



## Comité Français de Mécanique des Roches

### Séance technique : Interférométrie spatiale satellitaire (InSAR) : apports récents à des problèmes de mécanique des roches/géotechnique

Organisée par Jean-Dominique Barnichon

Jeudi 27 Octobre 2022 à 14h00

Séance organisée en mode hybride :

Maison de la Géologie, 79 Rue Claude Bernard 75005 Paris

Pour rejoindre la salle virtuelle :

<https://mines-paristech.zoom.us/j/96183838245?pwd=WTFzMVNzdVBjM0JsRWZ2QI9zMGdWUT09>

ID de la réunion / Meeting ID : 96183838245

Mot de passe / Password : 420403

**14:00 Accueil et introduction à la séance**

*Philippe Cosenza, Président du CFMR*

*Jean-Dominique Barnichon (BRGM)*

**14:15 Application de l'InSAR au suivi du creusement d'ouvrages souterrains**

*Marine Larrey, Ségolène Duprat (TRE Altamira, Toulouse, France)*

**14:45 Cartographie et suivi des mouvements du sol liés à l'après mine en Belgique par InSAR**

*Pierre-Yves Declercq, Xavier Devleeschouwer (Service Géologique de Belgique, RBINS, Rue Jenner, 13 – 1000 Bruxelles)*

**15:15 Apport de l'interférométrie radar (InSAR) au suivi d'anciens bassins miniers : cas du bassin potassique alsacien et du bassin houiller lorrain**

*Guillaume Modeste (GEODERIS, Metz)*

**15:45 Pause**

**16:00 Les atouts de l'InSAR pour la surveillance des mouvements du sol sur les anciens bassins miniers**

*Jacques Morel, Daniel Raucoules, M. Foumelis, G. Aslan (BRGM, Orléans)*

**16:30 Monitoring of clay shrinking and swelling using Multi-Temporal InSAR at experimental site of Chaingy (Loiret)**

*André Burnol, Michael Foumelis, Sébastien Gourcier, Jacques Deparis, Daniel Raucoules (BRGM, Orléans)*

**17:00 Discussion et fin de la séance**

**Application de l'InSAR au suivi du creusement d'ouvrages souterrains**  
*Marine Larrey, Ségolène Duprat (TRE Altamira, Toulouse, France)*  
([segolene.duprat@tre-altamira.com](mailto:segolene.duprat@tre-altamira.com) / [marine.larrey@tre-altamira.com](mailto:marine.larrey@tre-altamira.com))

L'interférométrie SAR (Synthetic Aperture Radar ou Radar à Synthèse d'Ouverture), aussi appelée InSAR, peut être appliquée à toutes les phases (conception, construction et exploitation) des projets de creusement de tunnels pour surveiller et quantifier la déformation du sol dans les zones urbaines et non urbaines.

Les zones urbaines sont particulièrement sensibles à la déformation de surface associée aux activités de creusement de tunnels. Ainsi, l'InSAR améliore de manière significative le programme de surveillance en affinant l'analyse de la déformation du sol avec une précision millimétrique. SqueeSAR®, l'algorithme développé et breveté par TRE Altamira, permet de générer une densité de points de mesure importante permettant ainsi de limiter l'instrumentation au sol.

L'utilisation d'images satellites, du fait de leur large empreinte, permet de fournir une vue synoptique qui s'étend bien au-delà des environs directs du tunnel, où la plupart des instruments in situ sont concentrés. Cette méthode non-invasive permet d'identifier et de surveiller les déformations qui peuvent se produire lors des phases de pompage par exemple, pendant la phase de construction, et également la déformation résiduelle après l'achèvement des travaux.

L'archivage des données satellitaires (images) acquises au cours des deux dernières décennies est un atout de taille de cette technologie pour fournir une base de référence historique de la déformation du sol et contribuer à l'estimation de l'impact des activités de creusement

Depuis plus de 20 ans, TRE Altamira a contribué à de nombreux projets de creusement de tunnels et a pu accompagner ses clients dans le suivi des travaux d'envergure (Grand Paris Express, Crossrail, Métro de Lima...).

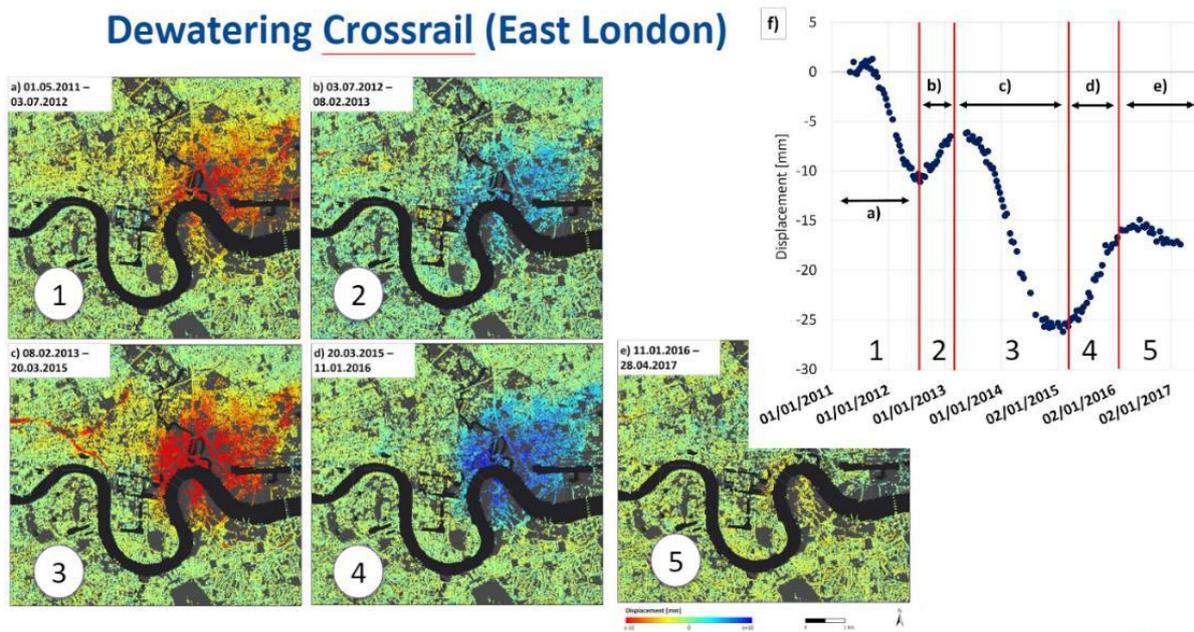


Figure 1 : Exemple d'étude InSAR sur le projet du Crossrail à Londres, observation des phases de pompage et de remonter de la nappe phréatique

## Cartographie et suivi des mouvements du sol liés à l'après mine en Belgique par InSAR

Pierre-Yves Declercq, Xavier Devleeschouwer (Service Géologique de Belgique, RBINS, Rue Jenner, 13 – 1000 Bruxelles)

[pydeclercq@naturalsciences.be](mailto:pydeclercq@naturalsciences.be) / [xdevleeschouwer@naturalsciences.be](mailto:xdevleeschouwer@naturalsciences.be)

L'interférométrie radar multitemporelle est utilisée depuis plus de trente ans par des équipes du monde entier pour mesurer et cartographier les mouvements du sol à l'échelle du mm/an. Les avantages de cette technique sont nombreux: sa précision, la fréquence d'acquisition des images de 6 à 12 jours pour SENTINEL 1, l'accès gratuit à près de 30 ans d'archives de l'Agence Spatiale Européenne et la forte densité spatiale des mesures. Cette densité est variable en fonction de la résolution, de la longueur d'onde et du nombre d'objets dans la scène reflétant le signal. En Europe, la densité de points de mesures est étroitement lié à l'urbanisation. La grande majorité des mouvements de terrain identifiés en Belgique illustre un lien de cause à effet évident avec les variations du niveau piézométrique des aquifères. Ces variations piézométriques sont pour tout ou partie liées à l'activité humaine, que ce soit pour l'exploitation industrielle de ces aquifères ou pour le rabattement nécessaire à l'extraction du charbon.. Dans le NE du pays, en Région Flamande, les anciens charbonnages du Limbourg sont actuellement sous l'influence d'un soulèvement dont la vitesse moyenne pour ces 15 dernières années est d'environ 20 mm/an. Ce phénomène est lié au rebond observé dans la piézométrie des formations géologiques entourant les parties les plus profondes des concessions houillères. La série temporelle couvrant quasi 30 ans d'acquisitions de données dans le bassin de Campine permet l'observation dans la partie occidentale du bassin minier d'une transition entre une subsidence résultat de l'exploitation minière (Figure 1A) et le soulèvement (Figure 1B). Dans la province du Hainaut en Wallonie, le bassin houiller qui est en continuité de celui du Nord Pas-de-Calais est aussi affecté par des mouvements du sol liés à l'arrêt de l'extraction du charbon et de l'exhaure. La technique PSInSAR a été utilisée dans ces deux cas d'étude. Les images SAR des satellites ERS-1/2 (1992-2001), ENVISAT (2003-2010) et Sentinel-1A (2015-2022) ont été traitées afin de fournir une évolution spatio-temporelle des mouvements.

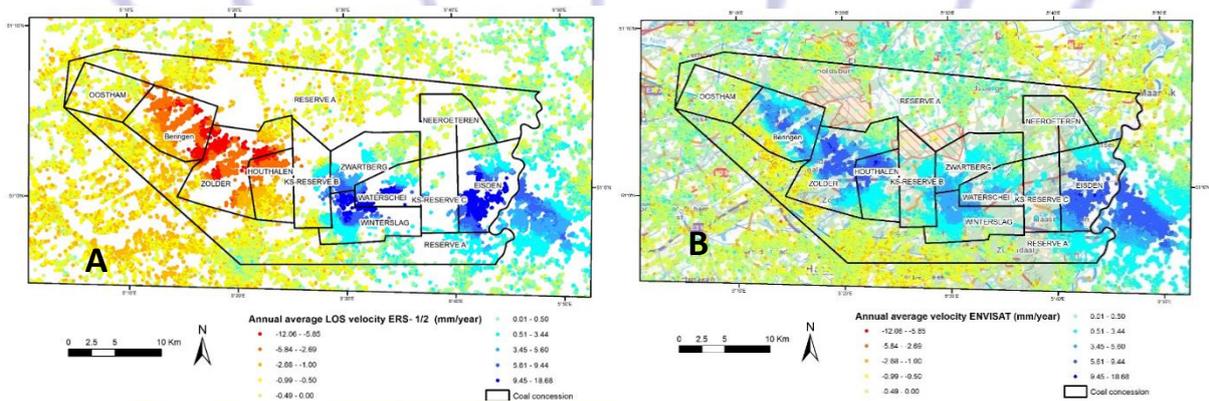


Figure 1 : Classification couleur basée sur la vitesse moyenne annuelle des PS pour ERS-1/2 (1992-2001) (A), ENVISAT (2003-2010) (B) et l'extension des concessions de charbon dans le Bassin de Campine.

## Apport de l'interférométrie radar (InSAR) au suivi d'anciens bassins miniers : cas du bassin potassique alsacien et du bassin houiller lorrain

*Guillaume Modeste (GEODERIS)*

[guillaume.modeste@geoderis.fr](mailto:guillaume.modeste@geoderis.fr)

Apparue dans les années 90, l'utilisation de l'interférométrie radar, ou « InSAR » pour « Interferometry Synthetic Aperture Radar », s'est étendue aux différents domaines des géosciences. Initialement appliquée à l'étude des séismes et autres phénomènes naturels, elle est depuis employée pour suivre et caractériser certains phénomènes anthropiques.

À partir d'images radar (ondes électro-magnétiques) acquises régulièrement par des satellites en orbite, il est possible de déduire les déplacements de surface se produisant entre deux acquisitions. L'acquisition des images est automatique et régulière, avec une période de 6 à plus de 40 jours en fonction des satellites. La résolution des images varie également d'un satellite à un autre, allant de l'échelle métrique à décimétrique. Le traitement des archives d'images ainsi constituées permet de reconstituer l'évolution des déplacements sur plusieurs années, voire plusieurs décennies.

Au cours de la phase d'exploitation des sites miniers, l'extraction du minerai en profondeur peut provoquer en surface des déplacements, appelés affaissements miniers. Ces déplacements vont dépendre de plusieurs paramètres tels que le ratio entre la largeur et la profondeur de l'exploitation, les méthodes d'extraction et de remblaiement, la nature du recouvrement, la géométrie du gisement. Toutefois, ces déplacements ne cessent pas nécessairement avec l'arrêt des travaux miniers et peuvent se poursuivre bien au-delà, pour différentes raisons.

Par ailleurs, ces déplacements constituent la réponse du recouvrement à la perturbation induite par l'exploitation. Suivre l'évolution des déplacements en surface renseigne sur l'évolution du processus en profondeur. Dans cette présentation, deux cas concrets d'apport de l'InSAR à l'étude d'anciens bassins miniers sont abordés :

- En Alsace, où la potasse a été extrait d'un massif salifère principalement par longue taille et foudroyage, les déplacements de surface permettent de nous renseigner sur la compaction des matériaux foudroyés en profondeur ;
- En Lorraine, où les travaux miniers sont en cours d'ennoyage, les déplacements de surface nous renseignent sur l'évolution de l'ennoyage.

Les résultats présentés proviennent d'études académiques. Les travaux de recherche ont été conduits lors d'une thèse effectuée à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) en partenariat avec les Mines Domaniales de Potasse d'Alsace (MDPA) soutenue en 2020 [1,2] et d'un post-doctorat réalisé au laboratoire de GéoRessources à l'Université de Lorraine entre 2020 et 2022 (travaux en cours de publication).

### Références

1. Modeste, G. *Estimation et évolution des vides miniers aux Mines Domaniales de Potasse d'Alsace (MDPA) par mesures géodésiques et modélisation géomécanique, Université de Strasbourg: Strasbourg, 2020.*

2. Modeste, G.; Doubre, C.; Masson, F. *Time Evolution of Mining-Related Residual Subsidence Monitored over a 24-Year Period Using InSAR in Southern Alsace, France. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 2021, 102, 102392, doi:10.1016/j.jag.2021.102392.*

## Les atouts de l'InSAR pour la surveillance des mouvements du sol sur les anciens bassins miniers

*Jacques Morel, Daniel Raucoles, M. Foumelis, G. Aslan (BRGM)*

[j.morel@brgm.fr](mailto:j.morel@brgm.fr)

L'arrêt des opérations de pompage à la suite de la fermeture de l'exploitation d'un bassin minier a pour conséquence la remontée de la nappe dans les anciens travaux miniers souterrains. Cette remontée de nappe peut résulter dans des mouvements du sol au-dessus des travaux miniers. Les retours d'expérience sur plusieurs bassins houillers européens abandonnés montrent qu'un soulèvement du sol est généralement observé, pouvant atteindre dans certains cas plusieurs dizaines de centimètres. Bien que ces mouvements lents et à très grand rayon de courbure ne soient pas susceptibles de générer des dommages en surface, la surveillance de ces mouvements de sol reste nécessaire, notamment pour confirmer la fin des affaissements d'origine minière. En France, cette surveillance est assurée, pour le compte de l'Etat, par le Département Prévention et Sécurité Minière (DPSM) du BRGM.

La méthode la plus couramment utilisée pour cette mission est la mesure de nivellement, réalisée à une fréquence donnée. Dans une optique d'optimisation des moyens de surveillance, le BRGM a réalisé, sur le bassin houiller abandonné du Nord-Pas de Calais, une rétro-analyse des mouvements du sol, basée sur la technique InSAR spatial (Interferometric Synthetic Aperture Radar), couvrant plus de 20 ans après la cessation de l'activité minière. Cette analyse visait à étendre les capacités de détection des mouvements du sol dans les zones non couvertes par le nivellement, ainsi qu'à comparer l'analyse InSAR aux données de nivellement pour évaluer la robustesse des mesures de déplacement par satellite. Les données des satellites ERS, ENVISAT et Sentinel-1 ont été exploitées.

L'analyse InSAR a permis de mettre en évidence des mouvements du sol de quelques millimètres par an (Figure 1), avec le même ordre de précision que les méthodes classiques de nivellement. Les déplacements du sol observés s'étendent bien au-delà du bassin houiller, indiquant l'influence de facteurs non induits par l'exploitation minière, tels que la géologie locale et la morphologie de surface. La comparaison des résultats de l'analyse InSAR avec les mesures de nivellement montre une très bonne corrélation, en mettant en lumière l'importance de s'assurer de la stabilité des repères servant de référence aux réseaux de nivellement.

Nos conclusions soulignent la capacité opérationnelle de l'InSAR spatial pour la surveillance des bassins houillers abandonnés. La technique a été récemment appliquée au bassin houiller de Provence. La prochaine mise à disposition du service européen EGMS (European Ground Motion Service) offrira de nouvelles opportunités à prendre en compte dans la surveillance des anciens bassins miniers.

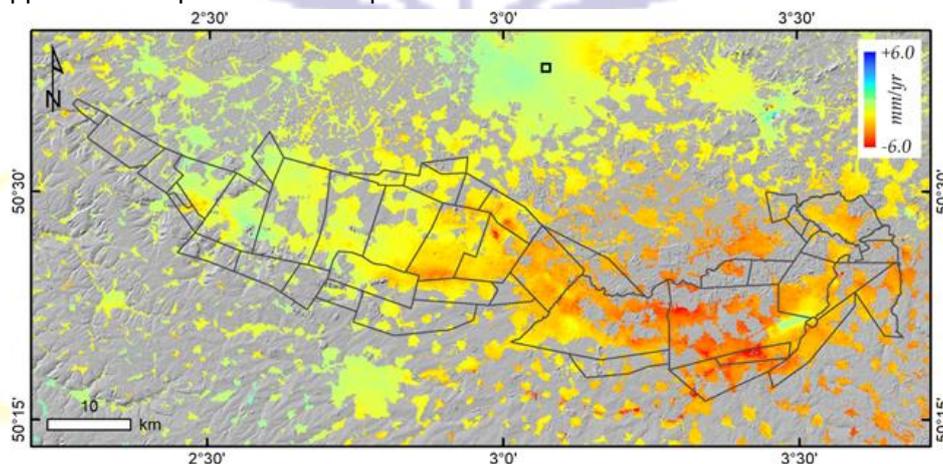


Figure 1 : Carte des vitesses de déplacement du sol – bassin houiller du Nord-Pas de Calais – période 2015-2018 (données Sentinel-1)

## Monitoring of clay shrinking and swelling using Multi-Temporal InSAR at experimental site of Chaingy (Loiret)

*André Burnol, Michael Foumelis, Sébastien Gourdier, Jacques Deparis, Daniel Raucoules (BRGM)*  
[a.burnol@brgm.fr](mailto:a.burnol@brgm.fr)

Due to the potential substantial damage to buildings and infrastructure, the mapping of expansive soils and the quantification of the clay swelling potential is a major concern for natural risk prevention plans. In France, the shrink/swell risk is the second most important cause of financial compensation from insurance companies behind the flood risk and the droughts could become more frequent and intense as observed during the year 2022. In 2010, the French Geological Survey (BRGM) published a first predictive 1:50 000 swelling-risk map of France. This map indexed the territory as (i) no, (ii) low/weak, (iii) moderate/medium, or (iv) high/strong hazard (Figure 1). The traditional way to improve this map consists of monitoring ground movements and soil moisture variations with the instrumentation of experimental sites. Since 2016, BRGM has instrumented a new site near Orléans at Chaingy[1] with a semi-oceanic climate (slightly continental). Two in situ extensometers have been deployed to monitor soil vertical displacements. Capacitive sensors also have been installed inside boreholes at different depths to track soil moisture variations continuously. For three years, the two extensometers at Chaingy show that the swelling and settlement ground movements of the surface can reach 10 millimeters in only 6 months. An innovative way to monitor the expansive clays over drought-rewetting cycles is to use the Multi-Temporal InSAR technique based on both spatially and temporally high-resolution and high-quality images from the ESA Sentinel-1 satellite.

[1] Burnol, A.; Foumelis, M.; Gourdier, S.; Deparis, J.; Raucoules, D. *Monitoring of Expansive Clays over Drought-Rewetting Cycles Using Satellite Remote Sensing. Atmosphere* 2021, 12, 1262.

<https://doi.org/10.3390/atmos12101262>

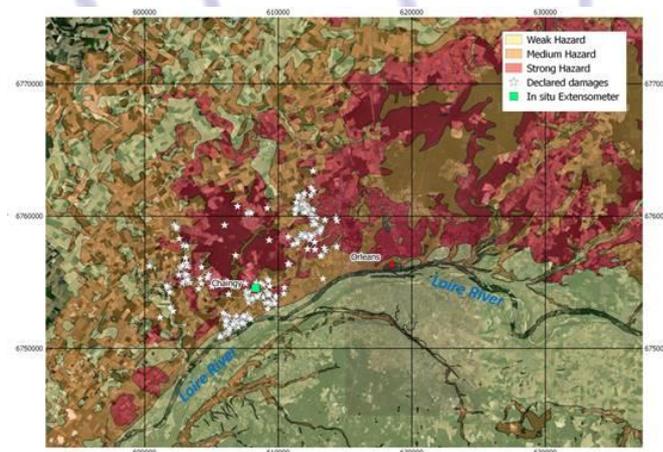


Figure 1 – Location map of the Chaingy instrumental site using extensometers (green square), with some declared building damages (white stars) and three shrink/swell hazard domains (weak in yellow, medium in orange and strong in red) based on the 1: 50 000 geological map (<http://infoterre.brgm.fr/>).

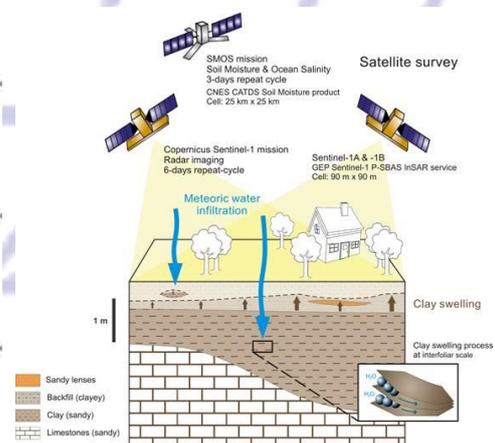


Figure 2 – Our proposed methodology show how coupling SMOS surface soil moisture and Sentinel-1 InSAR data may reveal the presence of expansive clays.