

Comparaison entre mesures satellitaires radar et mesures traditionnelles terrestres : auscultation des travaux de génie civil du projet EOLE sur la gare Haussmann Saint-Lazare

Comparison between satellite radar measurements and traditional terrestrial measurements: civil engineering works monitoring of EOLE project at Haussmann Saint-Lazare railway station.

Matthias JAUVIN, *AURIGAMI, Annecy, France*

Pierre GUSMANO, *MIRE SAS, Nanterre, France*

Fabrice COL, *Aliter Videre, Izernore, France*

Bénédicte FRUNEAU, *LaSTIG Univ. Gustave Eiffel, Marne-la-Vallée, France*

Yajing YAN, *LISTIC Univ. Savoie-Mont-Blanc, Annecy, France*

Emmanuel TROUVE, *LISTIC Univ. Savoie-Mont-Blanc, Annecy, France*

Résumé

Les travaux de génie civil associés à des projets tels que celui du Grand Paris sont souvent réalisés dans des zones critiques densément construites, ce qui implique d'effectuer un suivi précis des opérations réalisées et de mesurer leurs éventuels impacts sur le bâti environnant. Ce suivi est majoritairement opéré à partir de Stations Totales (ST) capables de mesurer en temps réel les déformations environnantes avec une très grande précision. Cependant leur coût, les problématiques liées à leur installation et leur maintenance rendent difficile leur déploiement sur l'intégralité de la Zone d'Impact Géotechnique lorsque celle-ci est très étendue, comme dans le cas des rabattements de nappe. L'Interférométrie radar satellitaire (InSAR) représente alors un complément important aux mesures terrestres. Afin de montrer le potentiel d'utilisation des données radar Sentinel-1 pour le suivi des travaux souterrains, une étude comparative entre mesures InSAR, mesures avec ST et mesures de nivellement a été réalisée à partir des données acquises dans le cadre des travaux de génie civil de l'entonnement Ouest de la gare Haussmann Saint-Lazare (HSL) dont AURIGAMI s'est vu confier le suivi InSAR pour le groupement ALLIANCE. Cette étude a mis en évidence une différence moyenne de vitesse de déformation inférieure au mm/an entre les mesures des ST et les mesures satellitaires lors des phases de travaux préparatoires et lors des 3 premiers mois de la phase de rabattement de nappe.

Abstract

The civil engineering works associated with projects such as the "Grand Paris" project are often performed in densely built critical areas, which means that the operations carried out must be precisely monitored and their possible impact on the surrounding buildings must be measured. This monitoring is mainly carried out from Total Stations (TS) capable of measuring the surrounding deformations in real time with a very high degree of accuracy. However, their cost and the problems linked to their installation and maintenance make it difficult to deploy them over the entire Geotechnical Impact Zone when the zone is very large, as in the case of groundwater table drawdown. In this case, Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) is an important complement to ground-based measurements. In order to show the potential use of Sentinel-1 radar data for monitoring underground works, a comparative study between InSAR measurements, measurements with ST and levelling measurements has been carried out using data acquired during the civil engineering works on the western section of the Haussmann Saint-Lazare station (HSL) for which AURIGAMI was entrusted with InSAR monitoring for the ALLIANCE group. This study revealed a mean deformation rate difference of less than one mm/year between ST measurements and satellite measurements during the preparatory work phases and during the first 3 months of the drawdown phase.

Comparaison entre mesures satellitaires radar et mesures traditionnelles terrestres : auscultation des travaux de génie civil de l'entonnement Ouest de la gare Haussmann Saint-Lazare

Comparison between satellite radar measurements and traditional terrestrial measurements: civil engineering works monitoring of the western section of the Haussmann Saint-Lazare railway station.

Matthias JAUVIN, *AURIGAMI, Annecy, France*

Pierre GUSMANO, *MIRE SAS, Nanterre, France*

Fabrice COL, *Aliter Videre, Izernore, France*

Bénédicte FRUNEAU, *LaSTIG Univ. Paris-Est Marne-la-Vallée, Saint-Mandé, France*

Yajing YAN, *LISTIC Univ. Savoie-Mont-Blanc, Annecy, France*

Emmanuel TROUVE, *LISTIC Univ. Savoie-Mont-Blanc, Annecy, France*

1 Introduction

Avec l'expansion rapide de l'urbanisation, la construction d'importants réseaux de métro s'est avérée être un moyen très efficace pour améliorer la connexion entre les territoires tout en décongestionnant le trafic urbain (Kim et Lee 2003, Ghorbani et al. 2012, Ye et al. 2012). Cependant, ces projets de plus en plus complexes réalisés à l'aplomb de zones très urbanisées sensibles aux déformations (Eclaircy-Caudrin 2012) nécessitent une attention particulière. L'auscultation topographique tient alors une place importante dans la réalisation et le suivi de tels projets, tant lors de la phase de construction pour vérifier le bon déroulement des travaux, qu'au cours de la phase d'exploitation, pour juger de la viabilité des installations et estimer les éventuelles maintenances à effectuer. Parmi les différentes approches employées, les mesures d'auscultation topographique traditionnelle telles que les mesures par Stations Totales (ST) représentent un puissant outil permettant de suivre en temps réel les évolutions des ouvrages et des avoisinants avec une très grande précision. Cependant, ces mesures étant effectuées sur des prismes préalablement installés, le choix de leur implantation affecte directement la qualité de l'auscultation. Il est donc nécessaire de définir en amont la Zone d'Impact Géotechnique (ZIG) théorique afin de définir au mieux l'implantation des prismes. Autre facteur contraignant, la visibilité doit être maintenue tout au long de l'auscultation, ce qui peut s'avérer complexe, notamment dans une zone fortement urbanisée présentant une activité importante. Ainsi, les problématiques liées à l'installation des prismes et à leur maintenance, ainsi que le prix des ST, tendent à restreindre la couverture des mesures réalisées.

Contrairement aux mesures d'auscultation topographique, les mesures issues de l'interférométrie radar satellitaire (InSAR) offrent une très grande couverture, grâce à l'utilisation d'images radar de plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres carrés, mais souffrent d'une fréquence de mesure réduite (6 jours avec les satellites Sentinel-1) par rapport aux mesures sur prismes. Depuis les premiers résultats de mesure de déformation sismique en 1993 (Massonnet et al. 1993), l'InSAR est devenu un outil puissant pour le suivi des déformations de surface (Trouvé 1996, Lopez Quiroz 2008). Grâce à l'amélioration de la précision des mesures et à la réduction des temps de calcul, l'utilisation opérationnelle de l'InSAR est devenue de plus en plus régulière, notamment dans le domaine du génie civil. Plusieurs projets majeurs ont déjà été suivis par InSAR parmi lesquels on peut citer le projet Crossrail à Londres, et actuellement le projet du Grand Paris. Les avancées récentes sur l'utilisation de séries temporelles d'images (Yan 2011), notamment grâce à l'arrivée des données haute résolution (Cosmo-SkyMed, Radarsat-2, TerraSAR-X, TanDEM-X, etc.) ont permis d'atteindre des mesures de vitesse de déformation d'une précision proche du millimètre/an, offrant ainsi des outils plus adaptés à un usage opérationnel. En passant d'une résolution de 5 m x 20 m en bande C à une résolution allant jusqu'à 1 m x 1 m (en bande X pour Cosmo-SkyMed et TerraSARX), les capteurs Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO, ou SAR en anglais) apportent de meilleures performances à la fois en terme de précision de localisation et en terme de sensibilité au déplacement

(Prati et al. 2010). Cependant, le prix de ces images haute résolution représente encore un frein dans certaines applications pour lesquelles un suivi traditionnel sera préféré à l'InSAR. Avec le lancement de la constellation Sentinel-1 (2014 & 2016) offrant une couverture à 6 jours sur l'ensemble de l'Europe (12 jours ailleurs) avec des données en libre accès, il est possible d'envisager une utilisation plus systématique de l'InSAR pour des suivis opérationnels. Afin de mettre en évidence le potentiel de ces nouvelles données pour le suivi d'impact en surface de travaux souterrains, une étude comparative entre mesures InSAR et mesures d'auscultation topographique traditionnelle a été réalisée dans le cadre des travaux de génie civil de l'entonnement Ouest de la gare Haussmann Saint-Lazare (HSL), qui constitue l'ouvrage qui relie l'arrière gare HSL Ouest existante d'EOLE au futur tunnel à 2 voies creusé au tunnelier. Ces travaux nécessitent de réaliser des rabattements de nappe, ce qui a pour effet de créer une ZIG relativement importante. L'InSAR apparaît alors comme un outil complémentaire aux mesures par ST permettant de définir précisément les limites de la cuvette de déformation.

Dans cet article, nous présentons dans un premier temps le projet EOLE et plus particulièrement les travaux de génie civil de l'entonnement Ouest de la gare HSL en détaillant les principaux risques de désordres rencontrés sur ce site. Dans un second temps, nous introduisons les principes de base de l'interférométrie radar en présentant son potentiel pour le suivi d'impact en surface de travaux souterrains. Une troisième partie est consacrée à la présentation des résultats des traitements InSAR et à leur comparaison avec ceux issus de l'auscultation topographique traditionnelle (ST, nivellement). Enfin, une dernière partie est consacrée aux conclusions faites sur le potentiel d'utilisation de l'InSAR et des données Sentinel-1 pour le suivi d'impact de travaux souterrains et sur la complémentarité avec les mesures d'auscultation topographique traditionnelle.

2 EOLE et l'entonnement Ouest de la Gare Haussmann Saint-Lazare

2.1 Présentation du projet

Le projet EOLE correspond au réaménagement de la ligne existante du RER E (mise en service en 1998) sur une longueur de 47 kilomètres entre Mantes-la-Jolie et Nanterre et à la création d'un nouveau tunnel d'environ 8 km entre La Défense et Haussmann Saint-Lazare (Binet 2018). Le projet s'accompagne également de la création de deux gares souterraines (Porte Maillot et La Défense-CNIT) et d'une gare extérieure (Nanterre La Folie) (Verdaguer et Mallie 2009, Binet 2018). L'excavation est réalisée par un tunnelier à confinement sur 6,1km et par méthode traditionnelle au niveau de la Gare la Défense et de la Gare HSL (voir figure 1). Lancés en 2016, les travaux ont pour objectif une mise en service de la nouvelle ligne E du RER, dès 2022 pour la portion HSL / Nanterre la Folie, et dès 2024 pour la ligne complète jusqu'à Mantes la Jolie.

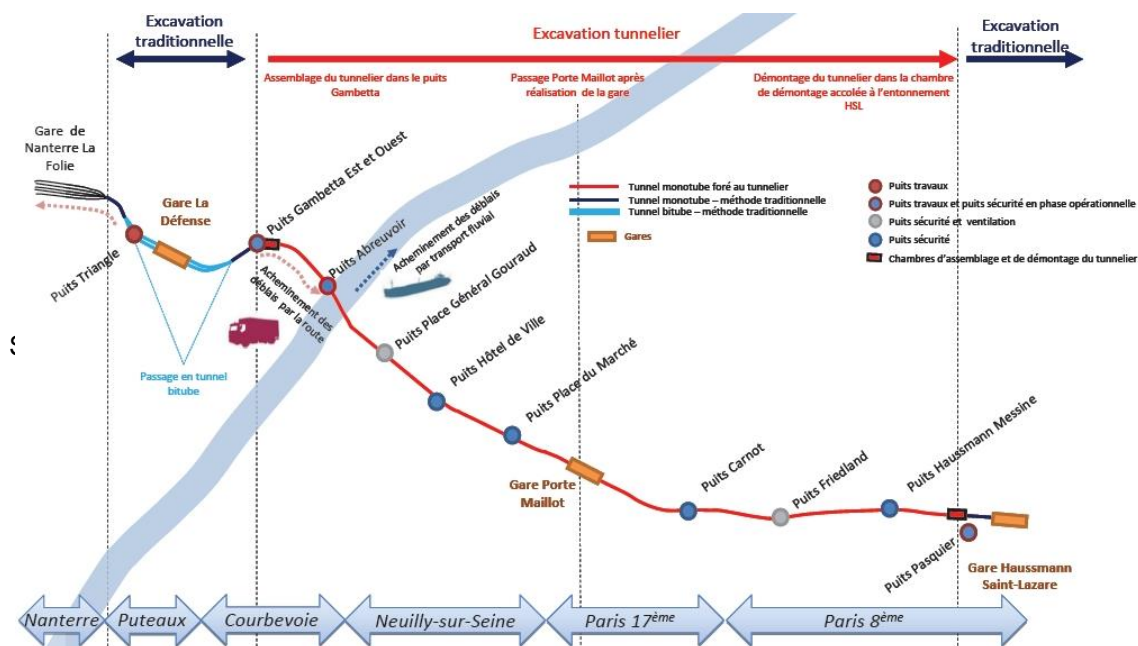


Figure 1. Schéma synthétique des ouvrages souterrains du projet EOLE (Source :SYSTRA)

2.2 Rabattements de nappe

Afin d'assurer le raccordement entre la nouvelle ligne et la gare Hausmann-Saint-Lazare, un ouvrage souterrain de transition appelé entonnement doit également être construit (Binet 2018). Cet ouvrage consiste en une succession de chambres de largeurs différentes permettant l'adaptation progressive de l'arrière gare à la section courante du futur tunnel (SNCF 2015). Tout comme les gares souterraines de Porte Maillot et CNIT-La Défense, l'entonnement HSL est situé dans les Calcaires Grossiers du Lutécien et dans les Sables de Cuise de l'Yprésien (SNCF 2014), horizons dans lesquels se trouvent deux nappes d'eau souterraine (SNCF 2015). Sans rabattement initial, les ouvrages pourraient agir comme un drain, conduisant à un rabattement non maîtrisé. De plus, la réalisation d'un jet grouting pour le traitement des Sables de Cuise ne peut se faire sous nappe (SNCF 2015). La réalisation de ces trois ouvrages nécessite donc de procéder à des pompages pour abaisser le niveau des nappes. Il est prévu que les rabattements sur des hauteurs comprises entre 15 et 20 m au droit des ouvrages aient un effet à grande échelle sur la piézométrie (voir figure 2), visible sur environ 8 km au Nord Est de Paris (SNCF 2015), avec environ une baisse d'environ 0.5 m à la limite Nord de Paris, au Sud de Saint-Denis (voir figure 2). Les effets devraient être limités à l'Ouest et au Sud du fait de la présence de la Seine, jouant un rôle de barrière (SNCF 2015).

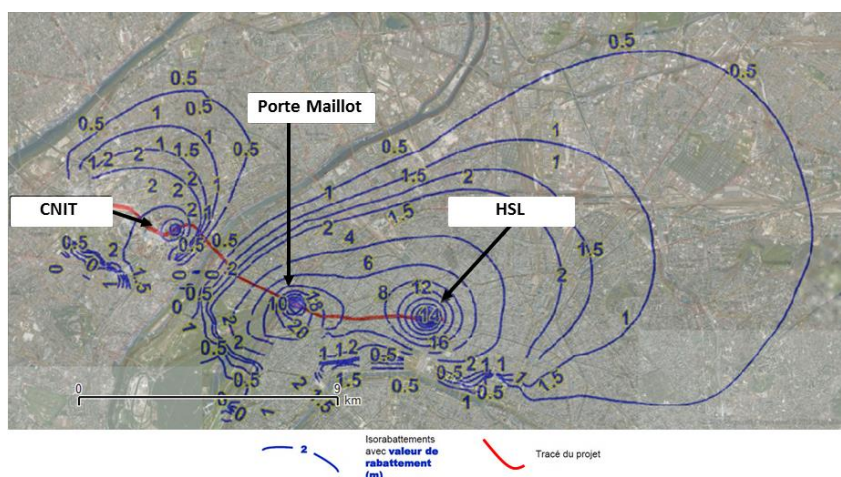


Figure 2. Simulation des isopièzes lors du rabattement prévu de la nappe des Calcaires Grossiers (version modifiée (SNCF 2014))

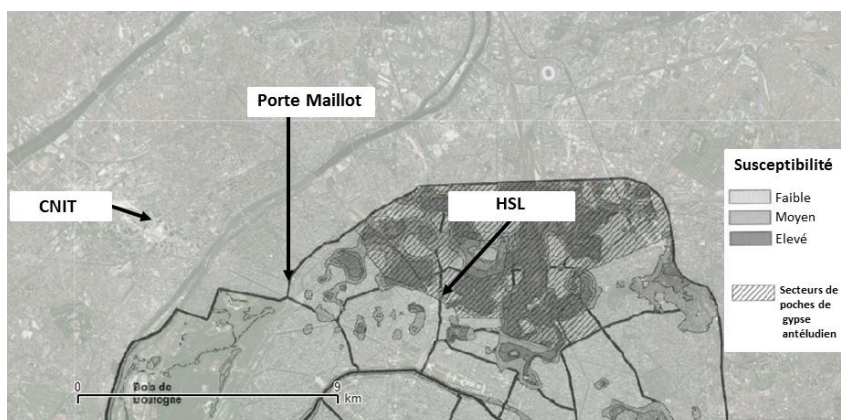


Figure 3. Carte de susceptibilité aux mouvements de terrain liés à la dissolution de gypse dans les Marnes et Caillasses (d'après Thierry et al. 2008)

Du fait de ces opérations de pompage, il est nécessaire de réaliser une auscultation à grande échelle, afin de maîtriser au maximum les risques de tassements. En effet, en plus des effets immédiats de tassements, les variations de la piézométrie sont susceptibles d'entraîner une dissolution du gypse, par réactivation ou amplification du phénomène (voir figure 3). Ainsi le risque principal de dissolution du gypse lié au projet EOLE vient des circulations potentiellement accrues, causées par les rabattements de nappe (SNCF 2014). L'étude d'impact réalisée en 2011 par SNCF Réseau puis

actualisée en 2014 (SNCF 2014) a montré que les zones présentant un risque de dissolution de gypse lié aux pompages de rabattement correspondent au secteur des Batignolles et au secteur du cimetière de Montmartre.

2.3 Auscultation topographique pour l'entonnement HSL

La réalisation des travaux de génie civil de l'entonnement Ouest de la gare Haussmann Saint-Lazare nécessite de mettre en place un suivi régulier de l'impact de ces derniers sur les ouvrages souterrains avoisinants (lignes 13 et 14 et gare HSL notamment) ainsi que sur les infrastructures en surface. Pour se faire, un système complet d'auscultation (prismes et stations totales, points de nivellement, inclinomètres, fissuromètres, géophones) a été mis en place en surface et en souterrain par la société MIRE. L'auscultation topographique réalisée en continu avec les stations totales (mesures toutes les deux heures) couvre l'ensemble de ZIG liée aux travaux d'excavation (voir figure 4) mais ne peut couvrir la ZIG liée aux pompages (voir figure 2 et 4). Pour pallier cela, un suivi interférométrique sur la période Mars 2016/Mars 2017 a été réalisé (état zéro), suivi d'une mise à jour régulière, d'abord mensuelle jusqu'au début des travaux souterrains puis bimensuelle.

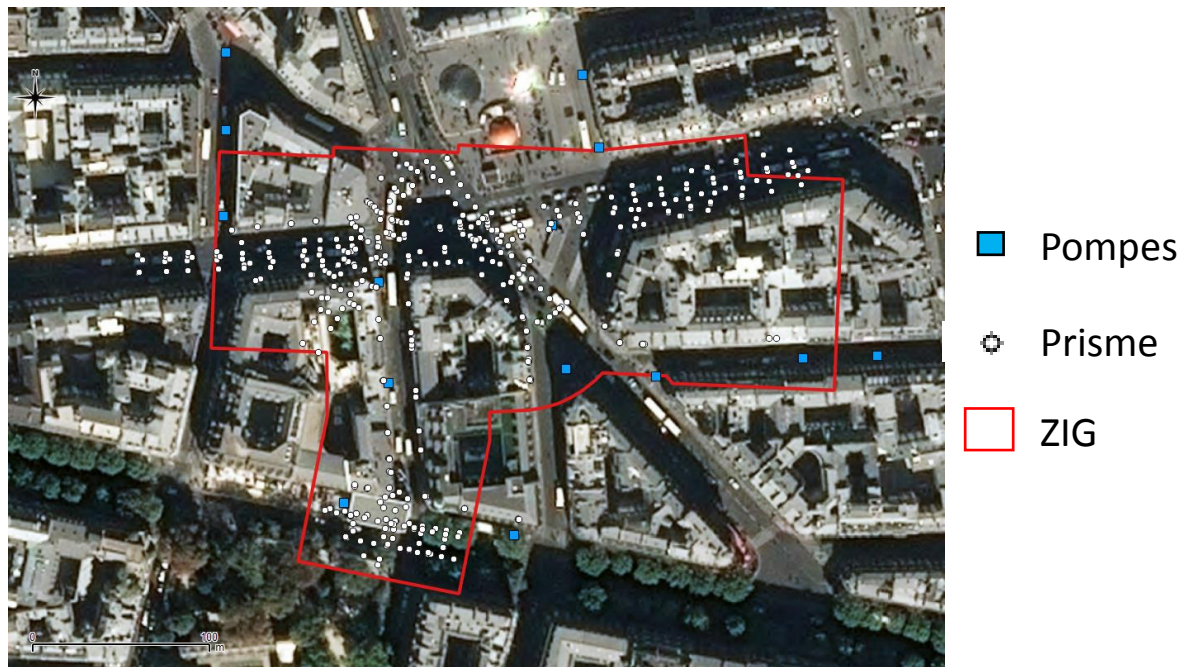


Figure 4. ZIG du chantier HSL et localisation des pompages et des prismes

3 Auscultation topographique satellitaire

3.1 Principes de l'InSAR

L'InSAR consiste à comparer les phases de deux images SAR d'une même région, acquises à partir de deux positions légèrement différentes dans l'espace et le temps (Massonnet et Feigl, 1998). Cette technique consiste essentiellement à soustraire les phases des deux images SAR, permettant d'obtenir la phase interférométrique, qui peut être exprimée sous la forme :

$$\Delta\phi_{\text{int}} = \phi_{\text{déplacement}} + \phi_{\text{orbitale}} + \phi_{\text{topographique}} + \phi_{\text{atmosphère}} + \phi_{\text{bruit}} \quad (1)$$

où $\phi_{\text{déplacement}}$ correspond à la composante de déformation, fournissant une information sur le déplacement le long de la ligne de visée du satellite. ϕ_{orbitale} représente la composante orbitale et $\phi_{\text{topographique}}$ la composante topographique, toutes deux présentes du fait de la position légèrement différente du satellite entre deux passages. La composante atmosphérique $\phi_{\text{atmosphère}}$ témoigne d'un retard dans la propagation de l'onde causé par l'hétérogénéité de l'atmosphère. Enfin, la composante liée au bruit ϕ_{bruit} est due aux diverses sources de décorrélation parmi lesquelles figurent la

décorrélation due au bruit thermique lié au capteur, la décorrélation spatiale et la décorrélation temporelle (Lopez Quiroz 2008). Afin d'accéder à l'information de déplacement, il est donc nécessaire de supprimer préalablement les contributions autres que celles correspondant au déplacement. Il est possible de soustraire de façon plus ou moins complète la composante topographique en utilisant un Modèle Numérique de Terrain (MNT) ainsi que la composante orbitale à partir des données orbitales précises fournies avec les images radar. On accède alors à la phase interférométrique différentielle. En revanche, la composante atmosphérique et le bruit peuvent représenter une véritable limite dans l'application de l'interférométrie différentielle à partir de deux images radar. Afin de s'affranchir de ces limites, des techniques avancées ont été développées aux cours des 20 dernières années en se basant sur l'utilisation d'une série temporelle d'images SAR et désignées sous le terme de techniques multi-temporelles.

3.2 InSAR appliquée aux subsidences urbaines

3.2.1 Méthodes multi-temporelles PS

Parmi les principales techniques multi-temporelles, celles reposant sur la sélection de points communs à toutes les images et dont le signal radar est renvoyé au satellite de façon constante et claire, sont particulièrement adaptées aux suivis de déformation en zone urbaine. Ces méthodes, dites méthodes des diffuseurs persistants (ou PS pour Permanent Scatterer), permettent de suivre l'évolution au sol de points persistants correspondant généralement à des structures artificielles telles que des bâtiments, des ponts ou à des affleurements. Le principe de ces techniques est d'estimer conjointement la vitesse de déformation et la hauteur d'objets au sol, à partir de couples d'images radar ayant une référence commune et en se basant uniquement sur les pixels qui ne sont pas ou peu affectés par la décorrélation spatiale et temporelle (Ferretti et al. 2000).

3.2.2 Méthodes multi-temporelles SB

D'autres techniques multi-temporelles consistent à traiter l'ensemble des pixels des images radar mais en ne sélectionnant que les couples d'images dont les écarts temporels et temporels ainsi que les écarts de position du satellite entre les deux acquisitions (écarts spatiaux) sont réduits. Ces approches, désignées sous le terme SB pour Small Baselines, offrent notamment de réduire le bruit dans les interférogrammes (Berardino et al. 2002) et permettent une certaine redondance de l'information : un même événement est observé dans plusieurs couples interférométriques (Jolivet 2011). Cette redondance permet de minimiser les erreurs d'estimation sur l'évolution temporelle de la déformation.

3.2.3 Méthodes multi-temporelles hybrides

Afin de tirer profit des avantages de ces deux types de techniques, des approches hybrides ont également été développées. Ces techniques reposent sur la sélection de diffuseurs persistants et sur la sélection de couples présentant des petits écarts spatiaux et temporels.

Cette étude présente les résultats issus des traitements de données radar Sentinel-1, acquises en trajectoire descendante entre Mars 2016 et Juin 2019, à partir d'une approche multi-temporelle hybride. La méthode consiste à estimer dans un premier temps la correction topographique et le délai atmosphérique, puis à réaliser une inversion en série temporelle à partir d'une décomposition en valeurs singulières pour estimer la vitesse de déformation des diffuseurs sélectionnés préalablement. Les résultats de ces traitements sont présentés dans la section 4 de cet article. Par convention, une valeur positive (négative) de déplacement dans la ligne de visée radar indique un rapprochement (éloignement) de l'objet mesuré par rapport au satellite.

4 Résultats et interprétations

4.1 Estimation des vitesses de déformation sur l'agglomération Parisienne

Le traitement de 131 images Sentinel-1 acquises entre Septembre 2016 et Novembre 2018 a permis d'estimer les vitesses moyennes de déformation dans la ligne de visée du satellite sur l'ensemble de l'agglomération Parisienne et ainsi de mettre en évidence plusieurs secteurs présentant des déformations de surface (voir figure 5). Des zones de déformations connues, telles que la butte de Montmartre, la butte Bonne-Nouvelle et le Boulevard Saint-Martin (encadrés rouge de la figure 5),

dont les déformations sont liées à la présence d'anciennes carrières de gypse ou de remblais (Magalhaes 2010), ont été mis en évidence avec des déplacements lents de quelques millimètres par an. Le traitement InSAR a également permis d'identifier 3 autres secteurs (encadrés noirs de la figure 5). L'étude interférométrique a révélé des vitesses supérieures à -4 mm/an au niveau du quartier des Batignolles, lieu d'un important projet d'aménagement urbain, ainsi qu'à la surface de la nouvelle gare Porte Maillot et de l'entonnement Ouest HSL. Les effets des rabattements de nappe sur le chantier HSL sont particulièrement visibles, permettant de définir la vraie ZIG due aux opérations de pompage. Celle-ci s'étend bien au-delà de la zone de pompages, comme cela a déjà été observé sur ce secteur par InSAR lors de la construction de la gare Haussmann-Saint-Lazare du RER E (Fruneau et al., 2004, 2005).

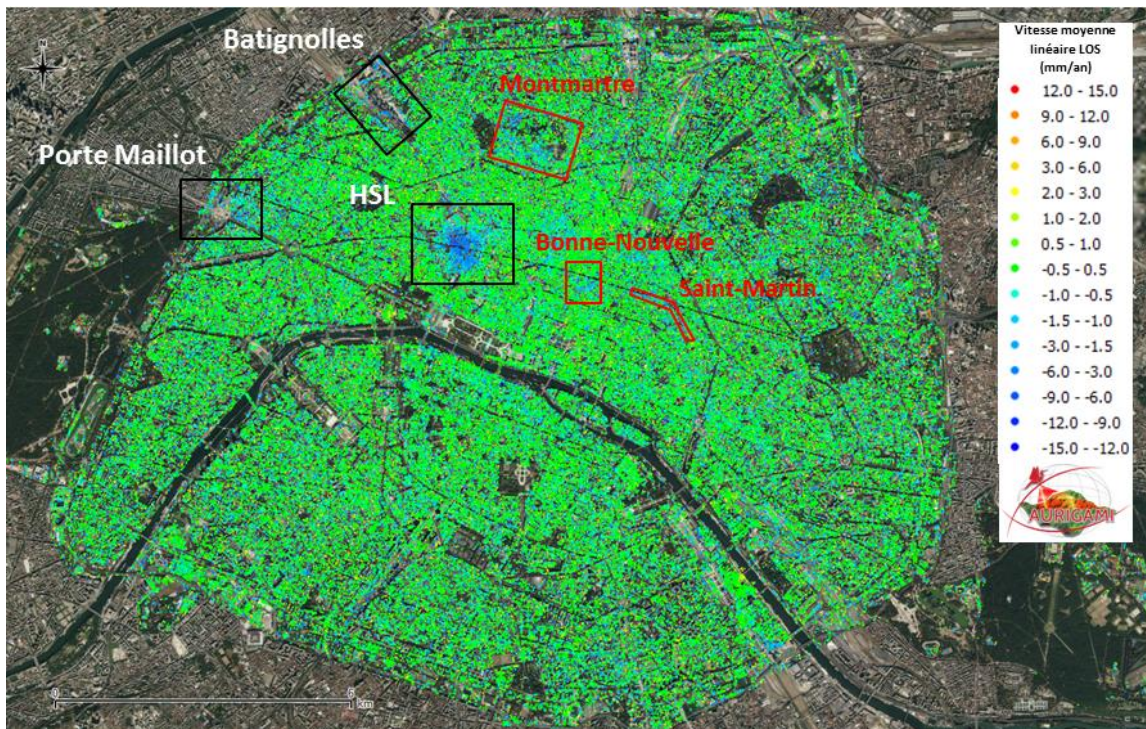


Figure 5. Carte des vitesses moyennes de déformation dans la ligne de visée du satellite sur la ville de Paris entre Septembre 2016 et Novembre 2018



Figure 6. Carte des vitesses moyennes de déformation dans la ligne de visée du satellite sur le quart Nord-Ouest de la ville de Paris entre Mars 2016 et Juin 2019. Les numéros 1 à 4 indiquent la position des mesures présentées dans la figure 7.

La détection de petites déformations historiquement connues permet de valider l'approche utilisée pour mesurer de très petits déplacements tandis que la détection d'effets en surface de travaux souterrains tend à valider le potentiel d'utilisation des données Sentinel-1 pour l'auscultation des travaux du génie civil.

4.2 Estimation des vitesses de déformation sur le chantier HSL

Le suivi interférométrique des effets des travaux de génie civil et notamment le suivi des rabattements de nappe a été réalisé sur le chantier HSL avec des mises à jour bimensuelles. A la fin de l'année 2019, cela représente 198 images traitées depuis Mars 2016. La figure 6 présente les vitesses de déformation dans la ligne de visée du satellite issues de la deuxième mise à jour de Juin 2019. Les secteurs identifiés dans la figure 5 sont de nouveau détectés. Concernant les vitesses de déplacement mesurées à la surface du chantier HSL, on remarque que la cuvette de déformation s'étend bien au-delà de la ZIG des travaux d'excavation (en jaune sur la figure 6). Afin d'interpréter les résultats obtenus, les séries temporelles de déplacement ont été analysées et comparées aux relevés piézométriques, montrant une très forte corrélation entre ces deux types de mesure. En prenant comme exemple les 4 points identifiés dans la figure 6, on remarque un point de rupture dans les séries temporelles en Mars 2018, coïncidant avec le début des opérations de pompage (figure 7). Les principaux effets des rabattements de nappes ont lieu dans les 3 premiers mois, entre Mars et Juin 2018. Bien que le niveau minimal soit rapidement atteint par les nappes au début du mois de Juin, l'effet maximal en surface n'est détecté qu'à la fin du mois, montrant que la réponse du sous-sol n'est pas immédiate. On remarque également que plus les points sont éloignés des pompes (voir figures 4 et 6) plus les déplacements sont réduits, ce qui est en accord avec les isopièzes théoriques présentés dans la figure 2. A noter également que des variations saisonnières sont visibles dans les séries temporelles de la figure 7, en particulier pour P4 qui est le point le moins affecté par le signal de déformation lié au pompage. Ce comportement est caractérisé par de très faibles déplacements négatifs (éloignement) en été et de très faibles déplacements positifs (rapprochement) en hiver. Ces effets semblent être corrélés avec les vidanges des nappes lorsque la pluviométrie est réduite en été et avec les recharges des nappes suite aux précipitations en hiver.

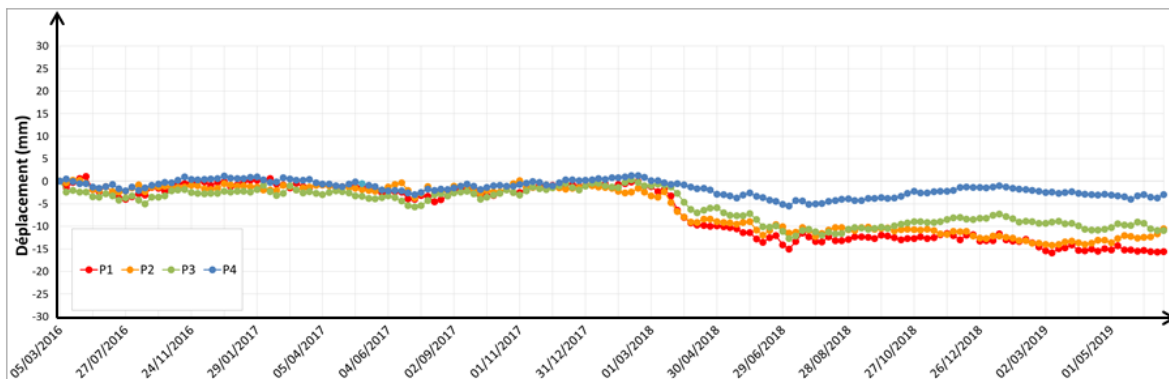


Figure 7. Série temporelle de déplacement de 4 diffuseurs présents à la surface du chantier HSL

4.3 Comparaison entre mesures satellitaires et mesures terrestres

4.3.1 Projection des déplacements

L'étude réalisée sur le chantier HSL a été complétée par une analyse comparative entre mesures InSAR et mesures d'auscultation traditionnelle. Cette comparaison a été effectuée à partir de 70 points de nivellement et de 141 prismes. Dans le cas des mesures de nivellement, le déplacement est mesuré dans une seule direction (déplacements verticaux). En faisant l'hypothèse que les déplacements rencontrés sont purement verticaux, il est possible de convertir les déplacements mesurés par InSAR dans la ligne de visée en déplacement vertical. Cela revient à multiplier le déplacement dans la ligne de visée (déplacement LOS) par le cosinus de l'angle d'incidence. Dans le

cas des mesures sur prismes par ST, les déplacements sont mesurés dans 3 directions. Dans ce cas, il est possible de convertir ces déplacements 3D définis dans une base orthonormée à 3 dimensions en déplacements dans la ligne de visée en réalisant un produit scalaire du déplacement en 3D avec le vecteur unitaire de la ligne de visée.

4.3.2 Comparaison avec les mesures de nivellement

Les mesures de nivellement ont été réalisées au cours de deux campagnes effectuées en 2018, une première fois entre Mars et Avril et une autre courant Juin, ce qui a permis d'obtenir une estimation du déplacement pour chaque point de nivellement, sur un intervalle de temps de 49, 77 ou 80 jours. Les mesures de déplacement par nivellement ont été comparées aux mesures InSAR situées à moins de 20 m en sélectionnant l'intervalle de temps qui coïncide le mieux entre les relevés terrestres et les acquisitions SAR. Au total, la différence de déplacement entre mesures InSAR et mesures de nivellement a été calculée pour chacun des 372 couples de données satellitaires/terrestres. La moyenne des différences est de 0.6 mm et l'erreur quadratique moyenne de 3.4 mm. Au regard de la précision des relevés et des faibles déplacements concernés, il est nécessaire de disposer de plus de mesures, sur un intervalle de temps plus important, pour être en capacité d'interpréter la différence entre méthodes satellitaires et méthodes terrestres.

4.3.3 Comparaison avec les mesures ST sur prismes

La comparaison entre mesures InSAR et mesures sur prismes a été réalisée sur 3 intervalles de temps. L'intervalle 1 (05/03/2016-01/03/2018) correspond à la période avant le rabattement de nappe avec des travaux préparatoires entre 2017 et Mars 2018. L'intervalle 2 (31/03/2018-29/06/2018) correspond à la première phase de rabattement de nappe. L'intervalle 3 (26/12/2018-30/06/2019) correspond à la phase durant laquelle on observe une nouvelle baisse du niveau piézométrique, suivi d'une relative stabilisation. Les vitesses de déformations ont été calculées sur ces 3 intervalles à partir des déplacements convertis dans la ligne de visée, puis elles ont été comparées aux vitesses InSAR des points les plus proches, dans un rayon de 20m. La différence moyenne de vitesses sur l'intervalle 1 est de -0.18 mm/an, -0.6 mm/an sur l'intervalle 2 et -1.64 mm/an sur l'intervalle 3. Pour faciliter l'interprétation de ces résultats, une seconde comparaison a été réalisée en comparant la vitesse moyenne locale satellitaire avec la vitesse moyenne locale des prismes sur les 3 intervalles. Les résultats sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Estimation de la moyenne locale des vitesses linéaires de déformation (mm/an) sur 3 intervalles de temps à partir des mesures terrestres (ST) et des mesures satellitaires

Type de mesure	Intervalle 1	Intervalle 2	Intervalle 3
Prismes	-0.4	-11.9	-1.4
InSAR	0.1	-11.3	-3.6

Pour les deux premiers intervalles, la différence de vitesses entre mesures satellitaires et mesures terrestres est très faible (inférieure à 0.6 mm/an). Pour l'intervalle 3, la différence est de 2.2 mm/an. Le fait que la vitesse moyenne InSAR soit plus élevée que la vitesse locale des prismes pourrait s'expliquer par l'existence d'une déformation lente affectant l'intégralité du chantier. Ce mouvement général affecterait alors également les points de contrôle des stations totales, ce qui expliquerait que les effets de ce phénomène ne soient pas visibles dans les mesures sur prisme. Une nouvelle campagne de nivellement pourrait permettre de vérifier cette hypothèse.

5 Conclusion

L'analyse des instabilités de surface sur l'agglomération Parisienne, et plus particulièrement sur le chantier HSL, à partir des images radar satellitaires Sentinel-1 a montré qu'il était possible de suivre précisément les effets d'un rabattement de nappe. L'utilisation des données Sentinel-1 est donc pertinente pour suivre l'impact des travaux souterrains tels que la construction d'un tunnel ou celle d'un ouvrage nécessitant un rabattement de nappe comme pour l'entonnement Ouest HSL du projet EOLE. Les tendances de déformation, coïncidant avec les variations du niveau des nappes phréatiques, ont pu être datées et quantifiées. L'échantillonnage temporel élevé proposé par Sentinel-1 avec une acquisition tous les 6 jours offre ainsi l'opportunité de suivre des déformations transitoires.

Il est donc aujourd'hui possible de suivre l'évolution des déformations au fur et à mesure de l'avancement des travaux avec un coût inférieur à celui des données radar haute résolution lorsque la déformation à l'échelle du bâtiment n'est pas recherchée.

Lors d'un rabattement nappe, la comparaison avec des mesures d'auscultation traditionnelle a montré que la différence moyenne minimale entre les déplacements mesurés par nivellement et ceux mesurés par InSAR est de 0.6 mm. Cette analyse a également montré que la différence minimale de vitesses entre l'InSAR et les mesures sur prisme est de 0.6 mm/an lorsque l'on s'intéresse aux déformations au centre de la cuvette de déformation (sur un intervalle de temps d'environ 3 mois) au moment où l'impact des pompages est le plus marqué. Cela confirme que les données Sentinel-1 permettent de suivre l'impact des grands chantiers et que l'InSAR peut être utilisée comme méthode complémentaire aux mesures d'auscultation traditionnelle, voire en remplacement des mesures de nivellement direct qui permettent de définir les limites d'une cuvette de déformation lors d'un rabattement de nappe et de corriger si besoin les points de référence des stations totales.

6 Références

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., and 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.
- Binet, P. 2018. Les infrastructures du Grand Paris et Eole. Technical report, SNCF RESEAU.
- Eclaircy-Caudrin, S. 2012. Mise au point d'une méthodologie permettant l'adaptation du creusement et du soutènement en travaux souterrains fondée sur l'auscultation et l'analyse numérique en temps réel. Thèse, LGCIE, Géotechnique, INSA Lyon.
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 38 :2202 – 2212.
- Fruneau, B., Deffontaines, B., Prunier-Leparmentier, A.M., et Rudant, J.-P., 2004, Suivi des déplacements verticaux par interférométrie radar : exemple de la gare Haussmann-Saint-Lazare (Paris), *Revue Française de Géotechnique*, vol. 106-107, p. 103-110
- Fruneau, B., B. Deffontaines, J. P. Rudant, and A. M. Le Parmentier (2005), Monitoring vertical deformation due to water pumping in the city of Paris (France) with differential interferometry, *C.R. Géosciences*, 337(13), 1173-1183.
- Jolivet, R. 2011. Interseismic deformation along the Haiyuan fault, China : InSAR study of the spatial and temporal fluctuations. Thèse, Université de Grenoble.
- Ghorbani, M., Sharifzadeh, M., Yasrobi, S., and Daiyan, M. 2012. Geotechnical, structural and geodetic measurements for conventional tunnelling hazards in urban areas – The case of Niayesh road tunnel project. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 31 :1–8.
- Kim, Y.-Y. et Lee, K.-K. 2003. Disturbance of groundwater table by subway construction in the Seoul area, Korea. *Geosciences Journal*, p.37-46.
- López-Quiroz, P., Doin, M.-P., Tupin, F., Briole, P., and Nicolas, J.-M. 2009. Time series analysis of Mexico city subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1) :1 – 15.
- Magalhaes, S. 2010. L'interférométrie radar (DInSAR et PSI) appliquée à l'étude du risque mouvement de terrain à Paris. Theses, Université Paris-Est.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., and Rabaute, T. 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364(6433) :138–142.
- Massonnet, D. et Feigl, K. L. 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4) :441–500.
- Prati, C., Ferretti, A., and Perissin, D. 2010. Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. *Journal of Geodynamics*, 49(3-4) :161–170.
- SNCF 2014. Eole - prolongement du RER E à l'ouest. Technical report, SNCF Réseau
- SNCF 2015. Eole - prolongement du RER E à l'ouest - tronçon haussmann saint-lazarre / nanterre. Technical report, SNCF Réseau.
- Thierry P., Prunier-Leparmentier A M, Lembezat C, Vanoudheusden E, Vernoux J F 2009. 3D geological modelling a turban scale and mapping of ground movement susceptibility from gypsum dissolution : The Paris example (France). *Engineering Geology* 105, 51-64.

Truvé, E. 1996. Imagerie interférentielle en radar à ouverture synthétique. Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications.

Verdaguer, A. et Mallie, L. 2009. Eole - prolongement du rer e à l'ouest. Technical report, Systra.

Yan, Y. 2011. Fusion de mesures de déplacement issues d'imagerie SAR : application aux modélisations séismo-volcaniques. Thèse, Université Savoie Mont Blanc, LISTIC - Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance.

Ye, X., Kaufmann, H., and Guo, X. 2004. Landslide Monitoring in the Three Gorges Area Using D-INSAR and Corner Reflectors. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(10) :1167–1172.