–50.
- Elliott J.R., Walters R.J., Wright T.J., 2016. *The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes*. Nature Communications. Doi: 10.1038/ncomms13844.
- Fallourd R., Dehecq A., Jauvin M., Yan Y., Vasile G., Gay M., Trouvé E., Nicolas J.-M., 2019. *Suivi des glaciers de montagne par imagerie radar satellitaire*. RFPT, même numéro.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2000. *Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers*

¹ <https://gpod.eo.esa.int/>

- in differential SAR interferometry*. IEEE TGRS, 38 (5), pp. 2202–2212.
- Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F., Massonnet D., 2007. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*, ESA Publications, TM-19.
- Ferretti A.; Fumagalli A.; Novali F.; Prati C.; Rocca F.; Rucci A., 2011. *A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR*. IEEE TGRS, 49, pp. 3460–3470.
- Ferretti A., Colombo D., Fumagalli A., Novali F., Rucci A., 2015. *InSAR data for monitoring land subsidence: time to think big*. Proc. IAHS, 372, pp. 331–334.
- Froger J.-L., Pinel V., Bato G., Tridon M., Smittarello D., Prival J.M., Cayol V., Guehenneux Y., 2019. *Apport des données SAR à la compréhension et à la surveillance des volcans : exemple du Piton de la Fournaise*. RFPT, même numéro.
- Garthwaite M. C., 2017. *On the Design of Radar Corner Reflectors for Deformation Monitoring in Multi-Frequency InSAR*. Remote sensing, 9, p. 648.
- Graham L. C., 1974. *Synthetic interferometer radar for topographic mapping*, Proceedings of the IEEE, 62 (6), pp. 763-768.
- Grandin R., 2015. *Interferometric Processing of SLC Sentinel-1 TOPS Data*. FRINGE'15 Frascati, Rome, Italy, 23–27 March, SP-371.
- Grandin R., Klein E., Métois M., Vigny C., 2016. *Three-dimensional displacement field of the 2015 Mw8.3 Illapel earthquake (Chile) from across- and along-track Sentinel-1 TOPS interferometry*. GRL, 43 (6), pp.2552-2561.
- Hanssen R.F., 2001. *Radar interferometry. Data interpretation and error analysis*. Springer, 308 p.
- Jolivet R., Agram P. S., Lin N. Y., Simons M., Doin M.-P., Peltzer G., Li Z., 2014. *Improving InSAR geodesy using Global Atmospheric Models*. JGR Solid Earth, 119, pp. 2324-2341.
- Lazecy M., Canaslan Comut F., Hlavacova I., Gürboga S., 2015. *Practical application of satellite-based SAR interferometry for the detection of landslide activity*. Procedia Earth and Planetary Science, 15, pp. 613-618.
- Massonnet D. and Rabaute T., 1993. *Radar interferometry: limits and potential*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 31 (2), pp. 455-464, doi: 10.1109/36.214922
- Massonnet D., Feigl K.L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. Reviews of Geophysics, 36 (4), pp. 441-500.
- Massonnet D., 2015. *Interférométrie radar*. Techniques de l'ingénieur, Réf TE6704 V1.
- Michel R., Avouac J.-P., Taboury J., 1999. *Measuring ground displacements from SAR amplitude images: Application to the Landers earthquake*. GRL, 26 (7), pp. 875–878.
- Montserrat O., Crosetto M., Luzi G., 2014. *A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 93, pp. 40-48.
- Moreira A., Prats-iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K.P., 2013. *A tutorial on Synthetic Aperture Radar*, IEEE Geoscience and remote sensing magazine.
- Pepe A., Calò F., 2017. *A review of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements*. Applied Sciences, 7, 1264.
- Perissin D., Rocca F., 2006. *High-accuracy urban DEM using permanent scatterers*. IEEE TGRS 44 (11), pp. 3338–3347.
- Perissin D., Wang T., 2012. *Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets*. IEEE TGRS, 50 (1), pp. 271–280.
- Polidori L., 2019. *Potentiel et limites des méthodes radar pour la cartographie du relief en Amazonie*. RFPT, même numéro.
- Raucoules D., Simonetto E., Fruneau B., 2019. *Observation et suivi de déformations de surface d'origine anthropique*. RFPT, même numéro.
- Reigber A., Moreira A., 2000. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data. IEEE TGRS, 38(5), pp. 2142-2152.
- Simonetto E., Follin J.-M., 2012. *An overview on interferometric SAR software and a comparison between DORIS and SARSCAPE processing*. Springer series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography (LNG&C) series. Geospatial free and open source software in the 21st century.
- Tarayre H., Massonnet D., 1996. *Atmospheric propagation heterogeneities revealed by ERS-1 interferometry*. GRL, 23(9), pp. 989–992.
- Zebker H.A., Villasenor J., 1992. *Decorrelation in interferometric radar echoes*. IEEE TGRS, 30(5), pp. 950-959.
- Zebker H.A., Goldstein R.M., 1986. *Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations*. JGR Solid Earth and Planets, 91(B5), pp. 4993-4999.