

Suivi géodésique pour la géothermie : le cas de Landau

Christine HEIMLICH

Des déformations de surface ont été observées au niveau de la ville de Landau (Allemagne), début 2014. Pendant l'incident, des acquisitions SAR étaient en cours dans le cadre d'un suivi géodésique de sites de géothermie en Alsace. Ces données ont permis de faire une analyse spatio-temporelle des déplacements de surface à Landau pendant la période 2013-2014 où le maximum d'amplitude de déplacement a été observé. Cette étude présente les résultats des mesures satellitaires SAR et de mesures terrestres.

MOTS-CLÉS

INSAR, PSI, GNSS, nivellement, géothermie, suivi de réservoir

Introduction

Le Fossé rhénan bénéficie d'un contexte géologique favorable au développement de la géothermie profonde haute température (>150°C). La centrale de Landau en Allemagne (figure 1) en est un exemple, elle s'est implantée au sud de la ville de Landau en 2005 et a été inaugurée en 2007.

En 2014, des déformations de surfaces sont observées dans les environs de la centrale de géothermie. Une large zone autour de la centrale était alors en travaux pour des aménagements urbains et pour la création de jardins. Du fait des travaux, il n'y avait pas d'évidence concernant l'origine des déformations observées. Celle-ci n'a pu être déterminée qu'à partir de mesures géodésiques et notamment par les résultats de mesures GNSS qui ont montré un déplacement horizontal pluri-centimétrique pour lequel l'origine des vecteurs est localisée sur le site de géothermie (<http://bodenhebungen-landau.de>).

Des mesures de nivellement avaient également été réalisées, elles ont montré une surrection pluri-centimétrique aux alentours de la centrale. Celle-ci a été mise à l'arrêt à la mi-mars 2014 suite aux résultats géodésiques. L'arrêt a mis fin à la période de surrection au niveau de la centrale et marqué le début d'une période de subsidence. Pendant ces événements, des acquisitions SAR étaient en cours sur cette zone pour le suivi géodésique des sites géothermiques de Soultz-sous-Forêts et de Rittershoffen (Heimlich et al., 2016). Ce travail présente les résultats InSAR de ces acquisitions et leur analyse.

Le contexte

Le Fossé rhénan supérieur appartient à un ensemble de rifts formés au Cénozoïque appelé ECRIS (Ziegler,

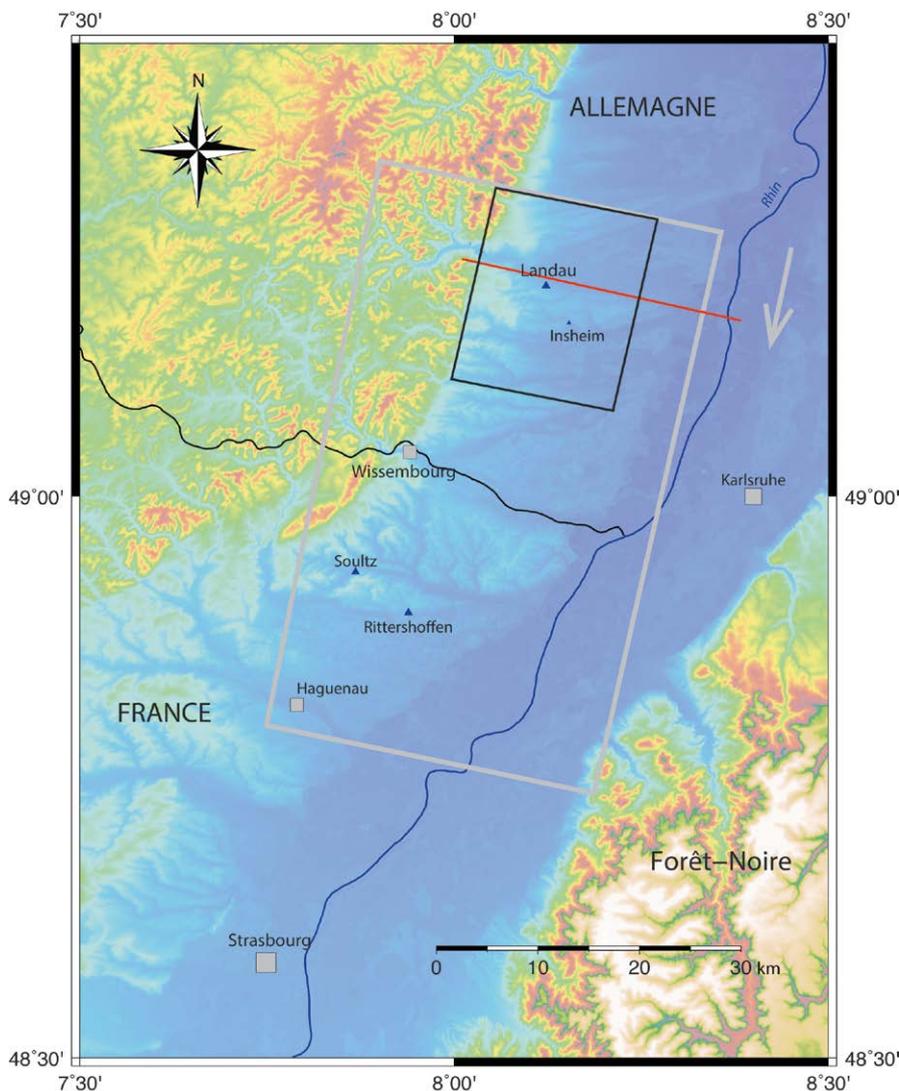
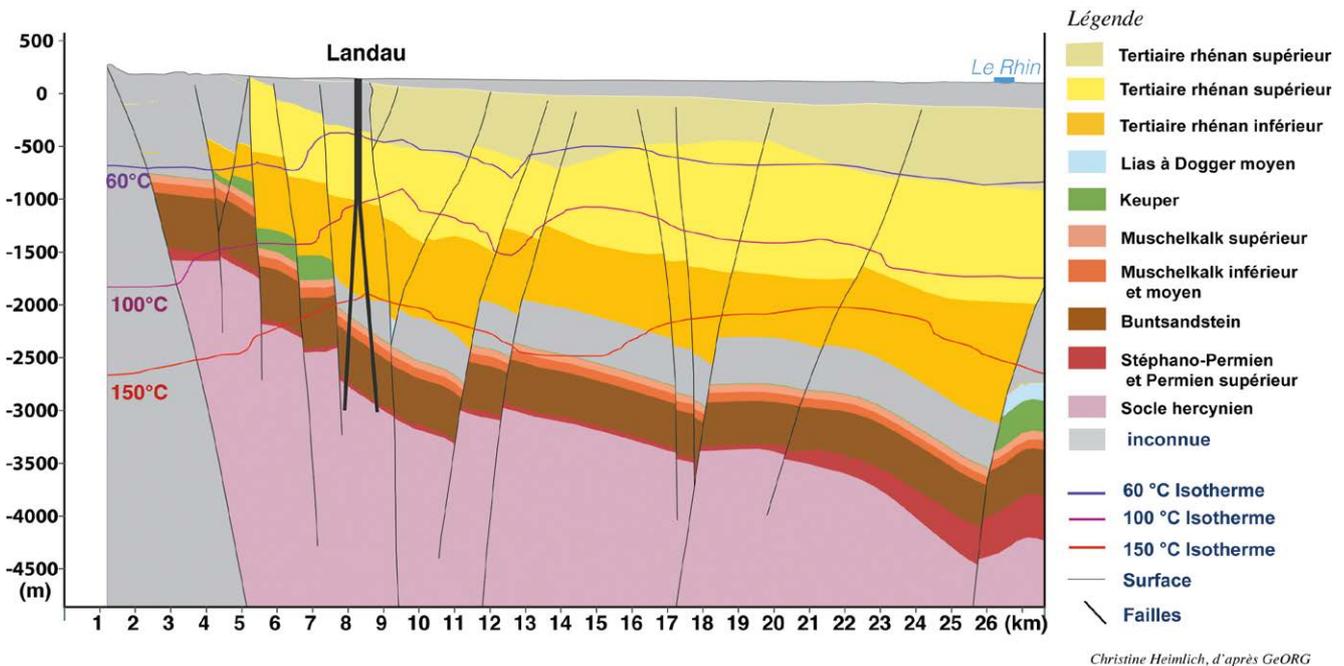


Figure 1. Localisation de la zone d'étude dans le Fossé rhénan supérieur. Fond de carte, topographie ; rectangle gris, zone d'acquisition SAR ; rectangle noir, zone étudiée ; flèche grise, direction du satellite TerraSAR-X ; triangles, sites géothermiques.



Christine Heimlich, d'après GeORG

Figure 2. Coupe géologique simplifiée passant par Landau selon le tracé en rouge de la *figure 1* (d'après GeORG, www.geopotenziale.eu). Les traits gras verticaux représentent le positionnement approximatif des puits de la centrale géothermique.

1992). L'intérieur du fossé se constitue d'ensembles de horst et de graben. Le profil de la *figure 2* montre la structure principale de la zone d'étude et son asymétrie : le rejet et les dépôts sédimentaires sont plus importants du côté est que du côté ouest. L'épaisseur des couches sédimentaires pré-rift et *syn-rift* atteint plus de 4 km au niveau du Rhin et outre-Rhin, alors qu'elle est de l'ordre de 2 à 3 km à Landau. Les principales anomalies de températures connues se situent au niveau de failles. Dans la zone de Landau, il existe une forte anomalie au niveau du horst de Nußdorf au nord de Landau. Dans cette zone, le sous-sol est exploité pour ses hydrocarbures. En effet, Landau et ses environs sont non seulement un site d'exploitation géothermique, mais aussi le plus grand site pétrolier actuellement en exploitation du Fossé rhénan supérieur. En 2015, environ 85 puits étaient en activité. La concomitance de ces activités s'explique par le fait que la ressource géothermique est le moteur de la maturation des hydrocarbures.

Le site de recherche en géothermie profonde de Soultz (Alsace, France) est également implanté dans une zone pétrolifère, à proximité de Merckwiller-Pechelbronn.

Ce site de recherche a contribué au développement d'un système de

production géothermique appelé EGS pour système géothermique stimulé (*Enhanced Geothermal System*) (Genter et al., 2010). La centrale de Landau ainsi que celles d'Insheim et de Rittershoffen (*figure 1*) utilisent ce système de production.

Le principe des centrales géothermiques EGS est d'utiliser la chaleur de fluides géothermaux qui circulent naturellement en profondeur. Il s'applique dans des contextes à faible perméabilité tels que les failles dans les granites, d'où la nécessité de recourir à une stimulation pour augmenter la perméabilité des roches. Le fluide géothermique est extrait à partir d'un (ou plusieurs) puits de production, puis est réinjecté en profondeur à partir d'un (ou plusieurs) puits de réinjection. Landau utilise un système en doublet avec une profondeur de puits de l'ordre de 3 km et une température de production de 160°C. La puissance maximale de la centrale est de 3,6 MWe et de 7 MWth (Daldrup, 2015). La centrale de Landau a la particularité de se situer en milieu urbain, au sud de la ville.

Les données géodésiques

Les principales données utilisées dans cette étude sont les données SAR du satellite TerraSAR-X de l'agence

spatiale allemande DLR. Ces données ont été acquises pour un suivi géodésique des sites géothermiques de Soultz et de Rittershoffen en Alsace (Heimlich, 2016), dans le cadre du LABEX G-EAUTHERMIE PROFONDE. L'acquisition d'images SAR a débuté en 2012 (projet LAN1319).

Ces images sont acquises en bande X de longueur d'onde 3,1 cm sur l'orbite descendante d'azimut 192°. L'angle de visée sur la zone d'étude est de 21° par rapport à la verticale. Cette mesure unidimensionnelle est appelée LOS pour ligne de visée (*Line Of Sight*). La période de revisite du satellite est de 11 jours, cependant le jeu de données SAR comporte des trous liés à l'indisponibilité du satellite pour cette acquisition. En effet l'acquisition par TerraSAR-X n'est pas continue mais nécessite d'être programmée. Les résultats InSAR présentés sont issus du traitement avec DORIS (Kampes et al., 2003), pour la création des interférogrammes, et avec StaMPS (Hooper et al., 2007), pour le traitement PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*).

L'étude utilise également des résultats de campagnes de nivellement et de mesures GNSS qui m'ont été transmises par la ville de Landau. Les mesures *in situ* ont été réalisées pendant les travaux urbains et à une

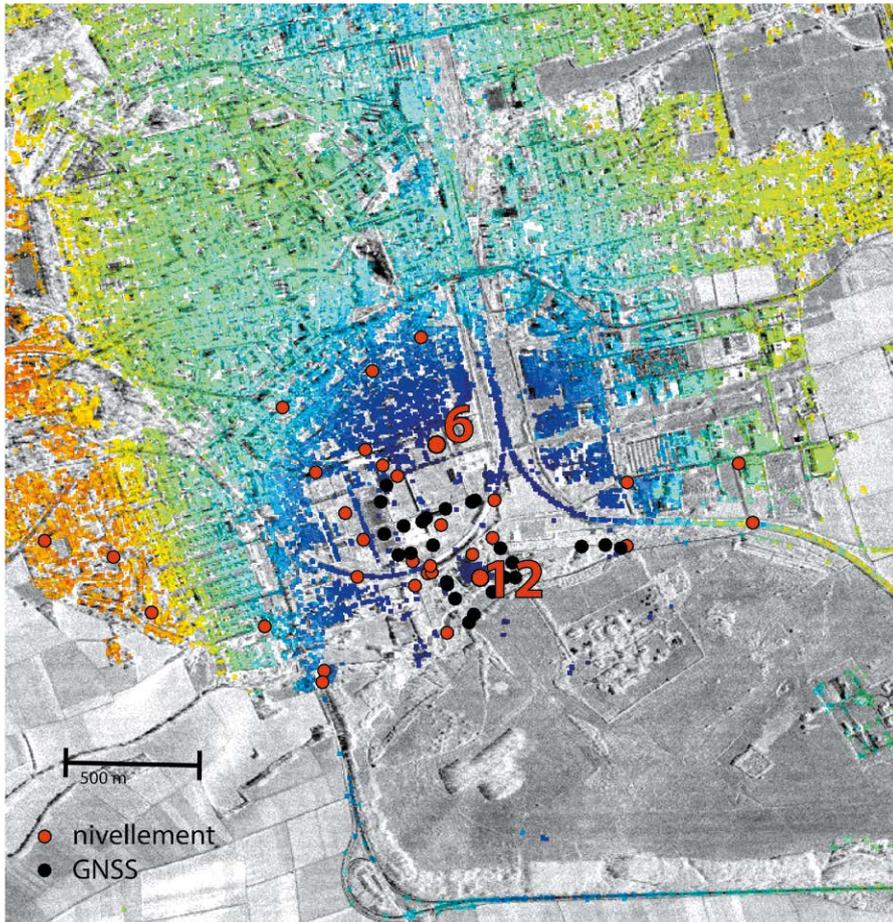


Figure 3. Localisation des mesures géodésiques. Fond de carte de la figure 2 avec la localisation des PSI (pixels de couleurs); cercles rouges, sites de mesure de nivellement; cercles noirs, sites de mesures GNSS.

fréquence d'acquisition plus importante après l'observation des déformations de surface et l'arrêt de la centrale (à la mi-mars 2014). Les données InSAR sont ainsi les seules, avec celles de la station permanente GNSS du réseau SAPOS qui ont une continuité temporelle (résultats non présentés ici).

La localisation des différentes données est présentée *figure 3*. L'information spatiale des données est variable selon la méthode utilisée : l'InSAR a une large couverture spatiale et un nombre important de points de mesures mais les résultats PSI se situent exclusivement en milieu urbanisé et ils sont peu denses dans les environs du site de géothermie du fait de travaux en cours pendant les acquisitions et du fait qu'une grande partie de la zone est végétalisée. Les données de nivellement, quant à elles, couvrent une zone allant de 50 m à environ 1 500 m des puits. Les mesures GNSS, quant à elles, couvrent une zone restreinte autour de

la centrale entre environ 100 et 400 m de distance aux puits.

Les résultats

La *figure 4* présente la carte de la vitesse moyenne des environs de Landau pour la période comprise entre janvier 2013 et janvier 2015. Nous observons que la ville est affectée par un déplacement positif vers le satellite au niveau de trois zones. La vitesse de déformation est maximale dans la zone à proximité de la centrale de géothermie (zone I) où elle est supérieure à 15 mm/an (l'échelle est limitée à 15 mm/an). La forme de l'anomalie de vitesse dans cette zone est quasi-circulaire, elle est centrée sur la centrale de géothermie. Son rayon moyen est compris entre 1 et 1,5 km. Il existe également des zones de déformation au nord (zone II) et entre les deux zones (zone III). La zone de déformation au nord (zone II) est localisée

sur des champs pétroliers, sa délimitation a été réalisée à partir de résultats présentés par Fuhrmann et al. (2013) et Heimlich (2016). La zone intermédiaire a une limite de déformation très nette du côté ouest et plus floue du côté est. La limite ouest correspond à la position d'une faille (la faille entre les kilomètres 7 et 8, *figure 2*).

Les séries temporelles PSI ont été comparées à des mesures de nivellement réalisées à proximité de la centrale, deux exemples sont présentés *figure 5*. Les variations entre les deux types de mesures sont très proches notamment sur le site la géothermie (site 12). La juxtaposition des deux séries temporelles indique que l'on retrouve surtout le déplacement vertical de la mesure LOS de ce point. Par conséquent, le déplacement est majoritairement vertical.

La série temporelle du site 6, situé à 467 m de distance du puits de réinjection de la centrale, montre une surrection nette entre fin juillet et le 23 septembre 2013, la surrection se poursuit jusqu'à la date d'arrêt de la centrale, s'en suit une période de subsidence de vitesse décroissante avec le temps. Le niveau initial n'est pas retrouvé à la fin de la série temporelle.

La série temporelle PSI du site 12 a nécessité des corrections de sauts de phase. Ce sont les écarts entre les points noirs et les points verts (*figure 5*). En effet, dans les zones à proximité immédiate de la centrale, les séries temporelles PSI sont affectées par des sauts de phase. Ces sauts de phase sont dus à l'effet combiné de la faible densité des PSI et du fort taux de déplacement dans cette zone. L'absence de continuité spatiale des PSI rend difficile la correction de ces sauts de phase sur la base des seuls résultats InSAR, ce que permet le nivellement pour certains sauts de phase. La correction du déplacement lié au saut est d'un facteur 1,55 cm (la longueur d'onde divisée par 2) en direction LOS.

L'exemple du site 12 montre que les mesures de nivellement permettent de bien contraindre la correction des sauts de phase de la mesure PSI. Les séries temporelles se superposent

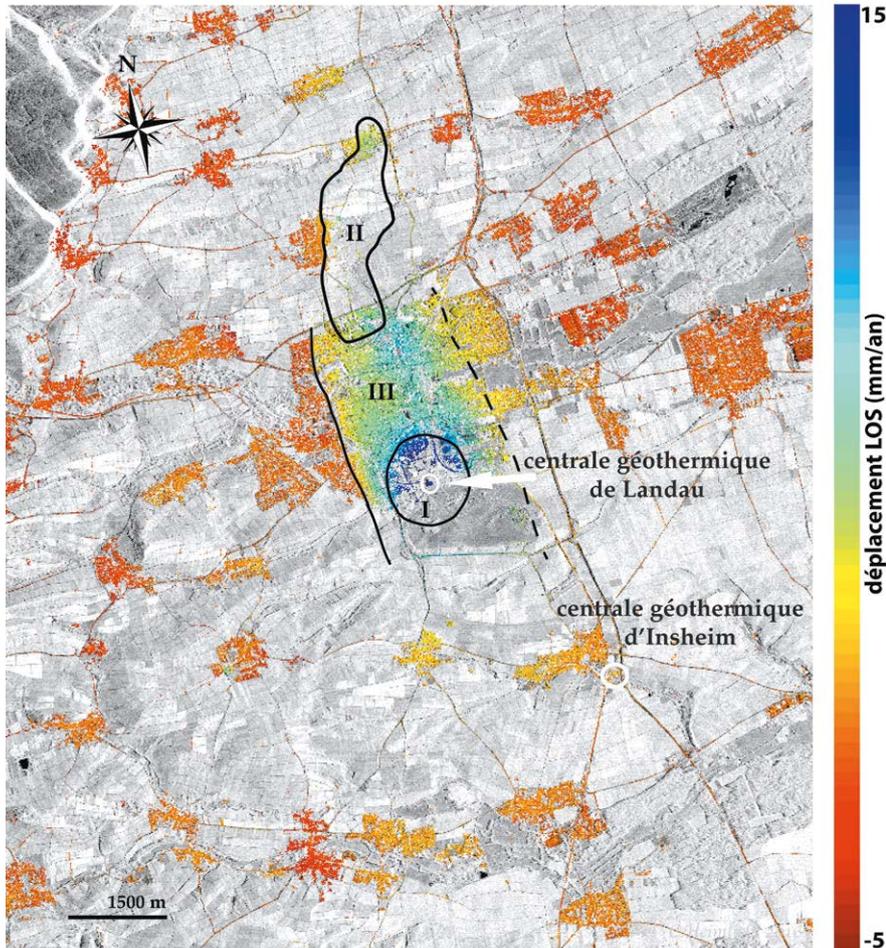


Figure 4 : Carte de la vitesse moyenne en LOS entre janvier 2013 et janvier 2015 (mm/an). Fond de carte, amplitude des images SAR.

non corrigés avant et après l'arrêt de la centrale géothermique, les amplitudes maximales LOS n'y sont pas reportées. Avant l'arrêt de la centrale (figure 6a) les 3 zones sont affectées par des déplacements significatifs de même polarité. L'amplitude de déplacement est maximale à proximité de la centrale où la déformation est circulaire. Les vecteurs de déplacements horizontaux montrent un déplacement horizontal pluri-centimétrique dont l'origine est localisée au niveau de la centrale, un déplacement horizontal en extension est associé à la surrection.

La carte des déplacements après l'arrêt de la centrale (figure 6b) met en évidence deux zones de déformations, une zone au niveau de la centrale (zone I), avec une extension spatiale moindre par rapport aux déplacements mesurés pour la période de surrection et une zone dans la partie nord de Landau (dans la zone II). Les deux zones de déformations ont la même polarité sur le déplacement cumulé pendant la période représentée.

L'analyse de la source des déformations

L'inversion de polarité à l'arrêt de la centrale sur la zone I permet de supposer que le comportement du milieu est élastique. La forme circulaire de la déformation ainsi que l'augmentation de l'amplitude du déplacement avec le rapprochement vers la centrale suggère

▶ après corrections lors de la phase de subsidence. Par contre il est difficile de déterminer le déplacement et le nombre de sauts de phase pour la période de surrection du fait de l'absence de mesures de nivellement pendant cette

période. Les variations de la série temporelle entre juillet 2013 et mars 2014 restent hypothétiques, de même que l'amplitude de 12 cm entre janvier 2013 et mars 2014.

La figure 6 représente les déplacements

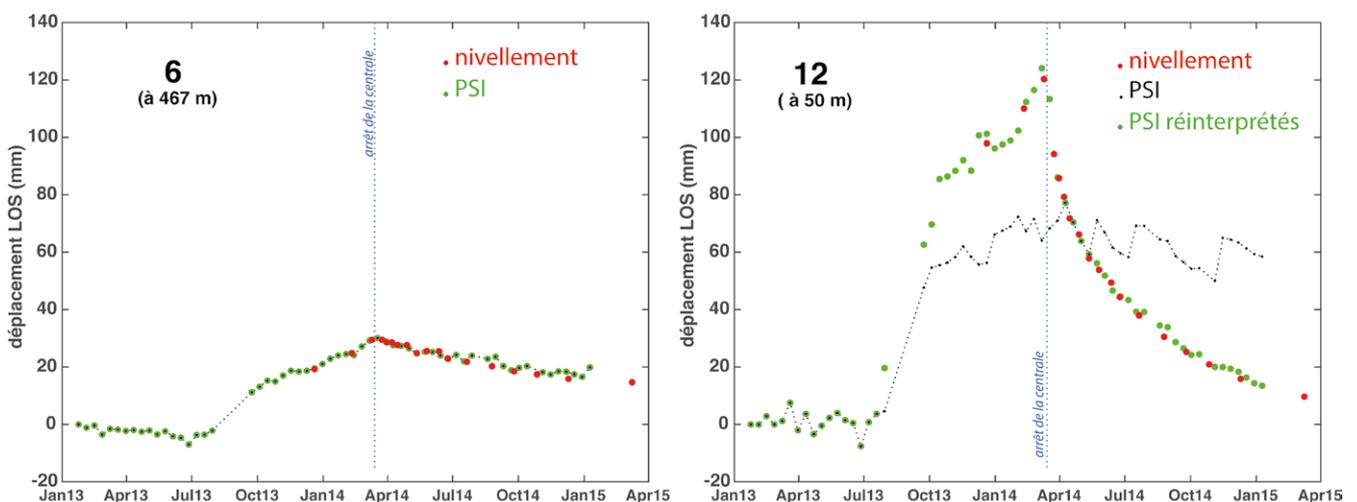


Figure 5. Séries temporelles des déplacements PSI (points noirs) en LOS et des mesures de nivellement (points rouges). Points noirs, résultats PSI ; points verts, résultats PSI interprétés à partir des résultats de nivellement ; ligne verticale, date d'arrêt de la centrale de géothermie.

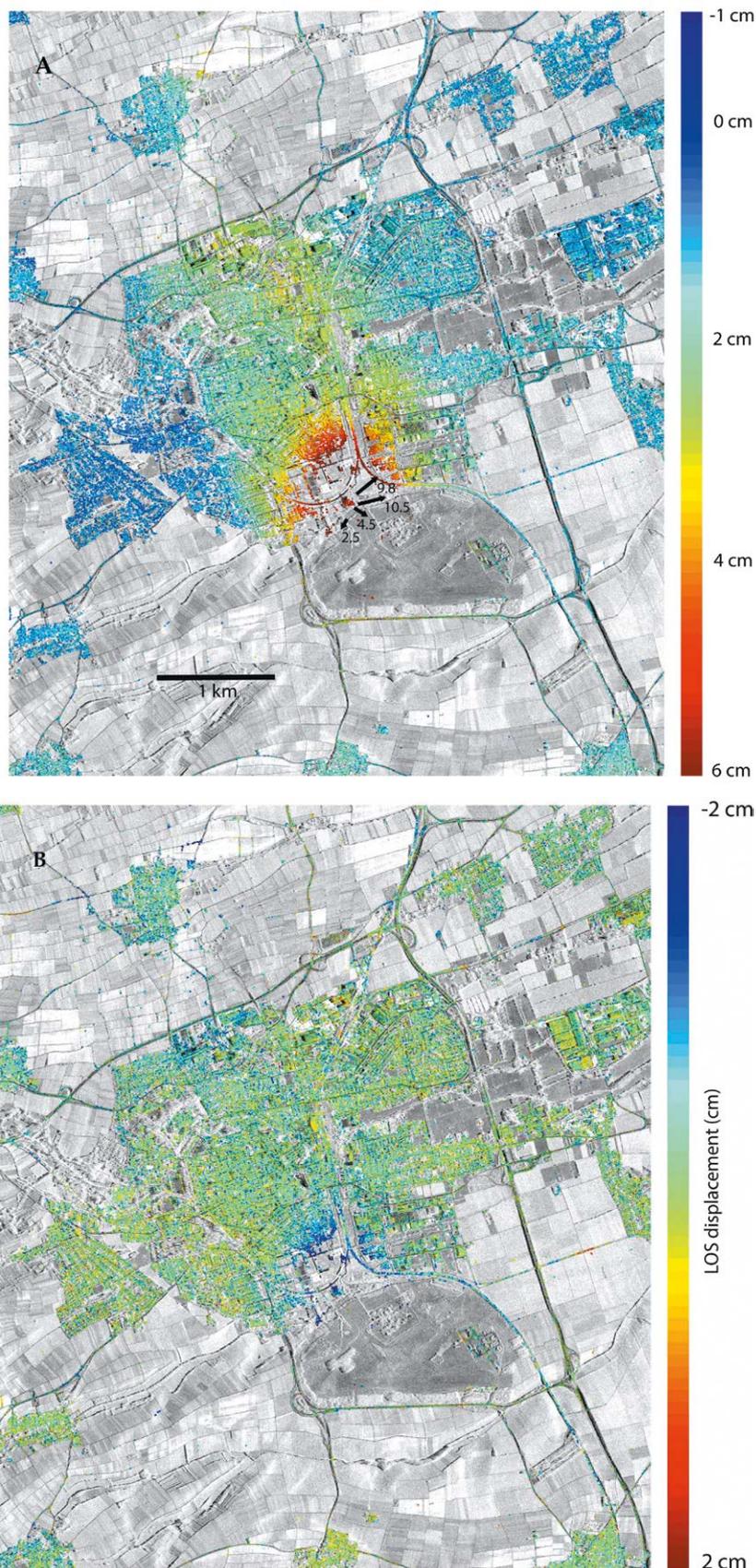


Figure 6. Carte des déplacements PSI en LOS (cm).

A, déplacements LOS (cm) entre le 11 avril 2013 et le 18 mars 2014, les flèches noires présentent les déplacements horizontaux (cm) entre août 2013 et mars 2014.

B, déplacements LOS (cm) entre le 18 mars 2014 et le 29 décembre 2014.

une source circulaire telle que celle modélisée par Mogi (1958), développée initialement pour la volcanologie. Les résultats sont inversés pour retrouver les paramètres de la source de la déformation. Les paramètres du modèle Mogi sont la localisation horizontale de la source, sa profondeur et la variation de volume. Nous pouvons considérer que lors de la période de production, des fluides géothermaux sont injectés en profondeur par le puits de ré-injection, et que la période de subsidence correspond à un déficit en volume du fait du changement de pression dans le milieu.

Les résultats de l'inversion pour un modèle simple donnent une profondeur principale de la source entre 450 et 500 m de profondeur et une variation de volume entre 70 000 et 90 000 m³ pour la période de surrection. Pour la période de subsidence, la profondeur de la source est moindre. La modélisation mono-source de l'ensemble de la période de subsidence donne une profondeur de 200 m pour une variation de volume de l'ordre de 20 000 m³.

Les variations de profondeur entre les deux périodes s'expliquent en partie par une remontée de la source à la fin de la période de surrection, lors du premier semestre 2014. Cette remontée peut être causée par la saturation des couches sédimentaires en profondeur. La profondeur de la source principale pour la période de surrection est en accord avec la configuration du puits au moment de l'événement. Le puits n'était pas cimenté à partir de 479 m de profondeur et ce jusqu'à 751 m. Ainsi un problème d'étanchéité du puits (au niveau de la tête de puits ou du tubage par corrosion) a pu permettre une fuite de l'eau géothermale vers 500 m de profondeur. Un défaut à la tête de puits a bien été détecté et réparé depuis (Daldrup, 2015). A cette profondeur se trouvent les couches sédimentaires tertiaires et une faille normale dont l'emplacement se juxtapose à la bordure ouest de la déformation zone III. La variation de volume modélisée pour l'injection est inférieure au volume total réinjecté pendant la période, la valeur obtenue est donc cohérente avec une fuite au niveau du puits de réinjection.



Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de retrouver l'évolution spatio-temporelle des déformations à Landau pendant la période de l'incident du puits à la centrale de géothermie. La modélisation à partir des résultats géodésiques explique bien les déformations observées dans un rayon de 1 à 1,5 km autour de la centrale. Une période de surrection débute entre le printemps et l'été 2013 et s'achève mi-mars 2013 lors de l'arrêt de la centrale. Le déplacement est pluri-centimétrique et est supérieur à 1 cm dans un rayon de 1 km de la centrale. Selon les corrections de sauts de phase sur la base des mesures de nivellement, l'amplitude de déplacement atteint 12 cm au niveau de la centrale (figure 5). A la fin des mesures, en mars 2015 une déformation persiste, il n'y a pas de retour à l'état initial (c'est-à-dire avant l'été 2013) avec un écart en LOS supérieur à 1 cm autour de la centrale.

Cette étude montre aussi la complexité de cette zone qui est fortement exploitée. La déformation au nord de Landau (zone II) est affectée par des variations très localisées et à courte période, ce qui atteste de l'origine anthropique de la déformation et de leur lien avec l'activité pétrolière (Fuhrmann et al, 2013 ; Heimlich et al., 2015 ; Heimlich, 2016). La zone III, quant à elle, se situe entre les deux zones de déformation, c'est également une zone où de la micro-sismicité a été enregistrée pendant la période d'observation SAR par le réseau MAGS (www.mags-projekt.de ; Heimlich, 2016). L'analyse conjointe des séries temporelles PSI, GNSS et des mesures sismologiques pourrait apporter de nouveaux éléments sur les origines de l'ensemble des déformations observées et sur les relations entre les déformations et la sismicité dans cette zone.

Cette étude montre également l'intérêt de l'acquisition multi-technique et la complémentarité des méthodes. Le nivellement mais aussi le GNSS, bien que non abordé ici, permettent de référencer les mesures relatives de l'InSAR. La perte de continuité spatiale en InSAR peut rendre difficile la correction des sauts de phase si la vitesse de déformation est importante au regard

de l'échantillonnage temporel et de la longueur d'onde radar.

La méthode InSAR, quant à elle, apporte une extension spatiale aux mesures terrestres qui elles sont ponctuelles. Un autre intérêt de l'InSAR est sa capacité de pouvoir traiter une zone dont l'étude a été décidée postérieurement à l'événement, ce qui n'est pas le cas des méthodes terrestres qui nécessitent la mise en place de campagnes.

D'un point de vue industriel et sociétal, cet incident démontre l'importance de l'intégrité des puits afin d'éviter les fuites, que cela soit par la conception ou par la vérification des puits dans le temps. Il démontre également l'intérêt d'un suivi géodésique pour les exploitations profondes. Par exemple, le traitement des données d'une station permanente GNSS sur le site de géothermie aurait pu détecter l'anomalie de déplacement dès septembre 2013, c'est-à-dire avant l'apparition de dégâts en surface (fissures). La mesure des déformations par la géodésie permet de quantifier les déplacements, elle participe ainsi à l'évaluation des risques, ce qui a un intérêt majeur pour les choix sociétaux notamment dans le domaine énergétique. Pour ces mêmes raisons, c'est également un outil pour l'acceptabilité. Un suivi géodésique en complément du suivi sismologique est maintenant demandé par la DREAL Grand Est pour les sites de géothermie profonde haute température en Alsace. ●

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'institut de Physique du Globe de Strasbourg et a été financé par la Région Alsace et le LABEX G-EAU-THERMIE PROFONDE

Contact

Christine HEIMLICH
christine.heimlich2@alumni.unistra.fr

Références

- Daldrup, J. (2015) *Erfahrung vom Betrieb in Landau - Erkenntnisse für den Bau der Anlage in Neuried*. IGC Forum 2015, Offenbourg, March 2015.
- Fuhrmann, T., Knöpfler, A., Mayer, M., Schenk, A., Westerhaus, M., Zippelt, K., Heck, B. (2013) *Towards a fusion of SAR-Interferometry, GNSS and precise levelling*

in the Upper Rhine Graben area, southwest Germany. ESA Special Publication, Vol. 722, pp. 57.

Genter, A., Evans, K., Cuenot, N., Fritsch, D., Sanjuan, B. (2010) *Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS)*. Comptes rendus Geosciences 342, 502-516.

Heimlich, Christine (2016) *Méthodes géodésiques appliquées à la géothermie et mesures de déformations locales dans le Fossé rhénan supérieur*. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.

Heimlich, C., Gourmelen, N., Masson, F., Schmittbuhl, J., Kim, S-W, Azzola, J. (2015) *Uplift around the geothermal power plant of Landau (Germany) as observed by InSAR monitoring*, Geothermal Energy 3 :2, DOI 10.1186/s40517-014-0024-y

Heimlich, C., Masson, F., Gourmelen, N. (2013) *Geodetic monitoring at the geothermal sites of Soultz-sous-Forêts and Rittershoffen (Upper Rhine Graben, France)*. European Geothermal Congress 2013, Pisa, Italy, June 3-7, 2013.

Hooper, A., Segall, P. et Zebker, H. (2007) *Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos*. Journal of Geophysical Research 112 (B07407), 1-21.

Kampes B. M., Hannsen, R. F. et Perski, Z. (2003) *Radar interferometry with public domain tools*. Proceedings of FRINGE, Frascati, Italy, pp. 1-5.

Mogi, K. (1958) *Relations between the eruptions of volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them*. Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo 36, 99-134.

Ziegler, P. A. (1992) *European cenozoic rift system*. Tectonophysics 208 (1), 91-111.

ABSTRACT

Surface deformations were observed in the area of Landau (Germany) beginning 2014. During the incident, SAR acquisitions were underway as part of a geodetic monitoring of geothermal sites in Alsace. This data allowed a spatio-temporal analysis of surface displacements during the 2013-2014 period, where the maximum amplitude of displacement was observed. This study presents the results of SAR satellite data processing and terrestrial measurements.