

Méthodes avancées pour les séries temporelles InSAR

Ho Tong Minh, Dinh; Hanssen, Ramon; Doin, Marie-Pierre; Pathier, Erwan

10.51926/ISTE.9083.ch5

Publication date

Document Version Final published version

Published in

Mesure du déplacement de surface à partir d'images de télédétection

Citation (APA)

Ho Tong Minh, D., Hanssen, R., Doin, M.-P., & Pathier, E. (2024). Méthodes avancées pour les séries temporelles InSAR. In O. Cavalie, & E. Trouvé (Eds.), *Mesure du déplacement de surface à partir d'images de télédétection* (pp. 145-178). ISTE. https://doi.org/10.51926/ISTE.9083.ch5

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable). Please check the document version above.

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights. We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository 'You share, we take care!' - Taverne project

https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

Méthodes avancées pour les séries temporelles InSAR

Dinh Ho Tong Minh¹, Ramon Hanssen², Marie-Pierre Doin³ et Erwan Pathier³

UMR TETIS, INRAE, Montpellier, France
 Delft University of Technology, Delft, Pays-Bas
 ISTerre, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

5.1. Introduction

L'analyse InSAR en série temporelle est une technique répandue, qui est utilisée pour cartographier les déplacements de la surface du sol à grande échelle avec une grande précision depuis l'espace. Il y a deux raisons principales pour passer de l'InSAR traditionnel (c'est-à-dire utilisant une seule paire d'images) à l'InSAR en série temporelle: i) ceci permet d'étudier sur de longues périodes des phénomènes variables au cours du temps; ii) cela améliore la précision des mesures de déplacement de surface. En effet, pour les processus de déformation qui se développent lentement (par exemple, la compaction des sols, la déformation intersismique, la pressurisation des réservoirs, les glissements de terrain lents ou les écoulements de glace), cette technique permet d'exploiter la redondance des piles de séries temporelles InSAR pour atténuer le bruit et les signaux parasites tels que les effets atmosphériques, la topographie résiduelle et les décorrélations.

Bien que de nombreuses méthodes de série temporelle InSAR aient été développées au cours des 20 dernières années, la plupart d'entre elles ont des caractéristiques

communes. Ainsi, elles peuvent être classées en deux types de techniques, selon la façon dont elles prennent en compte les décorrélations du signal (Ho Tong Minh et al. 2020). La première catégorie de techniques s'appuie sur les diffuseurs distribués (DS pour Distributed Scatterers) pour le suivi des déformations. Les cibles distribuées sont présentes dans les environnements naturels (prairies, champs, sols nus, etc.) où de nombreux diffuseurs de brillances similaires contribuent à l'information d'une cellule de résolution. Une facon courante d'atténuer les décorrélations du signal consiste à sélectionner des interférogrammes ayant des courtes lignes de base spatiales et de petits écarts temporels. Ainsi, ces techniques sont dites à petites lignes de base (SB pour Small Baselines). Les cibles distribuées sont nombreuses, ce qui facilite l'obtention de cartes de déformation avec un échantillonnage dense. Cependant, les mesures de déformation de ces cibles distribuées sont souvent de moindre qualité, et nécessitent donc un filtrage spatial. La seconde approche regroupe les techniques InSAR à diffuseurs permanents/persistants, appelés PS (pour Permanent/Persistent Scatterers). Ces techniques s'appuient sur des diffuseurs individuels dominant le signal dans une cellule de résolution pour suivre la déformation dans le temps. Leur stabilité de rétrodiffusion, qui a été bien étudiée, est due à ce que ces cibles ponctuelles sont souvent associées à des structures humaines stables telles que des bâtiments, des poteaux et des grilles, ce qui entraı̂ne de très faibles décorrélations. Les techniques PS fournissent ainsi des informations de bonne qualité sur les déformations à l'emplacement des cibles ponctuelles. Toutefois, la densité des cibles PS est souvent faible dans les zones non urbaines, ce qui entraîne une distribution éparse de points utilisables. Pour résoudre ce problème, une technique récente, avancée, permet de combiner les PS et les DS afin de remédier au manque de points identifiés pour l'estimation. C'est la technique dite PSDS (diffuseurs persistants et diffuseurs distribués).

Pour effectuer une analyse en série temporelle InSAR, il convient de reconstruire l'évolution de la phase déroulée entre chaque date d'acquisition. Si l'on part d'interférogrammes, il est nécessaire que toutes les dates soient reliées entre elles par des interférogrammes. Une manière répandue de représenter ces connexions consiste à représenter en un graphe les interférogrammes par des arêtes qui relient les nœuds du réseau, nœuds qui représentent les images SAR disposées selon leur temps d'acquisition et leur ligne de base perpendiculaire. La figure 5.1 propose trois exemples de réseaux d'interférogrammes liés aux différentes techniques de séries temporelles mentionnées ci-avant. Si certaines dates d'acquisition ne sont pas reliées par le réseau d'interférogrammes, il est nécessaire de faire des hypothèses plus ou moins fortes pour reconstruire l'évolution de la phase. Un exemple est la méthode dite de sommation (*stacking*), qui pose l'hypothèse forte que, pour chaque pixel, l'évolution de la phase est temporellement linéaire. Cette méthode s'appuie sur la somme d'interférogrammes indépendants (c'est-à-dire non connectés en réseau) pour estimer une carte de vitesse (par exemple, (Wright *et al.* 2001)). Cependant, cette hypothèse n'est pas

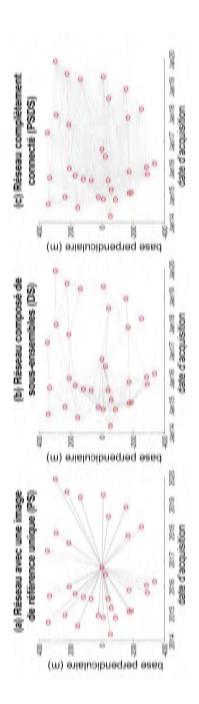


Figure 5.1. Exemples de réseaux d'interférogrammes produits en utilisant les données COSMO SkyMed (fournies par l'Agence spatiale italienne dans le cadre du projet de recherche ID226) au-dessus de la région de Ho Chi Minh-Ville

COMMENTAIRE SUR LA FIGURE 5.1.— a) Réseau avec une image de référence unique, utilisé par les techniques de diffuseur permanent/persistant (PS). b) Réseau composé d'un sous-ensemble d'interférogrammes ayant des petites lignes de base temporelles et spatiales, utilisé par les techniques à petites lignes de base (SB). c) Réseau complètement connecté composé de tous les interférogrammes possibles, utilisé par la technique combinant diffuseurs permanents et diffuseurs distribués (PSDS).

vérifiée dans la plupart des cas, et d'autres approches qui nécessitent l'accès à la phase déroulée de chaque interférogramme sont nécessaires.

Ce chapitre se propose de décrire les deux principales familles de techniques d'analyse en séries temporelles InSAR (SB et PSDS). Il est organisé ainsi : le contexte mathématique est présenté dans la section 5.2 ; les avancées méthodologiques sont résumées dans la section 5.3 ; la technique SB est présentée dans la section 5.4 ; et enfin la technique PSDS est présentée dans la section 5.5.

5.2. Contexte de l'analyse en série temporelle InSAR

Soient N images SAR. Les images sont recalées sur une grille commune de référence. Supposons que les termes de phase dus aux orbites et à la topographie du terrain aient été estimés et compensés. La phase résiduelle de l'interférogramme différentiel déroulé φ^n , pour chaque acquisition n, est constituée des contributions de phase de la topographie résiduelle, de la déformation, de l'atmosphère et du bruit (Hanssen 2001) :

$$\varphi^n = \varphi^n_{topo} + \varphi^n_{dis} + \varphi^n_{aps} + \varphi^n_{noise} + 2k\pi$$
 [5.1]

où φ^n_{topo} est la phase topographique résiduelle; φ^n_{dis} est la phase due au déplacement de la surface; φ^n_{aps} est l'écran de phase atmosphérique (APS), représentant la contribution des conditions météorologiques; φ^n_{noise} est le bruit de phase dû à toutes les autres contributions possibles, telles que la décorrélation temporelle, un mauvais recalage, la décorrélation induite par une compensation insuffisante du décalage spectral, les erreurs orbitales, l'humidité du sol et le bruit thermique; et k est un nombre entier d'ambiguïté.

Pour un point p, la phase topographique résiduelle peut s'écrire comme suit (Hanssen 2001) :

$$\varphi_{p,topo}^n = k_{p,n}^z \varepsilon_p^z \tag{5.2}$$

où $k_{p,n}^z=\frac{4\pi B_n^\perp}{\lambda\sin\theta_p R_{n,p}}$ est le facteur de hauteur vers phase; ε_p^z est la topographie résiduelle ou l'erreur d'élévation; B_n^\perp est la ligne de base perpendiculaire de la n-ième image par rapport à l'image de référence; θ_p est l'angle d'incidence local; λ est la longueur d'onde de l'onde électromagnétique porteuse du radar; et $R_{n,p}$ est la distance cible-satellite.

Sans perte de généralité, la composante de phase due au déplacement en un point p peut être séparée en deux composantes :

$$\varphi_{p,dis}^n = k_n^t v_p + \mu_{NL} \tag{5.3}$$

où v_p est la vitesse moyenne de la cible suivant la ligne de visée (LOS); $k_n^t = \frac{4\pi t_n}{\lambda}$ est le facteur temps vers phase; t_n est l'écart temporel entre la date n et la date de référence; et μ_{NL} le terme de phase dû à un éventuel déplacement non linéaire.

L'APS φ^n_{aps} n'est généralement pas modélisé, car il dépend des conditions météorologiques, mais il peut être sensiblement réduit en considérant les différences de phase entre des points voisins, grâce à ses propriétés de covariance spatiale (Emardson et al. 2003). Le terme de bruit φ^n_{noise} contient toutes les autres contributions de phase.

Généralement, on suppose une vitesse constante et un modèle linéaire pour la topographie résiduelle. Plus précisément, étant donné N-1 interférogrammes différentiels déroulés, nous pouvons écrire pour chaque pixel un système de N-1 équations avec deux inconnues, en utilisant l'équation [5.1] :

$$\varphi^n = k_n^z \varepsilon^z + k_n^t v + w^n + 2k\pi$$
 [5.4]

où $w^n = \mu_{NL} + \varphi^n_{aps} + \varphi^n_{noise}$ est la phase résiduelle. Dans l'équation [5.4], le problème est linéaire si le nombre entier d'ambiguïtés k est connu. Malheureusement, φ^n ne peut être observé que comme une phase enroulée (c'est-à-dire que k est également une inconnue) (Ghiglia et Pritt 1998 ; Hanssen 2001). Les approches PS et PSDS peuvent être exécutées directement avec la phase enroulée, tandis que dans les analyses SB la phase doit être préalablement déroulée.

5.3. Une revue

5.3.1. Méthodes par petites lignes de base pour l'analyse en série temporelle

L'objectif est ici de construire une série temporelle de déplacements du sol avec une densité et une couverture spatiales les plus grandes possibles, pour différents types d'occupation du sol. La réalisation de cet objectif dépend essentiellement de la capacité à obtenir la phase déroulée sur un maximum de pixels à l'échelle d'un réseau d'interférogrammes reliant les différentes dates d'acquisition de la série temporelle. Ceci devient rapidement difficile en présence de forts gradients de phase et de bruit de décorrélation (voir chapitre 6). Dans les environnements naturels, dominés par les DS, les décorrélations géométrique et temporelle sont les deux principaux facteurs limitants (voir chapitre 4). L'idée principale dans l'approche SB est donc d'établir un réseau d'interférogrammes pour lequel ces effets de décorrélation sont minimisés.

Dans les premières missions radar telles que Radarsat-1 et JERS-1, la forte variabilité de la ligne de base perpendiculaire et de l'angle de dépointage, due aux faibles capacités de contrôle orbital et de pointage de l'instrument (voir chapitre 1), faisait de la décorrélation géométrique la principale limite. Pour les satellites ERS et Envisat en bande C qui avaient une meilleure capacité de pointage, mais restaient dans un tube orbital d'un diamètre supérieur à 1 km, la ligne de base perpendiculaire demeurait toujours un critère critique à minimiser lorsque les premières analyses de séries temporelles InSAR ont commencé à la fin des années 1990. C'est ce qui explique l'expression « petite ligne de base » . Il convient toutefois de garder à l'esprit que d'autres critères sont appliqués pour sélectionner les interférogrammes, notamment ceux qui visent à minimiser la décorrélation temporelle. Aujourd'hui, avec les missions récentes telles que Sentinel-1, qui suivent un tube orbital plus étroit, la ligne de base perpendiculaire tend à être un critère moins restrictif dans la conception du réseau. En pratique, le temps de calcul et le volume de données doivent parfois aussi être pris en compte pour de longues séries temporelles afin de limiter le nombre d'interférogrammes dans le réseau, tout en garantissant une bonne redondance.

Les premières tentatives de calcul de séries temporelles de déplacement du sol, à partir d'un réseau d'interférogrammes déroulés en petites lignes de base, reposaient sur un ajustement par moindres carrés, effectué pixel par pixel (voir, par exemple, (Usai *et al.* 1999 ; Beauducel *et al.* 2000)). Cette méthode numérique atteint ses limites lorsque le système à résoudre est sous-déterminé (rang trop faible), par exemple lorsque la phase déroulée n'est pas disponible pour tous les pixels de tous les interférogrammes du réseau.

Il est important de rappeler que même si le réseau d'interférogrammes relie toutes les dates, la situation peut différer lorsque l'on considère un pixel particulier. Par exemple, dans le cas d'un pixel situé dans un environnement bruité qui ne peut être déroulé de manière fiable sur plusieurs interférogrammes, il peut y avoir plusieurs liens manquants dans le réseau pour ce pixel (figure 5.2), ce qui peut donner lieu à des sous-réseaux déconnectés appelés sous-ensembles.

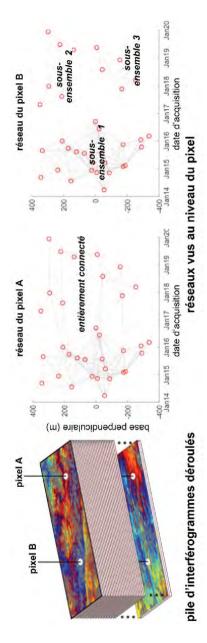


Figure 5.2. Deux exemples de réseaux vus au niveau du pixel, partant du réseau au niveau de l'image présentée dans la figure 5.1b

COMMENTAIRE SUR LA FIGURE 5.2.— Le réseau du pixel A est entièrement connecté malgré quelques liens manquants par rapport au réseau d'interférogrammes au niveau de l'image (c'est-à-dire qu'il existe certains interférogrammes dans lesquels le pixel A n'est pas déroulé, mais toutes les dates sont connectées par un seul réseau). Le réseau du pixel B présente des sous-ensembles déconnectés en raison de plus de liens manquants. Dans ce cas, le calcul de la série temporelle complète nécessite certaines hypothèses et des méthodes d'inversion appropriées pour reconnecter les sous-ensembles.

Pour résoudre ce problème, la technique de sous-ensemble de petites lignes de base (SBAS) utilise une décomposition en valeurs singulières (SVD) pour résoudre le système sous-déterminé (Berardino *et al.* 2002). Plus récemment, plusieurs autres implémentations ont été proposées pour calculer les séries temporelles avec différents degrés de complexité, notamment des contraintes de régularisation, la pondération des interférogrammes, le calcul simultané de l'évolution de la phase et de l'erreur résiduelle topographique, la combinaison des informations provenant d'interférogrammes à basse et haute résolution spatiale par une approche itérative et la correction des erreurs de déroulement (Mora *et al.* 2003 ; Schmidt et Bürgmann 2003 ; Lanari *et al.* 2004 ; Fornaro *et al.* 2009 ; López-Quiroz *et al.* 2009 ; Doin *et al.* 2011 ; Jolivet *et al.* 2013 ; Yunjun *et al.* 2019). L'une de ces implémentations est discutée plus en détail dans la section 5.4.

Au contraire d'autres méthodes comme celle des PS ou celles qui exploitent tous les interférogrammes possibles (voir section 5.5), les méthodes SBAS sont confrontées à la question du choix du réseau d'interférogrammes optimal. Ce choix est souvent fait selon des considérations empiriques se fondant sur la qualité des interférogrammes (avec la difficulté que celle-ci peut varier d'une région à l'autre d'un interférogramme) et des considérations pratiques sur les performances de calcul. Ce compromis permet aux méthodes SBAS d'être compétitives, en particulier lorsque de très grandes zones (> millions de km²) doivent être couvertes. Pour atteindre de tels objectifs de couverture spatiale, les problématiques de traitement massif de données doivent également être prises en compte (voir, par exemple, (Casu et al. 2014; Manunta et al. 2019)). Le moyennage multivue est alors couramment employé pour améliorer les performances de calcul (par exemple, (Morishita et al. 2020)). Cependant, des études sur la fermeture de phase, détaillées au chapitre 6, ont montré qu'un tel moyennage peut générer des biais dans la mesure des déplacements de surface, qui doivent alors être pris en compte.

5.3.2. Des PS aux PSDS

L'interférométrie fondée sur les diffuseurs permanents (PS), développée à la fin des années 1990, a été la première technique InSAR permettant une analyse directement à

partir de la mesure de la phase enroulée de l'équation [5.4] (Ferretti et~al.~2000,~2001). Les paramètres peuvent être estimés par une recherche dans l'espace des solutions, à condition que le rapport signal/bruit (SNR) soit suffisamment élevé. Ainsi, l'analyse utilise uniquement des pixels sélectionnés qui sont souvent caractérisés par des cibles hautement cohérentes (c'est-à-dire à faible σ^2_{noise}) et qui correspondent typiquement à des objets d'origine anthropique présents en milieu urbain, mais qui sont plus rares en dehors. Ces cibles stables, appelées diffuseurs permanents (Ferretti et~al.~2000), correspondent à la présence d'un diffuseur dominant dans la cellule de résolution et peuvent être identifiées d'après un critère relatif à la stabilité de l'amplitude dans le temps. Plusieurs approches ont été présentées dans de précédentes études pour réaliser l'analyse InSAR sur des zones non urbaines (par exemple, des terres non cultivées, des déserts et des zones de débris), où l'hypothèse PS ne peut être vérifiée, en considérant les DS (Berardino et~al.~2002; Lanari et~al.~2004; Fialko 2006). La figure 5.3 présente des exemples de cibles PS et DS.

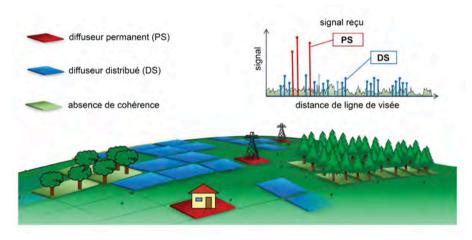


Figure 5.3. Exemples de diffuseurs permanents et distribués

L'objectif principal est ici d'obtenir de meilleures performances en augmentant la densité des points identifiés, et ce, en combinant les cibles PS et DS. Cette combinaison a été proposée et étudiée par de nombreux auteurs (Fornaro *et al.* 2006 ; Rocca 2007 ; Ferretti *et al.* 2008, 2011 ; Hooper 2008). Dans (Hooper 2008), un traitement multitemporel hybride a été proposé, où deux approches (PS et SBAS) ont été appliquées aux mêmes données d'entrée, puis les résultats SBAS ont été inversés par une SVD pour être combinés avec les PS. Différemment, dans les travaux de Fornaro *et al.* (2006), Ferretti *et al.* (2008), Ferretti *et al.* (2011) et Rocca (2007), la combinaison des PS et DS est faite dans le cadre d'une estimation par maximum de vraisemblance (ML). Dans cette approche, un processus optimisé pour estimer les paramètres

d'intérêt peut être réalisé en utilisant des statistiques de la cible, qui peuvent être représentées par une matrice de cohérence. L'avantage de cette technique réside en ce que les critères, qui déterminent l'importance de chaque interférogramme dans le processus d'estimation, sont directement déduits des cohérences par une approche mathématique rigoureuse. Avec l'optimisation ML, les paramètres d'intérêt peuvent être asymptotiquement sans biais et de variance minimale. Cependant, les techniques ML nécessitent des informations fiables sur les statistiques de la cible (c'est-à-dire une matrice de cohérence) pour déterminer le poids dans l'algorithme d'estimation.

Rocca (2007) et Ferretti $et\,al.$ (2011) ont proposé un processus d'estimation ML en deux étapes. Dans la première étape, l'estimation ML est appliquée à tous les N(N-1)/2 interférogrammes disponibles à partir des N images, afin de tirer les meilleures estimations des N-1 phases interférométriques, ce qui est appelé SqueeSAR. Cette étape ML a d'abord été connue sous le nom de liaison de phase (PL) (Guarnieri et Tebaldini 2008) ou d'algorithme de triangulation de phase (PTA) (Ferretti $et\,al.$ 2011). Cette étape est efficace et ne requiert qu'un faible nombre de calculs. Dans la seconde étape, la séparation des contributions, dues aux bruits de décorrélation provenant des paramètres d'intérêt, peut être traitée comme dans l'algorithme PS. Aujourd'hui, le terme PSDS fait référence à des techniques qui exploitent à la fois les cibles PS et DS pour l'analyse InSAR en série temporelle.

5.4. La technique SBAS

5.4.1. Principe et définition d'un réseau d'interférogrammes à petites lignes de base

Comme discuté dans la section 5.3, il existe un *continuum* de méthodes allant des PS aux techniques de sous-ensemble de petites lignes de base. Ici, nous nous concentrons sur une méthode SBAS qui est déterminée par :

- la définition d'un réseau d'interférogrammes à petites lignes de base ;
- le moyennage multivue et le filtrage spatial des interférogrammes différentiels ;
- le déroulement spatial des interférogrammes spatialement continus après correction d'erreurs atmosphériques et/ou de modèle numérique de terrain (MNT);
- le calcul de séries temporelles de cartes de délai de phase par pas de temps à partir d'un réseau redondant d'interférogrammes;
- la séparation de sources distinguant les contributions atmosphériques de celles dues à la déformation du sol.

Bien que l'ordre exact, la combinaison et l'exécution de ces étapes dépendent des implémentations, elles sont toutes présentes dans la plupart des algorithmes SBAS. Nous nous concentrerons ici sur l'agencement de ces étapes dans la chaîne NSBAS

(Doin *et al.* 2011), mais nous mentionnerons également d'autres chaînes SBAS. Notez que la principale différence avec la technique PSDS, décrite ci-avant comme une extension des algorithmes PS, est que l'on aborde l'interférogramme comme une image échantillonnée sur une grille régulière en y supposant une bonne continuité spatiale, au contraire d'une approche privilégiant un échantillonnage ponctuel et discret de l'espace.

L'idée derrière la technique SBAS est la prise en compte de la non-fermeture de la phase interférométrique filtrée et déroulée :

$$\varphi_{AC} \neq \varphi_{AB} + \varphi_{BC} \tag{5.5}$$

où A, B et C sont trois acquisitions et $\varphi_{AC}, \varphi_{AB}, \varphi_{BC}$ sont les phases interférométriques déroulées entre A et C, A et B, et B et C, respectivement (voir le chapitre 6). Les non-fermetures proviennent de trois origines : i) le filtrage spectral en portée de la partie non commune du spectre entre les deux images complexes monovues (SLC) utilisées dans la formation de l'interférogramme, ii) le moyennage spatial et le filtrage des valeurs complexes $A_1A_2 \exp(j(\phi_2-\phi_1))$ en présence d'un bruit de décorrélation qui atteint π , et iii) les ambiguïtés de déroulement dépendant du chemin parcouru.

En raison de ces trois sources de non-fermeture, φ_{AC} donne des informations complémentaires à φ_{AB} et φ_{BC} . Le succès d'une implémentation SBAS dépend de la manière dont la collecte des informations de chaque interférogramme individuel est maximisée, tout en minimisant la propagation du bruit, lorsque la série temporelle est calculée à partir d'un réseau d'interférogrammes. Par exemple, si les acquisitions A et C ont été prises durant la même saison, mettons l'automne, tandis que B a été prise au printemps, φ_{AC} pourrait être plus cohérent que $\varphi_{AB} + \varphi_{BC}$, bien que AB et BC soient séparés par un laps de temps plus court que AC. En général, cependant, plus l'écart temporel ou la ligne de base perpendiculaire est grande, plus le bruit de phase dans les interférogrammes enroulés à pleine résolution est important.

Les techniques SB tentent ainsi d'optimiser le choix des paires interférométriques en minimisant leur ligne de base perpendiculaire, leur écart temporel, leur différence saisonnière, etc.

Une source de décorrélation provient de la ligne de base perpendiculaire, qui peut être atténuée par un filtrage spectral en portée. Le filtrage spectral en portée consiste à supprimer la partie non commune des spectres de chaque image, avant le calcul de l'interférogramme. Le décalage relatif apparent de la longueur d'onde du radar, tel qu'il est détecté par les DS au sol entre deux acquisitions, dépend de la pente du terrain et de la ligne de base perpendiculaire entre les deux acquisitions (Gatelli et al. 1994). La partie où les spectres se recouvrent dépend du décalage fréquentiel et

de la largeur de bande du radar. Pour les données ERS et Envisat, par exemple, une ligne de base perpendiculaire d'environ 1 100 m conduit à une disparition complète du recouvrement des spectres et donc à une décorrélation complète des DS. Avec un filtrage spectral adapté à la pente locale du terrain (Davidson et Bamler 1999), des interférogrammes avec des lignes de base allant jusqu'à 500 m peuvent être obtenus tout en préservant bien la cohérence sur les DS. Pour les interférogrammes ALOS1, les interférogrammes avec de très grandes lignes de base perpendiculaires peuvent rester cohérents en raison d'une largeur de bande beaucoup plus étendue que pour ERS ou Envisat. Dans le cas d'un tube orbital restreint et d'une grande largeur de bande, comme Sentinel-1, l'intérêt du filtrage spectral en portée est alors plutôt limité, et la détermination d'une petite ligne de base perpendiculaire pour les interférogrammes n'est plus le critère critique dans la définition du réseau interférométrique à petite ligne de base.

Une deuxième source de décorrélation est liée aux changements temporels dans l'occupation du sol, de l'humidité du sol, etc. Lorsque l'écart temporel augmente, la probabilité que le bruit de phase pour chaque pixel dépasse π augmente, soit à cause de la modification totale d'un diffuseur dominant, soit à cause de la transformation progressive de multiples interactions de rétrodiffusion dans la cellule de résolution. Comme la phase n'est connue que modulo 2π , un bruit de phase important entraîne une perte totale d'informations. Le moyennage multivue et le filtrage spatial des interférogrammes à petite ligne de base sont ainsi utiles pour réduire le bruit de phase, avant de les combiner pour reconstruire des interférogrammes avec l'écart temporel voulu. Les méthodes SBAS peuvent donc être considérées comme un moyen de résoudre l'ambiguïté du bruit de phase dans les interférogrammes ayant un grand écart temporel.

Après le moyennage multivue, le filtrage et le déroulement, le réseau de phases interférométriques est inversé en série temporelle. La reconstruction temporelle consiste à résoudre un ensemble d'équations surdéterminées, mais possiblement aussi sousdéterminées :

$$\sum_{l} G_{kl} \delta \varphi_l = \varphi_{ij}; \text{ avec } G_{kl} = 1 \text{ pour } i \le l < j; G_{kl} = 0 \text{ sinon}$$
 [5.6]

où $\delta \varphi_l$ sont les incréments de phase inconnus des acquisitions l à l+1 et φ_{ij} est la k-ième phase interférométrique déroulée entre la date i et la date j. Si le système ci-avant est sous-déterminé, soit rang $(G^TG) < N-1$, avec N le nombre d'images, ceci signifie que le réseau interférométrique est constitué de plusieurs (= $N-{\rm rang}(G^TG)$) sous-ensembles indépendants d'images (Berardino et al. 2002 ; López-Quiroz et al. 2009). Il manque l'information relative entre les sous-ensembles indépendants. Afin de calculer la série temporelle, nous devons « supputer » les liens

manquants entre les sous-ensembles sur la base d'un critère prédéfini. Ce critère supplémentaire est à l'origine du qualificatif « sous-ensemble » dans l'acronyme SBAS. Bien que l'on puisse faire des hypothèses pertinentes sur l'information manquante (voir, par exemple, (López-Quiroz *et al.* 2009)), la séparation du réseau interférométrique en sous-ensembles augmentera l'incertitude de la série temporelle inversée, en particulier si les sous-ensembles ne présentent aucun chevauchement temporel.

En conclusion, les méthodes SBAS permettent, par le moyennage multivue et le filtrage de la phase interférométrique dans des interférogrammes à petites lignes de base, d'étudier le délai de phase d'un ensemble d'objets au sol, éventuellement en évolution, avec des combinaisons changeantes de pondérations entre les rétrodiffuseurs dans un voisinage fixé. Pour optimiser le choix du réseau interférométrique, il faut considérer (i) un certain niveau de redondance qui assurera un échantillonnage suffisamment varié des combinaisons mentionnées ci-avant, (ii) une ligne de base perpendiculaire suffisamment petite pour préserver un recouvrement spectral d'au moins la moitié de la largeur de bande du radar, (iii) un écart temporel qui améliore la cohérence et (iv) la continuité du réseau de la première à la dernière acquisition.

5.4.2. Moyennage multivue et filtrage, corrections d'erreurs atmosphériques ou de MNT et déroulement

Comme mentionné ci-avant, le moyennage multivue et le filtrage sont des étapes essentielles des techniques SBAS. Le moyennage multivue est souvent effectué sur l'interférogramme complexe, qui inclut l'amplitude de rétrodiffusion de la SLC de référence et de la SLC secondaire. Les diffuseurs ponctuels de haute intensité, lorsqu'ils sont présents dans le voisinage, ont ainsi un poids énorme dans l'interférogramme moyenné. À l'inverse, dans les environnements naturels, l'amplitude de l'interférogramme peut être remplacée par une mesure de la stabilité locale de la phase, telle que la colinéarité définie par Pinel-Puyssegur et al. (2012), avant le moyennage multivue pour améliorer le SNR de la phase moyennée (Daout et al. 2018). Il existe de nombreuses méthodes de filtrage (par exemple, (Goldstein et Werner 1998)). Le moyennage multivue et le filtrage doivent tous deux préserver les forts gradients de phase, s'ils existent. Lorsque ces derniers existent le long de pentes en zones de raccourcissement radar, par exemple, ou dans des zones incohérentes, ils produisent des incohérences dans les motifs de franges interférométriques, ce qui entraîne des erreurs de déroulement. Il est donc judicieux d'aplanir la phase interférométrique enroulée en corrigeant, par exemple, des délais atmosphériques et des erreurs de MNT avant de filtrer et de dérouler (Doin et al. 2015 ; Daout et al. 2017 ; Maubant et al. 2020).

La composante de l'APS qui peut facilement être corrigée avant le filtrage et le déroulement, est le délai atmosphérique stratifié, c'est-à-dire la contribution atmosphérique qui dépend au premier ordre de l'altitude (voir le chapitre 4 et également

(Hanssen 2001) et (Doin *et al.* 2009)). La correction atmosphérique stratifiée peut être évaluée empiriquement en utilisant la relation entre la phase enroulée et l'altitude (Grandin *et al.* 2012; Doin *et al.* 2015), ou prédite en utilisant des modèles atmosphériques globaux (Doin *et al.* 2009; Jolivet *et al.* 2011) ainsi que les délais zénithaux de stations GNSS lorsqu'ils sont disponibles (Yu *et al.* 2018). Dans tous les cas, cette correction permet de réduire les gradients de phase dans les zones montagneuses (Grandin *et al.* 2012) et facilite ainsi le filtrage et le déroulement. La correction d'erreur locale de MNT peut être également évaluée empiriquement en utilisant la relation entre la phase enroulée et la ligne de base perpendiculaire. Cette estimation peut être effectuée pour les PS ou les DS (Ferretti *et al.* 2001; Hooper 2008) ou pour l'ensemble de la pile d'interférogrammes (Ducret *et al.* 2014). Elle réduit la dispersion locale de la phase et améliore à nouveau les étapes de moyennage, de filtrage et de déroulement. La figure 5.4 montre l'effet des corrections sur les interférogrammes enroulés, qui peuvent améliorer une étape de déroulement ultérieure.

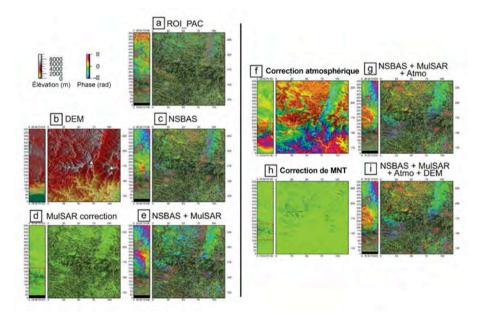


Figure 5.4. Exemples montrant comment des corrections successives sur la phase enroulée aident au déroulement ultérieur d'un interférogramme Envisat avec un grand écart temporel (3,1 ans) et une grande ligne de base perpendiculaire (236 m) à travers la chaîne de l'Himalaya, une zone à fort relief et avec de la végétation.

COMMENTAIRE SUR LA FIGURE 5.4.— L'interférogramme entier ainsi qu'un zoom sont présentés pour chaque étape de correction (figure réproduite d'après (Grandin et al. 2012)). a) Interférogramme avec moyennage multivue traité avec ROI-PAC.

b) MNT de la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) en géométrie radar. c) Interférogramme traité avec NSBAS (Doin et al. 2011). d) Correction MulSAR (Pinel-Puyssegur et al. 2012). e) Interférogramme après la correction MulSAR. f) Correction du délai troposphérique calculée à partir du modèle atmosphérique ERA-Interim (Jolivet et al. 2011). g) Interférogramme après correction atmosphérique. h) Correction de MNT calculée à partir d'une combinaison d'interférogrammes cohérents (enroulés) avec de grandes lignes de base perpendiculaires et de petits écarts temporels (Ducret et al. 2014). i) Interférogramme après correction des erreurs de MNT.

Lorsque les gradients de déformation sont très importants et que la signature spatiale de la déformation est assez stable dans le temps, comme dans le cas de la subsidence de la ville de Mexico (López-Quiroz et al. 2009) ou de la dynamique du pergélisol (Daout et al. 2017), il peut être intéressant d'obtenir une carte préliminaire modélisant la distribution spatiale de la déformation dont l'amplitude puisse être mise à l'échelle pour ensuite être retranchée de l'interférogramme avant le déroulement, puis rajoutée après le déroulement. Dans un esprit similaire, certains auteurs préfèrent corriger d'un APS stratifié estimé de manière empirique, même s'il est trop complexe, avant le déroulement, pour supprimer efficacement les gradients de phase abrupts dans les zones montagneuses, et le rajouter après le déroulement afin de s'assurer de ne pas avoir enlevé du signal de déformation qui pourrait être présent par erreur dans l'estimation empirique de l'APS (Maubant et al. 2020). Tout ceci aide à résoudre les ambiguïtés de déroulement qui résultent de gradients de phase abrupts et/ou de la présence de bruit de phase. L'algorithme SBAS de Lanari et al. (2004) présente également une procédure de déroulement itérative où une première série temporelle de déformations à basse résolution et une carte de correction de MNT sont utilisées pour corriger les interférogrammes enroulés à plus haute résolution et ainsi affiner le déroulement.

Enfin, la plupart des méthodes SBAS reposent sur le déroulement spatial des interférogrammes à l'aide de différentes classes de méthodes (voir le chapitre 6) : branch cut (Zebker et Lu 1998), optimisation globale (Chen et Zebker 2002) ou intégration spatiale de la phase fondée sur la cohérence (Grandin et al. 2012). La phase interférométrique doit être continue dans l'espace pour relier toutes les parties d'un interférogramme sans qu'il subsiste des ambiguïtés de 2π . Le déroulement spatial est une étape critique du traitement InSAR, même pour les interférogrammes à petite ligne de base, en particulier dans les régions végétalisées, montagneuses ou enneigées. Notez que dans les techniques SBAS, cette étape remplace l'intégration spatiale des différences de vitesse Δv_{pq} et des différences de phase résiduelle enroulée Δw_{pq}^n mesurées le long des arcs pq d'un réseau de points PSDS. La phase résiduelle intégrée récupérée, w^n , des PSDS pour chaque pas de temps n peut également être affectée par des erreurs de déroulement dues à d'éventuels gradients de phase importants liés à l'atmosphère (à travers des fronts atmosphériques ou des terrains escarpés) ou à une déformation non linéaire entre les emplacements des PSDS.

Une fois que les interférogrammes ont été déroulés, ils doivent être référencés en fixant la phase moyenne à zéro dans une zone donnée. Les interférogrammes déroulés peuvent également être aplatis suivant les directions de distance, x, et d'azimut, y, en ajustant une rampe de phase de la forme : $\varphi_{ij}^{est} = a_{ij}^{est}x + b_{ij}^{est}y + c_{ij}^{est}$. Dans ce cas, a_{ij}^{est} et b_{ij}^{est} doivent être utilisés pour inverser les séries temporelles a_{i}^{inv} et b_{ij}^{inv} pour chaque pas de temps l et ensuite pour reconstruire $a_{ij}^{inv} = a_{j}^{inv} - a_{i}^{inv}$ et $b_{ij}^{inv} = b_{j}^{inv} - b_{i}^{inv}$. Ceci garantit que la correction de la rampe est cohérente à travers le réseau d'interférogrammes (Biggs $et\ al.\ 2007$). On peut aussi utiliser des données GNSS situées dans l'emprise au sol des interférogrammes et converties suivant la ligne de visée (LOS), pour estimer la rampe de phase.

5.4.3. Calcul de la série temporelle

Nous nous concentrons d'abord sur la résolution de l'ensemble d'équations [5.6], dont le seul but est de reconstruire la série temporelle complète du délai de phase qui inclut la contribution atmosphérique résiduelle. Le système linéaire s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{1,3} \\ \varphi_{2,5} \\ \vdots \\ \varphi_{i,j} \\ \vdots \\ \varphi_{N-1,N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 & 1 & \cdots & 1 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 & 1 & \cdots & 1 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \varphi_1 \\ \vdots \\ \delta \varphi_l \\ \vdots \\ \delta \varphi_{N-1} \end{pmatrix}$$

où φ_{ij} sont les M phases interférométriques mesurées, N est le nombre d'acquisitions et la matrice $M \times (N-1)$ est la matrice de conception G. Elle peut être résolue pixel par pixel grâce à la méthode des moindres carrés ou par décomposition en valeurs singulières si le rang de G^TG est inférieur à N-1 (Berardino $et\ al.\ 2002$):

$$\delta \varphi^{inv} = (G^T G)^{-1} G^T \varphi \tag{5.7}$$

Afin de déterminer comment les données de phase (φ) ou les incréments de phase modélisés $(\delta \varphi_{inv})$ peuvent être pondérés par des matrices de covariance sur les données C_d ou sur le modèle C_m dans le processus d'estimation, nous devons rappeler les raisons pour lesquelles l'ensemble des équations [5.6] ne sera pas parfaitement vérifié. Les résidus $\varphi - G\delta\varphi^{inv}$, en principe, ne sont dus qu'à la non-fermeture associée à un moyennage multivue et au filtrage du bruit de décorrélation de phase et des erreurs de déroulement. Nous pouvons donc assurément supposer qu'il n'existe pas de covariance intrinsèque entre les estimations de φ_{AB} , φ_{BC} et φ_{AC} , bien qu'elles partagent des dates communes. La covariance, C_d , est donc au premier ordre diagonale.

De même, comme les incréments de phase du modèle contiennent deux signaux physiques, la déformation et le délai atmosphérique, il n'y a pas de raison d'inclure une longueur de corrélation temporelle dans les éléments non diagonaux de C_m . Pour conclure, nous recommandons une simple pondération de chaque équation dans [5.6] par l'amplitude du bruit de décorrélation de phase estimé σ_{φ}^{ij} de chaque interférogramme.

Dans le cas d'une bonne redondance des données (évaluée grâce à la matrice de résolution des données), et si les erreurs de déroulement affectent environ moins d'un tiers des interférogrammes, les résidus entre les interférogrammes originaux et reconstruits $r_{ij} = \varphi_{ij} - \sum_l G_{kl} \delta \varphi_l^{inv}$ (l'interférogramme ij correspondant au k-ième interférogramme) peuvent être utilisés pour détecter et corriger les erreurs de déroulement (Doin et al. 2011). Nous devons d'abord obtenir r_{ij} en résolvant l'équation [5.7], puis utiliser ces résidus pour réduire, en se basant sur des considérations empiriques, la pondération de l'ensemble des équations de $1/(abs(r_{ij})+r_0)$, où r_0 correspond à un écart type typique du bruit de phase, environ 0,4 rad. Ensuite, les résidus obtenus avec la nouvelle solution $\delta \varphi^{inv2}$ pointeront vers des interférogrammes contenant des erreurs de déroulement. On peut donc ajouter $+/-2\pi$ aux valeurs « erronées » de φ_{ij} et calculer une nouvelle solution. Quelques itérations permettent de converger vers un réseau cohérent de phases déroulées et corrigées, à condition que le nombre d'erreurs initiales n'entache pas plus d'un quart (règle empirique) du nombre de liaisons interférométriques.

Enfin, même si le réseau interférométrique construit ne contient pas de sous-ensemble isolé, le déroulement peut ne pas avoir atteint toutes les parties des interférogrammes, de sorte que, pour un pixel donné, G^TG peut ne pas être inversible (figure 5.2). Ceci est courant s'il y a par exemple de la neige pendant une partie de l'année. Dans ce cas, on peut utiliser la décomposition en valeurs singulières, qui mettra à zéro l'incrément de phase moyen entre la phase reconstruite à travers le temps des différents sous-ensembles. Ce n'est néanmoins pas toujours la manière optimale de reconstruire l'information manquante entre les sous-ensembles. Nous pouvons aussi imposer des contraintes pour produire l'interpolation nécessaire entre les sous-ensembles en utilisant deux approches équivalentes :

- dans la première, on calcule la vitesse moyenne v, puis on retranche sa contribution de chaque interférogramme, $\varphi_{ij}-v\times(t_j-t_i)$, et on itère sur la reconstruction de la série temporelle. Par la suite, le décalage entre les sous-ensembles obtenus par SVD correspondra à la vitesse moyenne multipliée par la séparation temporelle des sous-ensembles. Il est possible d'écrire des formulations un peu plus complexes utilisant ce principe ;
- dans la seconde, on impose des contraintes supplémentaires à la phase reconstruite avec des équations qui modélisent le comportement de la phase avec le temps

et/ou avec la ligne de base perpendiculaire. Le système devient alors inversible sans avoir à recourir à la SVD.

Dans ce qui suit, nous nous concentrerons sur la seconde approche, c'est-à-dire sur la technique d'inversion NSBAS (Doin et~al.~2011). Les nouvelles contraintes sont appliquées en même temps au premier système d'équations (équation [5.6]), ce qui signifie que nous devons résoudre des variables supplémentaires, telles que v, l'accélération a ou un coefficient proportionnel à la ligne de base perpendiculaire B^{\perp} , tout en continuant à résoudre les incréments de phase $\delta \varphi^{inv}$ (López-Quiroz et~al.~2009):

$$\begin{cases}
\omega_{ij} \left(\sum_{n=i}^{n=j-1} \delta \varphi_n^{inv} \right) = \omega_{ij} \varphi_{ij} \\
W \Omega_1 c = 0 \\
W \Omega_l \left(\sum_{n=1}^{n=l-1} \delta \varphi_n^{inv} - v(t_l - t_1) - a(t_l - t_1)^2 - \alpha (B_l^{\perp} - B_1^{\perp}) - c \right) = 0
\end{cases}$$
[5.8]

où t_l et B_l^\perp sont le temps et la ligne de base perpendiculaire de l'acquisition l; l est supérieur à 2 dans le dernier système d'équations ; et c est une constante. Le poids W des nouvelles lignes d'équations introduisant les contraintes doit être suffisamment faible pour qu'elles n'affectent pas le calcul de la série temporelle de phase φ_l^{inv} dans le cas où G^TG est inversible. Le poids ω_{ij} doit, lui, dépendre de la cohérence de l'interférogramme : nous pouvons par exemple le fixer pour qu'il soit inversement proportionnel à l'écart temporel ou, plus empiriquement, inversement dépendant d'une mesure de la cohérence locale de l'interférogramme. Cependant, le poids Ω_l doit être fixé de manière à être inversement corrélé à l'amplitude de l'APS de chaque acquisition l. Ainsi les coefficients v, a, a et c seront principalement contraints par les dates d'acquisition ayant des contributions atmosphériques résiduelles faibles.

Le terme de déformation peut se révéler mal modélisé par un terme linéaire plus une accélération. On peut alors décider de choisir un autre ensemble parcimonieux de fonctions, avec une marche (pour le séisme), une exponentielle (pour la relaxation), des fonctions trigonométriques (pour les fluctuations saisonnières), etc. Nous pouvons sinon décider, pour une procédure très générale, d'inverser en simultané une déformation lisse dans le temps avec N variables supplémentaires, φ_l^{def} , avec l étant l'acquisition de l'image (Doin $et\ al.\ 2011$) :

$$\begin{cases} \omega_{ij} \left(\sum_{n=i}^{n=j-1} \delta \varphi_n^{inv} \right) = \omega_{ij} \varphi_{ij} \\ W\Omega_1 \varphi_1^{def} = 0 \\ W\Omega_l \left(\sum_{n=1}^{n=l-1} \delta \varphi_n^{inv} - \varphi_l^{def} - \alpha (B_l^{\perp} - B_1^{\perp}) \right) = 0 \\ W\frac{\partial^2 \varphi^{def}}{\partial t^2} = 0 \end{cases}$$
 [5.9]

La contrainte $W \frac{\partial^2 \varphi^{def}}{\partial t^2} = 0$ peut être remplacée en introduisant une covariance entre les variables modélisées φ^{def}_l grâce à des termes diagonaux non nuls dans C_m (Jolivet et~al.~2013).

Enfin, pour les missions SAR actuelles avec des stratégies d'acquisition systématique et massive (comme Sentinel-1, tous les 6 ou 12 jours), la résolution du système d'équations [5.9] par des méthodes d'assimilation progressive, comme fait par Dalaison et Jolivet (2020), réduit fortement la charge de calcul, tout en rendant possible l'évaluation des incertitudes.

Notez que, dans l'approche NSBAS, contrairement à la méthode SBAS traditionnelle (Lanari et~al.~2004), les $a~priori~sur~\varphi_l^{def}~ne$ sont utilisés que dans le cadre de la régularisation, afin de remplacer les liens manquants et que la série temporelle de phases inversée φ_l^{inv} comprend à la fois l'APS résiduel (après la correction de l'effet de la troposphère stratifiée) et la déformation, et elle n'est pas filtrée dans le temps. Elle peut donc être considérée comme une mesure avec une erreur de mesure quantifiée et elle est obtenue sans contrainte a~priori~sur~la~déformation. Il est alors envisageable de procéder à une séparation des sources sur des bases géophysiques.

5.4.4. Séparation de sources, atmosphère contre déformation

La séparation de sources appliquée à l'ensemble des séries temporelles par pixel des délais de phase totaux (ensemble dénommé « cube de données » dans ce qui suit) devrait en principe nous permettre (i) d'extraire la déformation associée aux différentes sources et d'en isoler les écrans de phase atmosphérique et (ii) de quantifier les erreurs associées à cette extraction. La séparation des sources peut être réalisée à l'aveugle ou assistée par des informations géophysiques additionnelles. Les méthodes à l'aveugle nous permettent d'explorer des jeux de données et de prouver l'existence d'un signal géophysique donné, tandis que l'extraction assistée par des informations géophysiques est plus efficace pour quantifier un processus et fournir une incertitude sur le résultat. Dans tous les cas, l'ajout d'un terme proportionnel à la ligne de base perpendiculaire permet de séparer la contribution résiduelle de phase due aux erreurs de MNT et aide à l'extraction d'autres signaux géophysiques.

Le problème de la séparation des sources peut être résolu par différentes approches, selon l'objectif scientifique fixé. La méthode à l'aveugle « classique » consiste à isoler les APS en appliquant des combinaisons successives d'un filtre passe-haut en temps suivi d'un filtre passe-bas en espace pour les acquisitions individuelles (Berardino *et al.* 2002). La série temporelle lissée après l'élimination des APS est le produit standard rendu par de nombreux logiciels, par exemple l'approche P-SBAS (Lanari *et al.* 2020). Cependant, la perte possible d'une partie du signal de déformation dans l'APS, en particulier à grande échelle, ne peut pas être facilement évaluée en utilisant cette

approche. En outre, le filtrage passe-bas d'une série temporelle à échantillonnage irrégulier ou échantillonnée à une fréquence inférieure aux oscillations du signal, peut produire un fort aliasing (Doin et al. 2009). Le cube de données des délais de phase peut également être exploré à l'aide de l'analyse en composantes principales (PCA) (Chaussard et al. 2014) ou de l'analyse en composantes indépendantes (ICA) (Ebmeier 2016; Maubant et al. 2020). Les principales contributions au délai de phase sont alors identifiées sans introduire d'a priori externes. Par exemple, Maubant et al. (2020) ont pu, en utilisant l'ICA, identifier à la fois le retard atmosphérique stratifié et le signal ténu d'une déformation transitoire, d'une durée de quelques mois, associé à un événement de glissement lent le long de la zone de subduction sur la côte Pacifique du Mexique. Dans cet exemple, l'APS stratifié présentait une composante haute fréquence dans le temps superposée à une fluctuation saisonnière, et violait donc l'hypothèse généralement posée pour isoler l'APS. La validité de la séparation des sources par l'ICA a ensuite pu être vérifiée à l'aide de données indépendantes provenant de mesures du delai troposphèrique et de la déformation par GNSS, ainsi que du modèle atmosphérique ERA-Interim du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT/ECMWF).

Un autre type d'approche consiste à séparer les sources à l'aide d'une analyse par régression, en supposant que la déformation puisse être exprimée avec une combinaison de fonctions temporelles (linéaire, saisonnière, par paliers, etc.). Les avantages de cette méthode simple sont sa robustesse pour de faibles rapports signal à bruit, la quantification des incertitudes associées et la possibilité de pondérer chaque acquisition en fonction de l'amplitude de son contenu en APS. Notez que récupérer uniquement un champ de vitesses en LOS avec une précision du mm/an constitue déjà un défi sur de grandes zones d'étude. Ceci est particulièrement vrai lorsque la déformation prédite est partiellement corrélée avec l'altitude, comme c'est le cas pour certaines failles majeures (par exemple la faille Altyn-Tagh (Elliott et al. 2008; Daout et al. 2018)) ou des volcans (Beauducel et al. 2000). L'incertitude du champ de vitesses reconstruit dans les zones montagneuses ne peut donc être discutée sans une analyse fine des erreurs de la correction atmosphérique stratifiée. Une présentation détaillée de la manière de déduire les incertitudes de la correction atmosphérique stratifiée a été proposée dans (Daout et al. 2018). La plupart des analyses par régression sont effectuées pixel par pixel. Jolivet et Simons (2018) ont toutefois introduit une méthode qui inclut à la fois des fonctions spatiales et temporelles ainsi qu'une matrice de covariance sur les données spatialement corrélées.

Enfin, la décomposition des sources peut être facilitée par une modélisation ou une connaissance préalable de la forme de la déformation dans le temps, T(t), ou dans l'espace, S(x,y). Par exemple, en supposant que la déformation associée à la variation de charge du lac Siling soit de la forme $T(t) \ast S(x,y)$, on peut retrouver une forme S(x,y) associée aux fluctuations connues du niveau d'eau ou, inversement, on

peut estimer le comportement temporel T(t) associé à la forme modèle de la déformation induite par la charge (Doin $et\ al.\ 2015$). Les avantages sont une nouvelle fois de pouvoir prendre en compte les propriétés de bruit de chaque acquisition et de donner un intervalle de confiance sur T(t) ou S(x,y). En outre, l'inclusion de prédictions de modélisation pour les composantes est, nord et verticale, $M_i(x,y)$, pour différentes sources, i, permet également de fusionner des séries temporelles obtenues avec différents angles de visée radar en utilisant le vecteur unitaire de ligne de visée LOS $u_{LOS}(x,y)$. Ceci peut être fait en résolvant :

$$\phi(x, y, t) = \sum_{i} M_{i}(x, y) u_{LOS}(x, y) * T_{i}(t)$$
 [5.10]

avec une régularisation éventuellement appliquée sur $T_i(t)$ (Grandin et al. 2010).

En conclusion, la force de la méthode SBAS réside à la fois dans sa capacité à s'appliquer à un environnement naturel et à fournir un « cube de données », où les erreurs de déroulement ont été automatiquement détectées et corrigées, et incluant simultanément la déformation et les contributions atmosphériques résiduelles et s'affranchissant ainsi des *a priori* sur le comportement temporel ou spatial de la déformation. Une séparation des sources adaptée au signal géophysique d'intérêt peut alors être très efficace et qui plus est accompagnée d'estimations d'incertitude. Dans ce qui suit, nous décrivons la méthode PSDS, qui, elle, optimise la reconstruction de la déformation du sol à partir de pixels sélectionnés ou de groupes de pixels voisins.

5.5. La technique PSDS

5.5.1. Algorithme PS

Considérons maintenant la différence de phase entre deux PS voisins (par exemple les cibles p et q), qui peut être écrite comme (Ferretti et al. 2000 ; Ho Tong Minh et al. 2020) :

$$\Delta\varphi_{pq}^{n} = W\left\{k_{n}^{z}\Delta\varepsilon_{pq}^{z} + k_{n}^{t}\Delta v_{pq} + \Delta w_{pq}^{n}\right\}$$
 [5.11]

où W est l'opérateur d'enroulement de la phase ; $\Delta \varepsilon_{pq}^z$ est l'erreur d'élévation relative entre les cibles p et q; Δv_{pq} est la vitesse constante relative ; et $\Delta w_{pq}^n = \mu_{pq,NL}^n + \varphi_{pq,noise}^n + \varphi_{pq,noise}^n$ est la différence entre la phase observée et la phase modélisée pour les points p et q dans le n-ième interférogramme.

La variance de phase du résidu $\sigma_{\Delta w}^2$ est la somme de trois contributions indépendantes, σ_{μ}^2 , σ_{aps}^2 et σ_{noise}^2 . Comme une paire de PS voisins n'est pas trop éloignée,

on peut s'attendre à de faibles σ^2_{aps} (c'est-à-dire moins de $0,1~rad^2$) pour une courte distance (1 km) (Ferretti et~al.~2000). Qui plus est, le mouvement non linéaire des cibles voisines est fortement corrélé, ce qui se traduit par un faible σ^2_μ . Enfin, et par définition, un faible niveau de bruit est attendu au niveau des pixels PS. Ainsi, $\sigma^2_{\Delta w}$ reste faible. Dans ce cas, il est possible d'estimer simultanément $\Delta \varepsilon^z$ et Δv avec un haut degré de précision en optimisant une fonction de mérite. En pratique, $\Delta \varepsilon^z$ et Δv peuvent être déterminés conjointement comme les valeurs qui maximisent la cohérence complexe d'ensemble dans le temps $\hat{\gamma}_{pq}$, écrite comme (Ferretti et~al.~2000) :

$$\hat{\gamma}_{pq} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} \exp\left(i\Delta w_{pq}^n\right)$$
 [5.12]

sous la condition:

$$\Delta w_{pq}^n \le \pi \tag{5.13}$$

La valeur absolue de la cohérence est comprise entre 0 et 1. Une valeur de 1 signifie une correspondance parfaite entre la phase modélisée et la phase observée. La cohérence d'ensemble des paires de PS inférieure à un seuil donné (par exemple 0,75) est généralement rejetée pour maintenir un haut degré de précision.

De cette manière, Δw_{pq}^n , $\Delta \varepsilon_{pq}^z$ et Δv_{pq} peuvent être calculés pour chaque paire de PS. Notez que les grandes distances (c'est-à-dire supérieures à 1 km) pour une paire PS doivent être rejetées pour rester dans les conditions de l'équation [5.13]. Ensuite, les variables ε^z et v peuvent être calculées pour les cibles PS en intégrant leurs valeurs relatives, $\Delta \varepsilon_{pq}^z$ et Δv_{pq} . Le plus souvent, le calcul est effectué par rapport à un pixel de référence dont on suppose que l'élévation et la vitesse sont connus. En intégrant la différence de phase résiduelle relative déroulée Δw_{pq}^n de l'équation [5.11] sur l'ensemble du réseau de pixels PS, nous pouvons obtenir les délais de phase résiduelle, w_p^n , pour chaque acquisition n et chaque PS p. Une fois que la phase résiduelle de w_p^n est disponible, la composante atmosphérique peut être séparée en appliquant un filtrage spatiotemporel. Après avoir estimé les délais atmosphériques aux positions des PS, une interpolation spatiale peut être appliquée pour obtenir les APS à la pleine résolution des interférogrammes différentiels.

5.5.2. Sélection des PS

La principale limite de l'approche PS décrite dans la section 5.5.1 réside dans la faible densité spatiale des PS sélectionnés. Pour dépasser cette limitation, les APS interpolés sont retranchés des interférogrammes différentiels, et des candidats PS

supplémentaires peuvent être identifiés en appliquant un critère de stabilité de phase. Les calculs décrits dans la section 5.5.1 sont répétés pour le nouveau réseau PS, plus dense.

Cependant, cette technique PS se révèle assez médiocre dans les zones où l'identification initiale du PS (c'est-à-dire en utilisant la stabilité de l'amplitude) ne suffit pas à couvrir toute la zone d'intérêt. Ceci peut se produire pour les zones non urbaines, en particulier pour des jeux de données souffrant de problèmes de calibration d'amplitude. La première solution à ce problème a été proposée par Hooper *et al.* (2004), qui a identifié les PS en utilisant directement un critère de stabilité de phase plutôt que sur la stabilité de l'amplitude. En comparaison avec les algorithmes basés sur l'amplitude, cette méthode produit finalement une grille de points plus dense sur les zones rocheuses. Aujourd'hui, l'ensemble des techniques analysant le changement de phase des séries temporelles de cibles stables sont appelées interférométrie de diffuseurs persistants (PSI).

Le gain de performance de la technique PSI est dû à la sélection de cibles stables et à sa capacité à éliminer les artefacts de l'APS. La technique PSI offre une estimation de phase très précise malgré les décorrélations temporelles et géométriques. De nombreuses techniques similaires ont ainsi été étudiées dans la littérature, par exemple l'analyse interférométrique de cibles ponctuelles (Werner et al. 2003), la surveillance de cibles cohérentes (der Kooij 2003), la méthode de Stanford pour les diffuseurs persistants (StaMPS) (Hooper et al. 2004), l'estimation d'ambiguïté en réseau spatiotemporel (STUN) (Kampes 2006), les paires de diffuseurs persistants (Costantini et al. 2008) et les diffuseurs quasi persistants (Perissin et Wang 2012). Ces techniques partagent des propriétés similaires dans leur recherche d'approches modifiant et améliorant la technique PS. L'algorithme StaMPS ne fait pas l'hypothèse d'un modèle de déformation préalable et comprend une approche de déroulement de phase tridimensionnelle (Hooper et Zebker 2007; Hooper 2008). L'algorithme STUN comprend un estimateur entier par moindres carrés pour résoudre l'équation [5.11] qui nous permet de ne pas poser l'hypothèse formulée dans l'équation [5.13]. De nombreuses méthodes ont été proposées pour ajouter des candidats PS plus fiables (par exemple, la diversité spectrale de phase (Werner et al. 2003), un critère de stabilité de phase (Hooper et al. 2004), le maximum de vraisemblance (Shanker et Zebker 2007)), ce qui permet d'obtenir un réseau plus dense et une meilleure estimation des mesures de phase. Le modèle de déformation linéaire peut être enrichi pour considérer la dilatation thermique (Monserrat et al. 2011) ou pour prendre en compte les phénomènes de mouvements saisonniers (Colesanti et al. 2003). Le modèle de signal donné dans l'équation [5.1] fait l'hypothèse d'un diffuseur dominant dans la cellule de résolution. En pratique, il pourrait y avoir plus d'un point dominant, comme cela arrive souvent dans le cas d'un effet de repliement radar causé par les bâtiments et les tours. La tomographie SAR, qui permet de résoudre ces repliements (Gini *et al.* 2002), peut être utilisée pour relâcher cette contrainte. Siddique *et al.* (2016) ont démontré que la tomographie SAR peut améliorer les zones de déformation affectées par le repliement.

La méthode PSI nécessite des cibles stables sur une longue série temporelle. Ceci entraîne une perte d'informations dans certains cas où les points stables peuvent être décorrélés dans la majorité des interférogrammes à faible cohérence (Hooper *et al.* 2011). Dans de tels cas de figure, l'hypothèse de PS peut être relaxée en considérant des cibles qui ne sont stables que dans un sous-ensemble de l'ensemble de données, par exemple des PS temporaires (Ferrero *et al.* 2004; Hooper *et al.* 2011) et des quasi-PS (Perissin et Wang 2012). Enfin, Ferretti *et al.* (2011) ont proposé un cadre ML pour prendre à la fois en compte les cibles PS stables et DS à décorrélation lente dans le même processus PSI. L'algorithme PSDS est donc une extension de la technique PSI.

5.5.3. Sélection des DS

Les cibles DS sont difficiles à traiter en raison de leur faible cohérence temporelle (Zebker et Villasenor 1992), qui se traduit par un petit rapport signal à bruit. Pour améliorer ce rapport, on peut exploiter un certain nombre de pixels partageant un même comportement statistique pour leur faire émuler des quasi-PS. Il faut identifier des groupes de pixels proches dans l'espace qui se comportent de manière similaire (c'està-dire qu'ils ont le même comportement statistique dans la série temporelle d'amplitudes). En pratique, ils peuvent être sélectionnés en appliquant un test de Kolmogorov-Smirnov à deux échantillons (en supposant un certain niveau de confiance) aux séries temporelles d'amplitudes du pixel considéré et de tous ses voisins. Les pixels ayant une distribution de probabilité cumulative similaire sont considérés comme des « frères ». Il est ainsi possible de créer une fratrie, ce qui produit une famille de pixels statistiquement homogènes (SHP, *Statistically Homogeneous Pixels*). Nous pouvons alors calculer la matrice de cohérence de l'échantillon ($\hat{\Gamma}$) en mettant à profit la famille SHP.

La décorrélation des cibles est un défi pour les techniques InSAR en série temporelle. Pour attaquer ce problème, une estimation ML a été proposée pour récupérer la série temporelle de phases liées (Rocca 2007 ; Guarnieri et Tebaldini 2008). Ainsi, la technique PSDS, désormais couramment utilisée, est plus performante que la technique PSI, notamment dans les zones non urbaines (Ferretti *et al.* 2011). Cette approche est devenue la principale technique pour les applications de déformation de surface (Goel et Adam 2014 ; Ho Tong Minh *et al.* 2015, 2019 ; Cao *et al.* 2016 ; Cohen-Waeber *et al.* 2018).

De nombreuses approches ont été développées pour améliorer la sélection de familles SHP : le test d'Anderson-Darling (Goel et Adam 2014), la sélection rapide

de pixels statistiquement homogènes (Jiang et al. 2015), la différence d'amplitude moyenne (Spaans et Hooper 2016), les tests t (Shamshiri et al. 2018) et la phase interférométrique de séries temporelles similaires (Narayan et al. 2018) ont été proposés pour augmenter le nombre de points DS. Ces techniques visent à réduire le biais de la cohérence de l'échantillon. Un DS suppose l'existence de petits diffuseurs indépendants avec un mécanisme de diffusion uniforme. Cette hypothèse peut être relaxée en prenant en compte deux mécanismes de diffusion, ou plus (Cao et al. 2016; Engelbrecht et Inggs 2016). Engelbrecht et Inggs (2016) ont montré l'amélioration des mesures de déformation dans les zones agricoles en exploitant l'approche de mécanisme de diffusion multiple avec les données d'ALOS PalSAR en bande L.

5.5.4. Liaison de phase

Dans les approches SB, la décorrélation des signaux conduit à la définition d'interférogrammes avec de petites lignes de base spatiales et des écarts temporels courts. Avec l'estimation ML, tous les N(N-1)/2 interférogrammes disponibles à partir de N images SLC sont exploités conjointement dans une matrice de cohérence complexe. En fait, grâce à la redondance des différences de phase entre toutes les paires, la phase peut être améliorée en exploitant la cohérence de la fermeture de phase des informations sur les triplets (c'est-à-dire les phases d'une boucle sur trois acquisitions I_1 - I_2 , I_2 - I_3 , I_3 - I_1 dont la somme devrait être nulle) (De Zan $et\ al.\ 2015$). La matrice de cohérence ($\hat{\Gamma}$) peut caractériser entièrement les statistiques de la cible et est utilisée pour inverser les phases liées ($\hat{\lambda}$) comme suit (Ferretti $et\ al.\ 2011$; Ho Tong Minh $et\ al.\ 2020$):

$$\hat{\lambda} = \operatorname{argmax}_{\lambda} \left\{ \Lambda^{H} \left(|\hat{\Gamma}|^{-1} \circ \hat{\Gamma} \right) \Lambda \right\}$$
 [5.14]

où $\Lambda = \exp(j\lambda)$; H est le conjugué (complexe) hermitien; \circ est le produit d'Hadamard; $\hat{\lambda} = \left[\vartheta^1, \vartheta^2, ..., \vartheta^N\right]$; et ϑ^n est la phase estimée. Il convient de noter que la matrice de cohérence $\hat{\Gamma}$ possède une symétrie hermitienne qui peut être calculée à l'aide de l'équation [4.12] pour les familles SHP. La qualité de la phase estimée $\hat{\lambda}$ peut être évaluée à l'aide de la cohérence PTA, qui peut être définie comme (Ferretti et al. 2011):

$$\gamma_{PTA} = \frac{2}{N(N-1)} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{N} \sum_{k=n+1}^{N} \exp\left(i(\phi^{nk} - \vartheta^n + \vartheta^k)\right)$$
 [5.15]

où ϕ^{nk} est le terme de phase correspondant aux composantes hors diagonale de la matrice de cohérence $\hat{\Gamma}$. Si la cohérence γ_{PTA} est supérieure à un certain seuil (par

exemple 0,5), un point DS avec les valeurs de phase liées $\hat{\lambda}$ sera traité conjointement avec le PS en utilisant la technique PSI, comme expliqué dans la section 5.5.1.

La phase liée est la clé de voûte de la technique PSDS, ce qui a donné lieu à de nombreuses études visant à améliorer ses performances. Cao *et al.* (2015) ont proposé des approches à pondération égale et à pondération par cohérence pour l'estimation de la phase. Samiei-Esfahany *et al.* (2016) ont étendu l'algorithme PSI STUN (Kampes 2006) utilisant le principe des moindres carrés pour estimer le nombre entier d'ambiguïtés pour les cibles à décorrélation lente. La technique d'extraction et de sélection des composantes SAR (CAESAR) (Fornaro *et al.* 2015) peut être exploitée pour décomposer différentes composantes de diffusion à partir de la matrice de cohérence (Cao *et al.* 2016). Ansari *et al.* (2017, 2018) ont proposé un estimateur séquentiel pour l'interférométrie DS. Enfin, Ho Tong Minh et Ngo (2021) ont introduit un algorithme interférométrique SAR compressé (ComSAR) dans le cadre des PSDS, particulièrement utile pour l'analyse des grands volumes de données InSAR.

5.5.5. Outils prenant en charge les traitements PS et PSDS

Aujourd'hui, divers logiciels permettent le traitement PS, mais il y a seulement deux outils PSDS disponibles. Le premier logiciel a été développé par TRE-Altamira, qui l'a baptisé SqueeSAR. La plateforme TomoSAR créée par Ho Tong Minh a été initialement développée au Politecnico di Milano, mais des développements ultérieurs ont eu lieu au CESBIO et à l'INRAE (Ho Tong Minh et Ngo 2017). Le tableau 5.1 présente quelques outils connus ainsi que leurs aptitudes.

Nom	Année	Langage	Créateur principal	Remarque	Prend en charge
Gamma	1995	C	C. Werner	Commercial	PS, SBAS
TRE-Altamira	1999	n/a	A. Ferretti	Service demand	SBAS, PSDS
StaMPS	2004	Matlab	A. Hooper	Libre accès	PS, SBAS
SARSCAPE	n/a	C	n/a	Commercial	PS, SBAS
SARPROZ	2009	Matlab	D. Perissin	Collaboration	PS
TomoSAR	2014	C	D. Ho Tong Minh	Service collaboration	SBAS, PSDS
DePSI	2014	Matlab	F. Van Leijen	Collaboration	PS

Tableau 5.1. Aperçu des logiciels de séries temporelles PS et PSDS

Bien qu'une licence Matlab soit requise, le code StaMPS est le seul outil disponible en libre accès (Hooper *et al.* 2004). StaMPS peut être utilisé pour l'analyse de PS ou de petites lignes de base. Il permet la combinaison de PS et DS avec une chaîne de traitement hybride où deux techniques (PS et SBAS) sont appliquées, puis les résultats SBAS sont inversés par un SVD avant d'être être combinés avec les PS.

5.6. Contributions des auteurs

Dinh Ho Tong Minh et Ramon Hanssen ont écrit les sections sur les techniques InSAR à diffuseur permanent/persistant et à diffuseur distribué. Marie-Pierre Doin et Erwan Pathier ont écrit les sections sur les méthodes de petites lignes de base. Tous les auteurs ont lu et approuvé le texte final.

5.7. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Fabio Rocca, Ekbal Hussain, Romain Jolivet et Raphaël Grandin pour leurs suggestions qui ont contribué à améliorer ce chapitre.

5.8. Bibliographie

- Ansari, H., De Zan, F., Bamler, R. (2017). Sequential estimator: Toward efficient InSAR time series analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(10), 5637–5652.
- Ansari, H., De Zan, F., Bamler, R. (2018). Efficient phase estimation for interferogram stacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(7), 4109–4125.
- Beauducel, F., Briole, P., Froger, J.-L. (2000). Volcano-wide fringes in ERS synthetic aperture radar interferograms of Etna (1992–1998): Deformation or tropospheric effect? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B7), 16391–16402.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383.
- Biggs, J., Wright, T., Lu, Z., Parsons, B. (2007). Multi-interferogram method for measuring interseismic deformation: Denali Fault, Alaska. *Geophysical Journal International*, 170(3), 1165–1179.
- Cao, N., Lee, H., Jung, H.C. (2015). Mathematical framework for phase-triangulation algorithms in distributed-scatterer interferometry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(9), 1838–1842.
- Cao, N., Lee, H., Jung, H.C. (2016). A phase-decomposition-based PSInSAR processing method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(2), 1074–1090.

Cette bibliographie est identique à celle de l'ouvrage correspondant en anglais publié par ISTE.

- Casu, F., Elefante, S., Imperatore, P., Zinno, I., Manunta, M., De Luca, C., Lanari, R. (2014). SBAS-DInSAR parallel processing for deformation time-series computation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(8), 3285–3296.
- Chaussard, E., Bürgmann, R., Shirzaei, M., Fielding, E.J., Baker, B. (2014). Predictability of hydraulic head changes and characterization of aquifer-system and fault properties from InSAR-derived ground deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(8), 6572–6590.
- Chen, C.W. and Zebker, H.A. (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), 1709–1719.
- Cohen-Waeber, J., Bürgmann, R., Chaussard, E., Giannico, C., Ferretti, A. (2018). Spatiotemporal patterns of precipitation-modulated landslide deformation from independent component analysis of InSAR time series. *Geophysical Research Letters*, 45(4), 1878–1887.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F. (2003). SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7), 1685–1701.
- Costantini, M., Falco, S., Malvarosa, F., Minati, F. (2008). A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 7–11 July.
- Dalaison, M. and Jolivet, R. (2020). A Kalman filter time series analysis method for InSAR. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 125(7).
- Daout, S., Doin, M.-P., Peltzer, G., Socquet, A., Lasserre, C. (2017). Large-scale InSAR monitoring of permafrost freeze-thaw cycles on the Tibetan Plateau. *Geo-physical Research Letters*, 44(2), 901–909.
- Daout, S., Doin, M.-P., Peltzer, G., Lasserre, C., Socquet, A., Volat, M., Sudhaus, H. (2018). Strain partitioning and present-day fault kinematics in NW Tibet from ENVISAT SAR interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(3), 2462–2483.
- Davidson, G. and Bamler, R. (1999). Multiresolution phase unwrapping for SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1), 163–174.
- De Zan, F., Zonno, M., Lopez-Dekker, P. (2015). Phase inconsistencies and multiple scattering in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(12), 6608–6616.
- 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(1), 35–50.

- Doin, M.-P., Lodge, F., Guillaso, S., Jolivet, R., Lasserre, C., Ducret, G., Grandin, R., Pathier, E., Pinel, V. (2011). Presentation of the small baseline NSBAS processing chain on a case example: The Etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using Envisat data. *Fringe Workshop*, Frascati.
- Doin, M.-P., Twardzik, C., Ducret, G., Lasserre, C., Guillaso, S., Jianbao, S. (2015). InSAR measurement of the deformation around siling co lake: Inferences on the lower crust viscosity in central Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014JB011768.
- Ducret, G., Doin, M.-P., Grandin, R., Lasserre, C., Guillaso, S. (2014). Dem corrections before unwrapping in a small baseline strategy for InSAR time series analysis. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(3), 696–700.
- Ebmeier, S.K. (2016). Application of independent component analysis to multitemporal InSAR data with volcanic case studies. *Journal of Geophysical Research*: *Solid Earth*, 121(12), 8970–8986.
- Elliott, J.R., Biggs, J., Parsons, B., Wright, T.J. (2008). InSAR slip rate determination on the Altyn Tagh Fault, northern Tibet, in the presence of topographically correlated atmospheric delays. *Geophysical Research Letters*, 35(12), L12309.
- Emardson, T.R., Simons, M., Webb, F.H. (2003). Neutral atmospheric delay in interferometric synthetic aperture radar applications: Statistical description and mitigation. *Journal of Geophysical Research*, 108(B5), 2231.
- Engelbrecht, J. and Inggs, M.R. (2016). Coherence optimization and its limitations for deformation monitoring in dynamic agricultural environments. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(12), 5647–5654.
- Ferrero, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F. (2004). Advances in permanent scatterers analysis. Semi and temporary PS. *European Conference on Synthetic Aperture Radar*.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2202–2212.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20.
- Ferretti, A., Novali, F., De Zan, F., Prati, C., Rocca, F. (2008). Moving from PS to slowly decorrelating targets: A prospective view. *European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2–5 June.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., Rucci, A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9), 3460–3470.

- Fialko, Y. (2006). Interseismic strain accumulation and the earthquake potential on the southern San Andreas fault system. *Nature*, 441, 968–971.
- Fornaro, G., Monti Guarnieri, A., Pauciullo, A., De Zan, F. (2006). Maximum liklehood multi-baseline SAR interferometry. *IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation*, 153(3), 279–288.
- Fornaro, G., Pauciullo, A., Serafino, F. (2009). Deformation monitoring over large areas with multipass differential SAR interferometry: A new approach based on the use of spatial differences. *International Journal of Remote Sensing*, 30(6), 1455–1478.
- Fornaro, G., Verde, S., Reale, D., Pauciullo, A. (2015). CAESAR: An approach based on covariance matrix decomposition to improve multibaseline–multitemporal interferometric SAR processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(4), 2050–2065.
- Gatelli, F., Guamieri, A.M., Parizzi, F., Pasquali, P., Prati, C., Rocca, F. (1994). The wavenumber shift in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4), 855–865.
- Ghiglia, D.C. and Pritt, M.D. (1998). *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Gini, F., Lombardini, F., Montanari, M. (2002). Layover solution in multibaseline SAR interferometry. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 38(4), 1344–1356.
- Goel, K. and Adam, N. (2014). A distributed scatterer interferometry approach for precision monitoring of known surface deformation phenomena. *IEEE Transactions* on Geoscience and Remote Sensing, 52(9), 5454–5468.
- Goldstein, R.M. and Werner, C.L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25(21), 2517–2520.
- Grandin, R., Socquet, A., Doin, M.-P., Jacques, E., de Chabalier, J.-B., King, G.C.P. (2010). Transient rift opening in response to multiple dike injections in the Manda Hararo rift (Afar, Ethiopia) imaged by time-dependent elastic inversion of interferometric synthetic aperture radar data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B9), B09403.
- Grandin, R., Doin, M.-P., Bollinger, L., Pinel-Puysségur, B., Ducret, G., Jolivet, R., Sapkota, S.N. (2012). Long-term growth of the Himalaya inferred from interseismic InSAR measurement. *Geology*, 40(12), 1059–1062.
- Guarnieri, A.M. and Tebaldini, S. (2008). On the exploitation of target statistics for SAR interferometry applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(11), 3436–3443.

- Hanssen, R.F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Ho Tong Minh, D. and Ngo, Y.-N. (2017). Tomosar platform supports for Sentinel-1 tops persistent scatterers interferometry. *IEEE International Geoscience and Re*mote Sensing Symposium (IGARSS), 1680–1683.
- Ho Tong Minh, D. and Ngo, Y.-N. (2021). ComSAR: A new algorithm for processing big data SAR interferometry. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1–4.
- Ho Tong Minh, D., Van Trung, L., Toan, T.L. (2015). Mapping ground subsidence phenomena in Ho Chi Minh City through the radar interferometry technique using ALOS PALSAR data. *Remote Sensing*, 7(7), 8543–8562.
- Ho Tong Minh, D., Tran, Q.C., Pham, Q.N., Dang, T.T., Nguyen, D.A., El-Moussawi, I., Le Toan, T. (2019). Measuring ground subsidence in Ha Noi through the radar interferometry technique using TerraSAR-X and Cosmos SkyMed data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(10), 3874–3884.
- Ho Tong Minh, D., Hanssen, R., Rocca, F. (2020). Radar interferometry: 20 years of development in time series techniques and future perspectives. *Remote Sensing*, 12(9), 1364.
- Hooper, A. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(L16302), 1–5.
- Hooper, A. and Zebker, H.A. (2007). Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series. *JOSA A*, 24(9), 2737–2747.
- Hooper, A., Zebker, H.A., Segall, P., Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23), L23611.
- Hooper, A., Ofeigsson, B., Sigmundsson, F. (2011). Increased capture of magma in the crust promoted by ice-cap retreat in Iceland. *Nature Geoscience*, 4, 783–786.
- Jiang, M., Ding, X., Hanssen, R.F., Malhotra, R., Chang, L. (2015). Fast statistically homogeneous pixel selection for covariance matrix estimation for multitemporal InSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(3), 1213–1224.
- Jolivet, R. and Simons, M. (2018). A multipixel time series analysis method accounting for ground motion, atmospheric noise, and orbital errors. *Geophysical Research Letters*, 45(4), 1814–1824.
- Jolivet, R., Grandin, R., Lasserre, C., Doin, M.-P., Peltzer, G. (2011). Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data. *Geophysical Research Letters*, 38(17), L17311.

- Jolivet, R., Lasserre, C., Doin, M.-P., Peltzer, G., Avouac, J.-P., Sun, J., Dailu, R. (2013). Spatio-temporal evolution of aseismic slip along the Haiyuan Fault, China: Implications for fault frictional properties. *Earth and Planetary Science Letters*, 377–378, 23–33.
- Kampes, B. (2006). *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*. Springer Publishing Company, New York.
- der Kooij, V. (2003). Coherent target analysis. Fringe Workshop, Frascati.
- Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorqui, J.J., Berardino, P., Sansosti, E. (2004). A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(7), 1377–1386.
- Lanari, R., Bonano, M., Casu, F., Luca, C.D., Manunta, M., Manzo, M., Onorato, G., Zinno, I. (2020). Automatic generation of Sentinel-1 continental scale DInSAR deformation time series through an extended P-SBAS processing pipeline in a cloud computing environment. *Remote Sensing*, 12(18), 2961.
- López-Quiroz, P., Doin, M.-P., Tupin, F., Briole, P., Nicolas, J.-M. (2009). Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), 1–15.
- Manunta, M., De Luca, C., Zinno, I., Casu, F., Manzo, M., Bonano, M., Fusco, A., Pepe, A., Onorato, G., Berardino, P., De Martino, P., Lanari, R. (2019). The parallel SBAS approach for Sentinel-1 interferometric wide swath deformation time-series generation: Algorithm description and products quality assessment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(9), 6259–6281.
- Maubant, L., Pathier, E., Daout, S., Radiguet, M., Doin, M.-P., Kazachkina, E., Kostoglodov, V., Cotte, N., Walpersdorf, A. (2020). Independent component analysis and parametric approach for source separation in InSAR time series at regional scale: Application to the 2017–2018 slow slip event in Guerrero (Mexico). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(3), e2019JB018187.
- Monserrat, O., Crosetto, M., Cuevas, M., Crippa, B. (2011). The thermal expansion component of persistent scatterer interferometry observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(5), 864–868.
- Mora, O., Mallorqui, J.J., Broquetas, A. (2003). Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(10), 2243–2253.
- Morishita, Y., Lazecky, M., Wright, T.J., Weiss, J.R., Elliott, J.R., Hooper, A. (2020). LiCSBAS: An open-source InSAR time series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor. *Remote Sensing*, 12(3), 424.

- Narayan, A.B., Tiwari, A., Dwivedi, R., Dikshit, O. (2018). A novel measure for categorization and optimal phase history retrieval of distributed scatterers for InSAR applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(10), 5843–5849.
- Perissin, D. and Wang, T. (2012). Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(1), 271–280.
- Pinel-Puyssegur, B., Michel, R., Avouac, J.-P. (2012). Multi-link InSAR time series: Enhancement of a wrapped interferometric database. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(3), 784–794.
- Rocca, F. (2007). Modeling interferogram stacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(10), 3289–3299.
- Samiei-Esfahany, S., Martins, J.E., van Leijen, F., Hanssen, R.F. (2016). Phase estimation for distributed scatterers in InSAR stacks using integer least squares estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(10), 5671–5687.
- Schmidt, D.A. and Bürgmann, R. (2003). Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *Journal of Geophysical Research*, 108(B9), 2416.
- Shamshiri, R., Nahavandchi, H., Motagh, M., Hooper, A. (2018). Efficient ground surface displacement monitoring using Sentinel-1 data: Integrating distributed scatterers (DS) identified using two-sample t-test with persistent scatterers (PS). *Remote Sensing*, 10(5), 794.
- Shanker, P. and Zebker, H.A. (2007). Persistent scatterer selection using maximum likelihood estimation. *Geophysical Research Letters*, 34(22), L22301.
- Siddique, M.A., Wegmüller, U., Hajnsek, I., Frey, O. (2016). Single-look SAR tomography as an add-on to PSI for improved deformation analysis in urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(10), 6119–6137.
- Spaans, K. and Hooper, A. (2016). InSAR processing for volcano monitoring and other near-real time applications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(4), 2947–2960.
- Usai, S., Del Gaudio, C., Borgstrom, S., Achilli, V. (1999). Monitoring terrain deformations at Phlegrean Fields with SAR interferometry. *Fringe 99 Workshop*, Liège.
- Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T., Wiesmann, A. (2003). Interferometric point target analysis for deformation mapping. *IEEE International Geoscience and Re*mote Sensing Symposium, 7, 4362–4364
- Wright, T.J., Parsons, B., Fielding, E. (2001). Measurement of interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2117–2120.

- Yu, C., Li, Z., Penna, N.T., Crippa, P. (2018). Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(10), 9202–9222.
- Yunjun, Z., Fattahi, H., Amelung, F. (2019). Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. *Computers and Geosciences*, 133, 104331.
- Zebker, H.A. and Lu, Y. (1998). Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: Residue-cut, least-squares, and synthesis algorithms. *Journal of the Optical Society of America A*, 15(3), 586–598.
- Zebker, H.A. and Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5), 950–959.