

DÉPLACEMENTS DE SURFACE DANS LE BASSIN HOUILLER LORRAIN : REFLET DES EXPLOITATIONS PASSÉES ET ACTUELLES

SURFACE DISPLACEMENTS IN THE LORRAINE COALFIELD: A REFLECTION OF PAST AND PRESENT UNDERGROUND OPERATIONS

Guillaume Modeste¹, Maniang Diallo¹, Marianne Conin¹, Yann Gunzburger¹

¹ *GéoRessources – École des Mines de Nancy, France*

RÉSUMÉ – La technique PS-InSAR est appliquée aux images radar Sentinel-1 acquises entre novembre 2014 et décembre 2019 à travers le bassin houiller lorrain. Les résultats révèlent l'occurrence de soulèvements autour des anciens panneaux miniers, en lien avec l'ennoyage en cours. Des déplacements sont détectés aux abords d'une carrière d'anhydrite alors que les résultats sont non-concluants concernant la production de gaz de charbon.

ABSTRACT – The PS-InSAR technique is applied to Sentinel-1 SAR images acquired between November 2014 and December 2019 across the Lorraine coalfield. The results reveal the occurrence of uplift close to old mining panels, related to the ongoing flooding at depth. Displacements are also detected in the vicinity of an anhydrite quarry, while results are inconclusive regarding the coal gas production test area.

1. Introduction

L'une des principales répercussions des activités extractives souterraines se présente sous la forme de déplacements de surface, se produisant aussi bien pendant, qu'après. Par ailleurs, les déplacements de surface nous renseignent sur l'état et l'évolution des déformations en profondeur, qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique. Le suivi précis et régulier des déplacements de surface est ainsi devenu un enjeu crucial pour les populations, les exploitants, les experts et les décideurs publics afin de quantifier les répercussions en surface et caractériser les phénomènes souterrains.

Développée il y a quelques décennies, l'interférométrie radar, ou InSAR, a révolutionné le suivi des déplacements de surface (Massonnet et Feigl, 1998). À partir du traitement d'images radar, il est en effet possible de cartographier les déplacements dans des régions de plusieurs centaines de kilomètres carrés. En outre, la précision des résultats atteint celle des méthodes conventionnelles de suivi telles que le nivellement (Katelaar, 2009).

L'exploitation du charbon par les Houillères du Bassin de Lorraine (HBL) pendant plus d'un siècle a marqué durablement la région, tant au niveau de l'aménagement du territoire que de la topographie avec la survenue d'affaissements miniers (Al Heib et al., 2005). L'exploitation s'est arrêtée en 2004 et peu de temps après, les pompages d'exhaure, permettant de maintenir les vides souterrains hors d'eau, l'ont aussi été. En conséquence, les anciens travaux miniers sont en cours d'ennoyage, phénomène connu pour induire des soulèvements. Une précédente étude a notamment mis en lumière la transition entre les affaissements miniers liés à l'exploitation et les soulèvements dus à l'ennoyage dans notre région d'étude (Samsonov et al., 2013).

Le charbon est riche en méthane, adsorbé à la surface de ses pores et créé lors du processus d'houillification. Depuis quelques décennies, ce méthane est extrait des couches de charbon en Chine, en Australie et aux États-Unis. Toutefois, concernant ces exploitations de gaz de charbon (« CoalBed Methane » ou CBM en anglais) et en dépit de la multiplication des sites opérationnels à travers le monde, l'impact potentiel d'une telle activité sur les déplacements de surface n'a été que peu étudié. Dans le bassin houiller lorrain, une phase

test de production de gaz de charbon a eu lieu de mi 2017 à fin 2019. Compte-tenu de ce contexte, l'état actuel des déplacements de surface dans le bassin houiller lorrain doit être mieux caractérisé.

2. Le bassin houiller lorrain

Le bassin houiller lorrain s'étend de la Sarre allemande à la Meuse, couvrant ainsi une aire longue d'environ 140 km et large de 70 à 80 km (Figure 1). Les veines de charbon, réparties en plusieurs couchent multi-métriques, datent du Westphalien et du Stéphanien (Donsimoni, 1981). Elles affleurent à l'Est du bassin et plongent à plusieurs kilomètres de profondeur à l'Ouest de celui-ci. Ces couches sont plissées et faillées lors de l'orogénèse hercynienne.

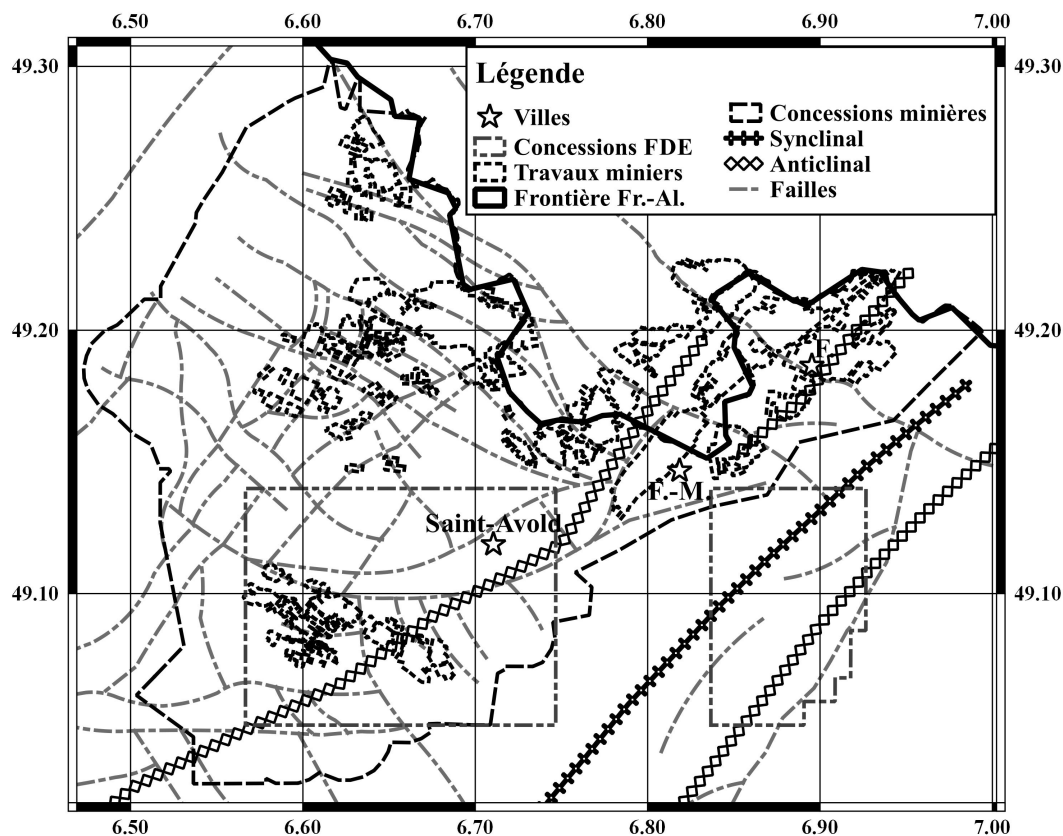


Figure 1. Carte du bassin houiller lorrain (F. : Forbach ; F.-M. : Freyding-Merlebach)

Du fait de la disparité des pendages, différentes méthodes d'extraction et de remblayage ont été employées par les HBL. Elles ont également évolué avec les avancées technologiques. À la fin de l'exploitation, les concessions minières ont couvert environ 500 km² répartis en quatre secteurs : Est (Forbach), Centre (Freyding-Merlebach), Ouest (Creutzwald, Berwiller-en-Moselle) et Sud (Foschwiller). En tout, 800 millions de tonnes de charbon ont été extraites, dont 591 t à partir de 1946.

Depuis le milieu des années 2000, l'entreprise La Française de l'énergie (FDE) conduit des travaux prospectifs en vue d'une possible exploitation du CBM dans la région et son projet est toujours en cours d'étude (estimation des volumes extractibles, qualité du gaz, potentiels impacts sur l'environnement). En lien avec les demandes de concession, une phase test de production s'est déroulée de mi-2017 à fin 2019 au puits de Lachambre (Figure 1).

3. Interférométrie radar

L'interférométrie radar repose sur le traitement d'images radar afin d'aboutir à une estimation des déplacements de surface (Ferretti, 2014). Les images radar sont acquises en continue et de manière régulière par les satellites. L'acquisition peut se faire aussi bien de jour que de nuit, quel que soit la météo, le radar étant une source active contrairement aux appareils optiques. Lors d'une acquisition, le radar émet des ondes électromagnétiques en direction de la surface terrestre, les ondes réfléchies sont ensuite captées par une antenne et enregistrées. À partir de ces ondes retour, une image est formée après plusieurs étapes de traitement. La taille d'un pixel varie de quelques mètres à quelques dizaines de mètres en fonction du satellite, cette taille définira la résolution spatiale des résultats InSAR. À chaque pixel est associé un nombre complexe, reflet de l'amplitude et du déphasage de l'onde retour. L'amplitude dépend des propriétés de la surface de réflexion et le déphasage, de la distance satellite-surface. Une fois l'archive d'images à traiter constituée, tout l'enjeu repose sur l'extraction de l'information concernant la distance satellite-surface contenue dans le déphasage et d'en déduire ensuite le déplacement. À cette fin, des interférogrammes, produit conjugué pixel à pixel de deux images radar, sont créés. Après traitement, un déplacement incrémental est calculé à chaque date pour chacun des pixels, permettant d'obtenir l'évolution temporelle du déplacement de chaque pixel. Le déplacement obtenu est orienté selon la ligne de visée du satellite (LoS), spécifique à chaque satellite et qui est une combinaison des axes verticaux et horizontaux.

Compte tenu du fort couvert végétal du bassin houiller lorrain, nous avons utilisé la méthode des réflecteurs persistants (PS-InSAR) implémenté dans le logiciel « *Stanford Method for Persistent Scatterer* » (StaMPS) (Hooper et al., 2012). En effet, les surfaces végétalisées sont connues pour impacter défavorablement la qualité du traitement, étant des sources de décorrélatons spatio-temporelles significatives. Le traitement PS-InSAR repose ainsi sur la présence de réflecteurs dominants, essentiellement des infrastructures humaines telles que des toits et des murs, afin de diminuer les bruits et les décorrélatons induites par les surfaces végétales. La formation des interférogrammes est réalisée sur le logiciel « *Sentinel Application Platform* » (SNAP) en suivant la chaîne de traitement développée à cet effet (Fourmelis et al., 2018).

Dans cette étude, nous avons traité l'archive (ou « *track* ») 88 du satellite Sentinel-1, couvrant la période du 4 novembre 2014 au 1^{er} janvier 2020 avec une acquisition tous les 12 jours, puis tous les 6 jours à partir de fin 2016 (Tableau 1).

Tableau 1. Présentation et caractéristiques de l'archive traitée.

Satellite	Track	Nombre d'images	Cycle d'acquisition	Angle d'incidence/de visée
Sentinel-1	88	217	12 jours, puis 6 jours	38.9°/36.1°

4. Résultats

4.1. La carte des vitesses moyennes LoS

Les résultats du traitement sont d'abord présentés sous forme de carte vitesse moyenne selon la ligne de visée du satellite (LoS) à l'échelle de la zone d'étude (Figure 2). La vitesse moyenne de chaque pixel est calculée avec une régression linéaire par les moindres carrés de l'évolution temporelle de son déplacement. Comme anticipé, la répartition des résultats est hétérogène du fait du fort couvert végétal de la région.

Malgré tout, des déplacements sont détectés à travers le bassin houiller lorrain. L'essentiel des vitesses est compris entre -1 et +1 mm/an, correspondant à des zones stables (Figure 2). Les soulèvements sont localisés aux abords des travaux miniers dans les secteurs Est, Centre et Ouest. L'aire impactée couvre environ 10 km selon l'axe SO-NE et 5 km selon l'axe SE-NO. En comparaison, le secteur Sud est stable. Dans les secteurs

Est et Centre, les vitesses atteignent +9 mm/an en LoS, contre à peine +3 à +4 mm/an dans le secteur Ouest. Toutefois, dans la mesure où les résultats InSAR ne couvrent pas les zones végétalisées, la vitesse moyenne du soulèvement pourrait potentiellement être plus importante dans ces zones. À l'opposé, dans la ville de Sarrebruck, côté allemand, un affaissement est détecté. La vitesse atteint -6 mm/an à travers une faible surface, inférieure à 1 km².

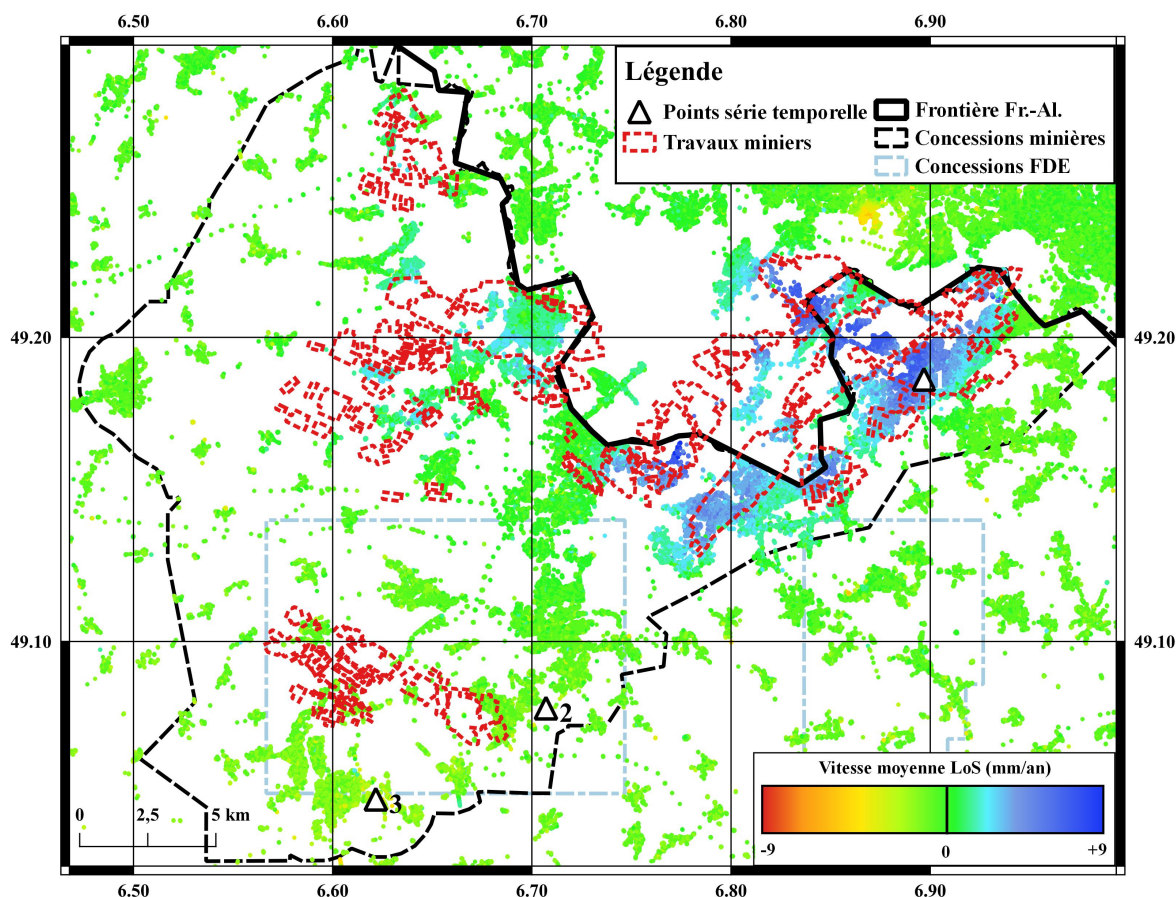


Figure 2. Carte des vitesses moyennes LoS sur la période novembre 2014 – décembre 2019. Les zones blanches correspondent en très grande majorité à des surfaces dépourvues de réflecteurs persistants. Dans ces zones, l'amplitude des vitesses moyennes peut être plus importante que dans les zones couvertes par les résultats InSAR.

4.2. Les séries temporelles

En complément des cartes de vitesses moyennes, des séries temporelles sont réalisées afin de regarder l'évolution temporelle du déplacement sur la période étudiée (Figure 3). À chaque image et à chaque date d'acquisition est estimée un déplacement incrémental pour tous les pixels. La série temporelle est réalisée en sélectionnant tous les pixels présents dans un rayon de 100 m autour du point considéré et en moyennant leur déplacement incrémental à chaque date. Si un seul pixel est présent dans le cercle, le déplacement de la série temporelle est celui du pixel.

Trois séries temporelles sont présentées ici : une dans les zones se soulevant, à Rosbruck (triangle 1), une deuxième à Lachambre (triangle 2) et une dernière aux abords de Faulquemont (triangle 3) (Figure 2). En premier lieu, une certaine dispersion est observable sur les trois séries temporelles. Bien que présente, cette dispersion est moins importante que les déplacements observés.

À Rosbruck, le déplacement cumulé est supérieur à +30 mm dans la ligne de visée du satellite (LoS) (Figure 3.a). Le déplacement est continu et la courbe semble s'infléchir. Toutefois, une plus longue période d'observation permettrait de s'assurer de ce point. Ce

soulèvement serait lié à l'ennoyage des travaux en cours. En effet, l'ennoyage des travaux miniers se poursuit dans les secteurs Est, Centre et Ouest. Le niveau d'eau en profondeur continue de monter de l'ordre de 3 à 4 m/an dans le secteur de Rosbruck. En comparaison, à Folschwiller (secteur Sud), l'ennoyage est terminé depuis quelques décennies et la zone est stable sur l'ensemble de la période étudiée. Aussi, côté allemand, les travaux miniers ne sont pas ennoyés, expliquant l'occurrence d'un affaissement à Sarrebruck.

À l'inverse, à Lachambre et à Faulquemont, les déplacements ne sont pas continus. Pour les deux séries temporelles, une première période de stabilité est observable, jusque juin-juillet 2018 à Lachambre et à Faulquemont (Figure 3.b-c). Suite à cette période de stabilité, un déplacement est détecté aux deux points. Ces deux déplacements sont concomitants à une activité souterraine, le début d'une phase test de production de gaz de charbon à Lachambre et l'extension de la carrière d'anhydrite à Faulquemont. Le déplacement cumulé est de l'ordre de 10 mm aussi bien à Lachambre qu'à Faulquemont. Toutefois, ces déplacements ne semblent pas directement liés aux activités sous-jacentes. À Lachambre, un seul pixel est utilisé pour produire la série temporelle, le seul pixel présent au-dessus de l'exploitation test et le pixel le plus proche est à environ 200 m. Le pixel détecté se situe au niveau d'une station de pompage rattachée à une station d'épuration. Il est alors difficile de déterminer si le déplacement détecté est dû à la production de gaz de charbon ou au fonctionnement de la station de pompage. À Faulquemont, le point de la série temporelle se situe à quelques centaines de mètres de l'extension. Or, la carrière se situe à environ 80 m de profondeur, la zone d'influence de la carrière s'étend alors sur une centaine de mètres autour de l'exploitation. Ainsi, pour les deux points, des recherches complémentaires sont nécessaires pour déterminer l'origine des déplacements observés.

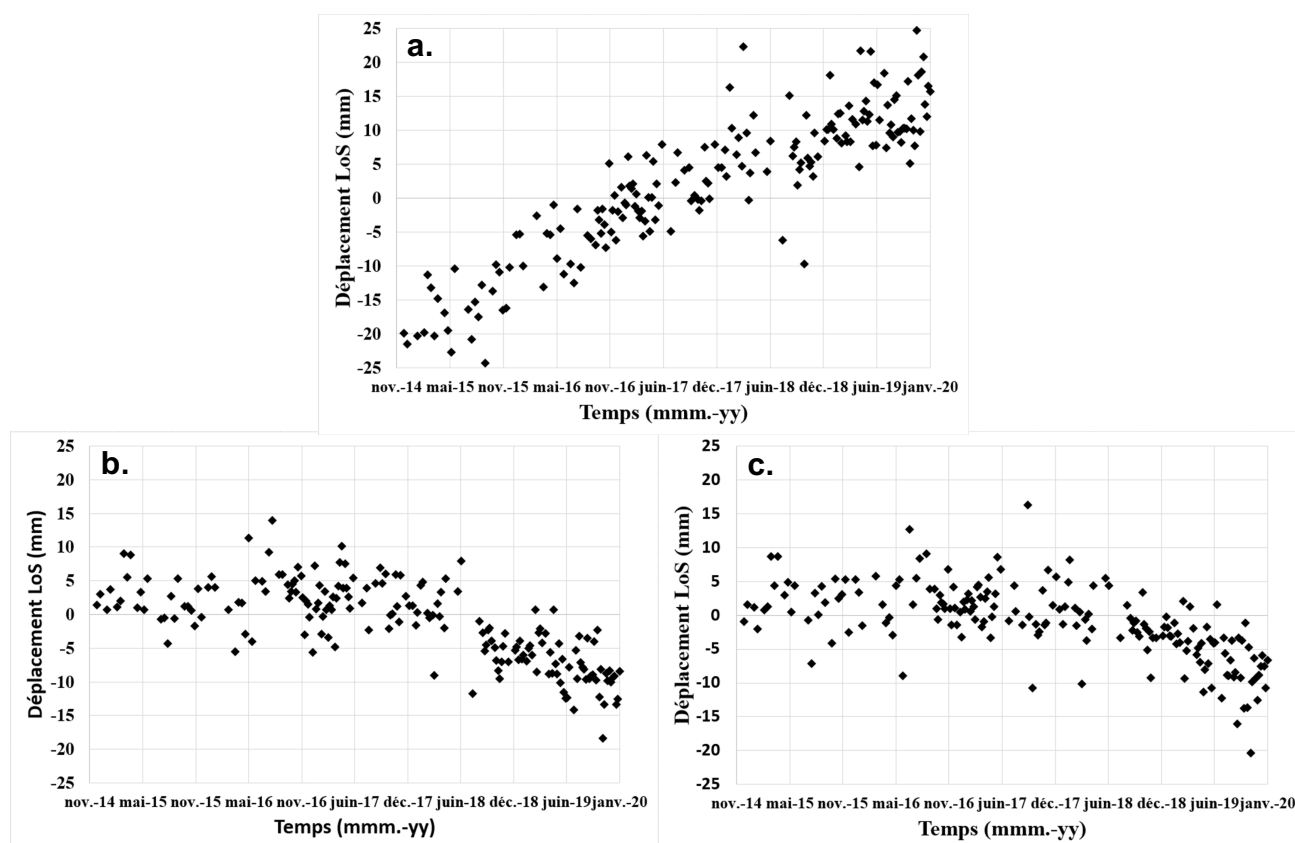


Figure 3. Série temporelle du déplacement selon la ligne de visée du satellite (LoS) à Rosbruck (a), Lachambre (b) et Faulquemont (c)

5. Conclusions

Suite au traitement de la *track* 88 du satellite Sentinel-1 par la méthode PS-InSAR, des déplacements de surface sont détectés à différents endroits du bassin houiller lorrain sur la période novembre 2014 – décembre 2019. Nos résultats démontrent l'occurrence de soulèvements en lien avec l'ennoyage des travaux miniers et ce, plus de 13 ans après le début de ce dernier. La vitesse de soulèvement atteint la valeur de + 9 mm/an selon la ligne de visée du satellite et semble décroître au cours du temps. La vitesse moyenne du soulèvement sur la période d'étude pourrait également être plus importante dans les zones végétalisées, non couverte par l'InSAR. Ces nouvelles observations enrichissent les observations déjà publiées et, contribueront à mieux cerner et anticiper l'impact de l'ennoyage dans d'autres bassins miniers. Concernant le gaz de charbon, les résultats sont non-concluants en ce qui concerne la potentielle corrélation entre les déplacements de surface et cette activité. Toutefois, un affaissement est détecté aux abords d'une carrière d'anhydrite, peu de temps après son extension. Une étude complémentaire serait nécessaire afin de déterminer l'origine des déplacements détectés. Ainsi, la carte des déplacements actuels reflète les exploitations souterraines passées et présentes dans le bassin houiller lorrain. Cet exemple illustre l'apport de l'InSAR à la gestion des territoires accueillant des activités souterraines variées.

6. Références bibliographiques

- Al Heib M., Nicolas M., Noirel J., Wojtkowiak F. (2005). Residual subsidence analysis after the end of coalmine work. Example from lorraine colliery, France. In Proceedings of the symposium Post mining 2005.
- Donsimoni M. (1981). Le Bassin Houiller Lorrain. Synthèse Géologique. Mem. BRGM.
- Ferretti A. (2014). Satellite InSAR data : reservoir monitoring from space. EAGE publications.
- Foumelis M., Delgado Blasco J.M., Desnos Y.-L., Engdahl M., Fernandez D., Veci L., Lu J., Wong C. (2018). Esa Snap - Stamps Integrated Processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry. In Proceedings of the IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium; IEEE: Valencia, July 2018; pp. 1364–1367.
- Hooper A., Bekaert D., Spaans K., Arıkan M. (2012). Recent Advances in SAR Interferometry Time Series Analysis for Measuring Crustal Deformation. *Tectonophysics*, 514–517, pp. 1–13. doi:10.1016/j.tecto.2011.10.013.
- Ketelaar, V.B.H. (2009). Satellite Radar Interferometry: Subsidence Monitoring Techniques. Remote sensing and digital image processing. Springer Science. ISBN 978-1-4020-9428-6.
- 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. doi.org/10.1029/97RG03139
- Samsonov S., d'Oreye N., Smets B. (2013). Ground Deformation Associated with Post-Mining Activity at the French–German Border Revealed by Novel InSAR Time Series Method. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, pp. 142–154. doi:10.1016/j.jag.2012.12.008.