

Surveillance géodésique de glissement de terrain par interférométrie radar

Mathéo METZGER

L'*InSAR* est une technique permettant de déterminer des champs de déformations sur une zone d'intérêt selon des lignes de visée (LOS). De ce fait, il n'est pas possible d'obtenir la totalité des informations de mouvement selon un point de vue unique. L'utilisation de plusieurs points de vue, voire d'hypothèses topographiques dans le cadre de glissement de terrain, permet de calculer des déformations en 3D. Avant cette fusion, il y a un certain nombre d'interrogations nécessitant une attention primordiale.

MOTS-CLÉS
InSAR, déformations, glissement de terrain, LOS

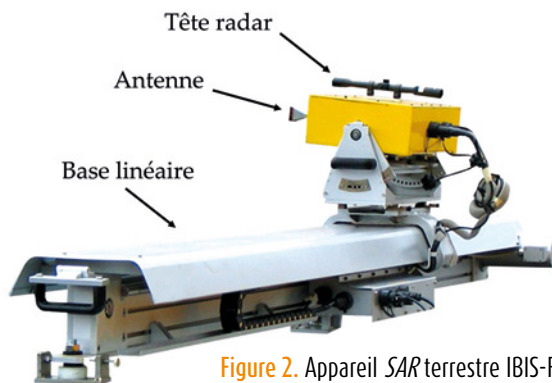


Figure 2. Appareil SAR terrestre IBIS-FM.

©IDS GeoRadar.

Introduction

L'*InSAR* (Interferometric Synthetic Aperture Radar) est une technique largement employée aujourd'hui pour l'étude de l'activité volcanique, de la géomorphologie, de la dynamique glaciaire, des séismes, des glissements de terrain, etc. Son utilisation est grandissante, et non sans raison. Celle-ci permet en effet d'étudier ces phénomènes sur de très grandes surfaces (particulièrement par la voie satellitaire), mais aussi sans contact direct de l'utilisateur avec le lieu d'étude. Découvrons l'application de la méthode de l'*InSAR* aux glissements de terrain au travers de cet article. Notamment, détaillons une de ses problématiques qui empêche de disposer pleinement de l'information de déplacement de la zone étudiée.

L'*InSAR*

L'interférométrie est une technique visant à exploiter le phénomène d'interférence entre plusieurs ondes dites cohérentes entre elles, permettant ainsi d'extraire des informations sur la nouvelle onde créée.

Le dispositif SAR (en français RSO, pour Radar à Synthèse d'Ouverture) permet de simuler une antenne radar de plus grande taille afin d'améliorer la résolution azimutale des images résultantes (celle-ci étant inversement proportionnelle à la taille de l'antenne). Ces images SAR permettent de récupérer les infor-

mations sur les propriétés des ondes rétrodiffusées qui sont l'amplitude et la phase (Ferretti et al., 2007).

L'*InSAR* vise à exploiter l'interférométrie par l'emploi d'images SAR. Cette technique permet notamment de créer des interférogrammes. Ceux-ci disposent d'informations de différence de phase de deux images SAR acquises selon deux points de vue différents (géométriquement et temporellement) (figure 1).

Cette technologie peut être embarquée au sein de satellites, d'avions, mais aussi d'appareils terrestres (figure 2). Dans la partie suivante, nous exposerons des détails quant à l'utilisation de l'*InSAR* dans le contexte de mesures

des déformations. Notamment, nous discuterons de l'un des inconvénients de cette technique, impliquant l'intérêt d'exprimer mathématiquement une mesure par rapport aux trois composantes de déformation du système employé.

L'*InSAR* pour les mesures des déformations

L'approche *Differential InSAR* vise à exploiter les différences de phase d'un interférogramme en vue d'en extraire des informations de déplacements. Des approches *Multi-Temporal InSAR* (*Small Baseline Subset*, *Persistent Scatterer*, *Distributed Scatterers*,...) s'intéressent à l'utilisation de plusieurs

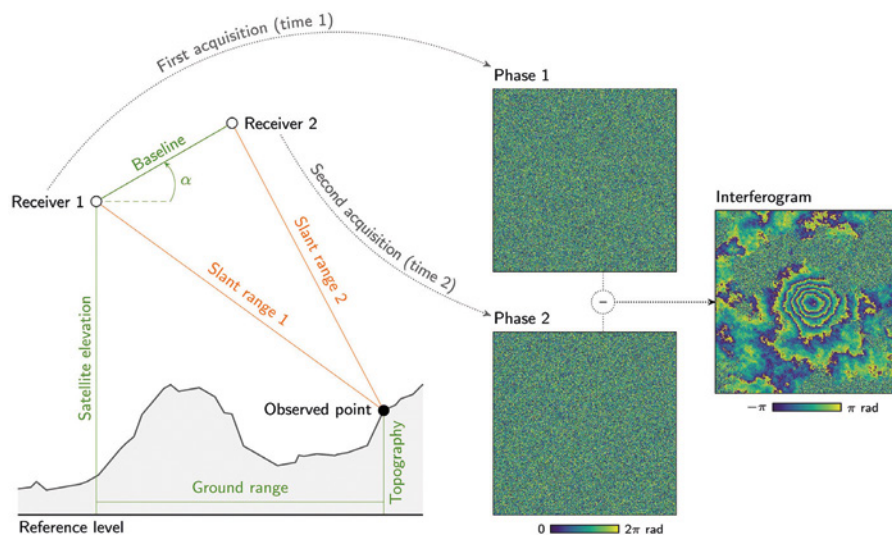


Figure 1. Illustration de la création d'un interférogramme dans le cadre de l'emploi de l'*InSAR* satellitaire à partir de deux images de phase (Rongier et al., 2019).

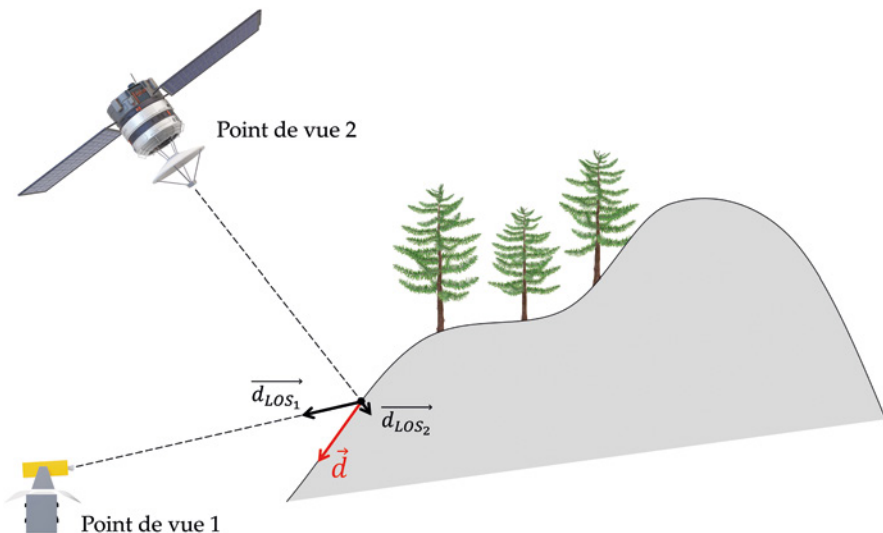


Figure 3. Illustration de mesures selon les lignes de visée dans le cadre de l'utilisation de l'InSAR. Nous observons que le placement de l'appareil influe de manière importante la mesure.

interférogrammes qui se succèdent dans le temps afin de créer des séries temporelles de déformation. Ces approches permettent aussi d'analyser les distributions statistiques des phases et des amplitudes des signaux dans le temps, permettant ainsi de disposer d'informations de mouvement plus exactes et plus précises. L'InSAR permet de mesurer les déformations seulement selon les lignes de visée (LOS ou Line of Sight) de l'appareil. De ce fait, il est tout à fait possible de n'observer que très peu de déplacements selon certains points de vue, malgré un mouvement avéré de la zone d'intérêt (figure 3). Typiquement, l'InSAR satellitaire n'est que très peu sensible aux composantes de déformation selon le nord, du fait des orbites héliosynchrones employées. Cette approche est majoritairement affectée par les déplacements verticaux et selon l'axe ouest-est.

L'intérêt de calculer des déformations en 3D est alors établi afin de connaître pleinement la dynamique du mouvement. Remarque : nous considérerons des entités ponctuelles pour la simplification des figures. En réalité, les déformations mesurées par l'InSAR s'apparentent davantage à des entités surfaciques. Nous pouvons lier mathématiquement la déformation selon une LOS avec les trois déformations du système de coordonnées employé (figure 4). En considérant le gisement G_{LOS} , l'angle d'inclinaison I_{LOS} , mais aussi les trois déformations (notées d_E , d_N et d_V) dans un système de projection cartographique, nous pouvons établir l'équation 1 (Hanssen, 2001).

$$d_{LOS} = \sin I_{LOS} \sin G_{LOS} d_E + \sin I_{LOS} \cos G_{LOS} d_N + \cos I_{LOS} d_V \quad (1)$$

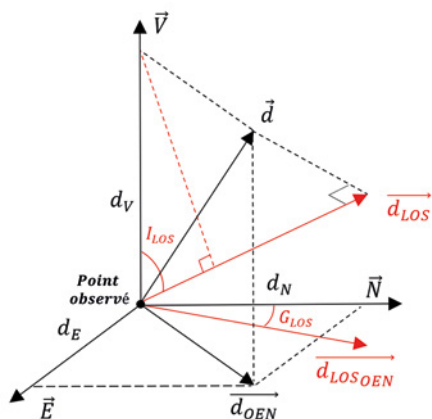
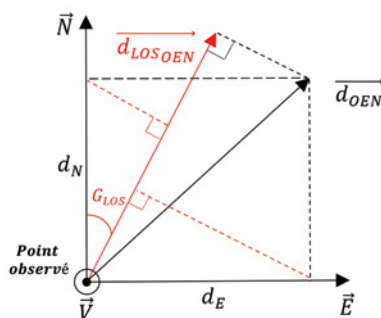


Figure 4. Représentation géométrique du vecteur LOS et projection des déformations en trois dimensions sur celui-ci (adaptation de Hanssen (2001), page 163).



L'utilisation de trois équations permet le calcul des déformations en 3D (nous cherchons à calculer trois inconnues). Il est aussi possible d'en considérer plus de trois par l'usage d'estimateurs (comme les moindres carrés). Cependant, il faut disposer de suffisamment de points de vue pour ces inversions, ce qui n'est pas aisé. Dans la prochaine partie, nous chercherons à réduire le nombre nécessaire de points de vue à l'inversion des systèmes d'équations par l'utilisation d'hypothèses topographiques.

Glissement de terrain et déformations en 3D

Tout d'abord, citons une définition d'un glissement de terrain : "Un glissement de terrain est un phénomène géologique qui désigne le phénomène de descente d'une masse de terre sur une pente, sur un plan de glissement" (Dictionnaire environnement, 2010). Dans le cadre de la topographie, nous nous focaliserons sur les notions de pente et de plan de glissement. Il est à noter que la véracité des différentes hypothèses citées devra être vérifiée en amont de leur application. Cela peut donc nécessiter une grande connaissance du glissement, voire une vérification de ces hypothèses par l'utilisation d'autres appareils de mesure.

■ Considération de vecteur de pente

Sous l'hypothèse de déplacements du glissement de terrain selon des vecteurs de pente, un seul point de vue peut être employé (Dai et al., 2022). Le calcul des vecteurs de pente vise à considérer deux paramètres : l'angle de la pente (noté P) et son angle d'orientation (noté O) (figure 5).

$$\vec{u}_{pente} = \begin{pmatrix} \sin O \cos P \\ \cos O \cos P \\ -\sin P \end{pmatrix} \quad (2)$$

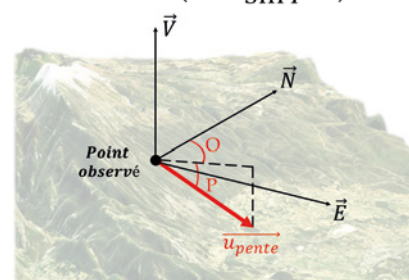


Figure 5. Considération d'un vecteur de pente.



À l'aide d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) sous forme de raster disposant d'un pas spatial adapté, ainsi que de l'utilisation d'algorithmes adéquats (par exemple l'approche proposée par Zevenbergen et Thorne [1987]), les calculs de ces paramètres sont possibles. Après le calcul du vecteur de pente à l'aide de l'équation 2, nous pouvons projeter la déformation mesurée selon la LOS sur ce dernier à l'aide de l'équation 3.

Avec α l'angle formé par les vecteurs unitaires u_{pente} et u_{LOS} .

$$d_{pente} = \frac{d_{LOS}}{\cos \alpha} \quad (3)$$

Une approche visant à utiliser l'orientation de la pente seulement est envisageable. Celle-ci nécessite l'utilisation de deux points de vue et considère un déplacement nul selon la normale du plan vertical défini par l'angle d'orientation de la pente. Dans ce cas, combiner deux équations telles que vues dans l'équation 1 (soit deux points de vue) avec l'équation 4 permet l'inversion du système.

$$\cos O d_E + \sin O d_N = 0 \quad (4)$$

Cette hypothèse est semblable à celle réalisée par Fuhrmann et Garthwaite (2019), qui, dans le cadre de l'utilisation de données satellitaires, considèrent un déplacement nul selon la composante nord, celle-ci ayant relativement peu d'impact sur les mesures.

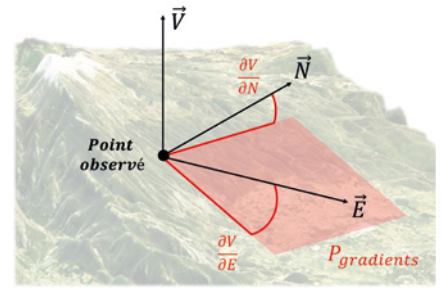


Figure 6. Considération d'un plan de glissement.

■ Considération de plan de glissement

La considération de plan de glissement est une approche pouvant utiliser les gradients provenant de MNT. Cette méthode permet de limiter les points de vue nécessaires pour le calcul des déformations en 3D à un nombre de deux et revient à considérer l'hypothèse de la

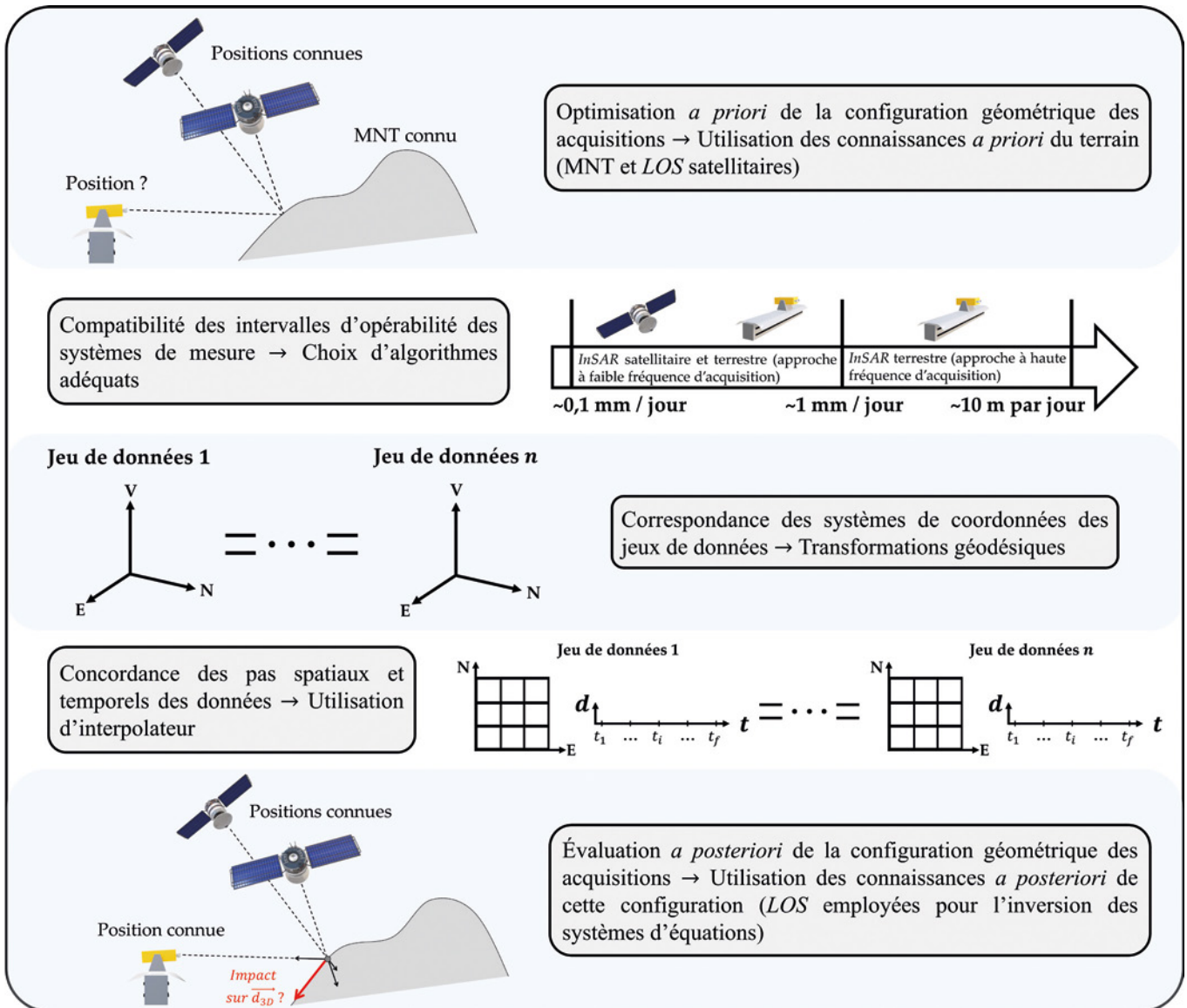
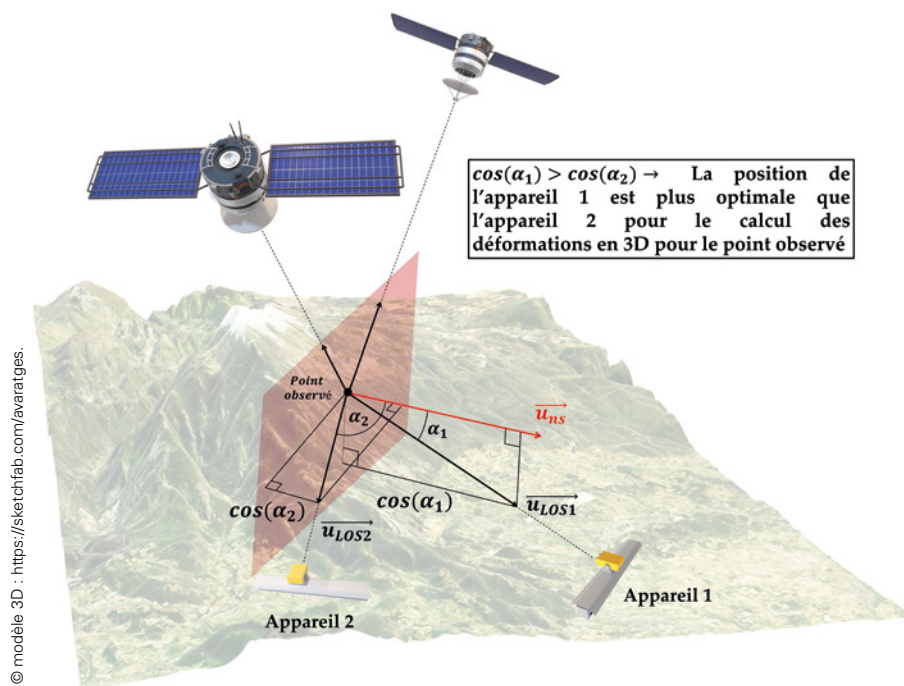


Figure 7. Quelques points importants à considérer avant de pouvoir réaliser les inversions des systèmes d'équations pour le calcul des déformations selon le repère souhaité.



© modèle 3D : <https://sketchfab.com/avaratges>.

Figure 8. Considération du produit scalaire entre la LOS terrestre et la normale du plan satellitaire dans le cadre de l'utilisation de trois points de vue.

conservation des masses (Samsonov et al., 2020). L'équation 5 traduit mathématiquement l'hypothèse et revient à contraindre le calcul du vecteur de déplacement 3D sur le plan défini par les gradients (figure 6).

$$\frac{\partial V}{\partial E} d_E + \frac{\partial V}{\partial N} d_N = d_V \quad (5)$$

Dans la prochaine partie, nous nous pencherons sur la combinaison des jeux de données. Nous nous concentrerons notamment sur l'aspect géométrique de la fusion des mesures issues de plusieurs points de vue d'appareils réalisant des acquisitions SAR. Nous réaliserons ensuite un raisonnement analogue pour la considération des équations issues d'hypothèses de l'ordre topographique.

La combinaison des jeux de données

Afin de réaliser des calculs de déformation 3D, des interrogations importantes sont à considérer lors de la combinaison de données de déformation InSAR provenant de différents appareils. La figure 7 présente, de manière générique, ces quelques points importants. Nous nous intéresserons dans cette

partie à la configuration géométrique des différentes entités mathématiques utilisées pour l'inversion des systèmes d'équations. Illustrons ce propos par l'emploi de trois points de vue de mesures. Le cas extrême serait l'appartenance des trois LOS concernées au même plan, ce qui engendrerait l'impossibilité d'inverser le système d'équations (une équation serait une combinaison linéaire des deux autres). Dans les faits, chaque système d'équations sera bien inversible, dû à l'aspect très peu probable de cette disposition. Cependant, cela ne sera pas sans

conséquence sur les résultats, les mesures et les paramètres des LOS étant impactés par la présence d'erreurs suivant la loi normale (si nous considérons l'absence de systématique). S'approcher un tant soit peu d'une telle configuration engendre aussi d'importantes erreurs. Ce point concerne donc la notion d'intersection favorable pour la résolution des systèmes d'équations.

Pour évaluer mathématiquement la configuration géométrique, nous pourrions considérer les produits scalaires entre les vecteurs unitaires des LOS deux à deux. Ceux-ci devraient se rapprocher au plus de zéro pour que le système initial soit au plus proche d'un système orthogonal. Dans la pratique, minimiser ces valeurs n'est pas aisé. Par exemple, si nous employons deux points de vue satellitaires et un point de vue terrestre, seul l'appareil terrestre peut être déplacé pour améliorer cette configuration. Nous pouvons donc considérer, dans ce cas, le produit scalaire entre la normale unitaire du plan satellitaire (dont les LOS satellitaires en sont les vecteurs directeurs) et la LOS unitaire terrestre (figure 8). Finalement, ce paramètre nous permettrait *a posteriori* de poser des seuils et ainsi d'éviter la considération des résultats trop impactés. *A priori*, celui-ci pourrait être utilisé pour optimiser le placement de la station terrestre.

Nous observons sur la figure 9 une optimisation du placement d'un appareil SAR terrestre dans le cadre de

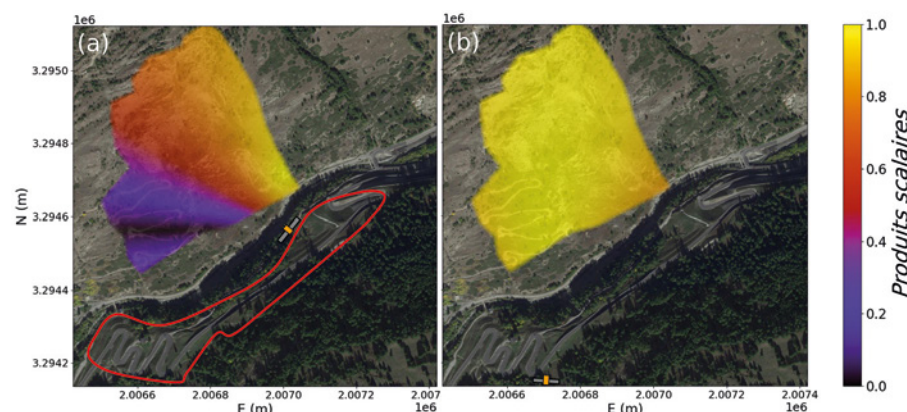


Figure 9. Valeurs des produits scalaires pour la position initiale de l'appareil (a) statistiques sur les produits scalaires : $m = 0.57$, $\sigma = 0.28$, $\min = 0.00$, $\max = 1.00$ et pour la position "optimale" (selon la moyenne) dans une zone de recherche (en rouge) (b) statistiques sur les produits scalaires : $m = 0.97$, $\sigma = 0.03$, $\min = 0.84$, $\max = 1.00$. RGF93 CC44. MNT de 2021 issu du RGE ALTI®.



l'étude du glissement du Pas de l'Ours (Hautes-Alpes) sur la période de 2019. La position sur la *figure 9a* est la position effective de l'appareil employé durant ce projet de fin d'études. Celle de la *figure 9b* est la position optimisée (au pas spatial du MNT près) selon un critère mathématique qui est ici la moyenne arithmétique (ce calcul est issu d'une programmation Python réalisée durant ce projet). Les valeurs statistiques illustrent la nette amélioration des valeurs de produits scalaires (moyennes passant de 0,57 à 0,97, valeurs minimales passant de 0,00 à 0,84, etc.). En particulier, la zone défavorable pour la première position (produits scalaires inférieurs à 0,5) ne l'est plus. Il est à noter que cette optimisation est théorique et que la zone de recherche (entourée en rouge sur la *figure 9a*) pour le placement de la station ne résulte pas d'une étude préalable. Dans la pratique, nous n'avons pas considéré les difficultés dues à l'environnement en zones montagneuses (arbres, propriétés privées, topographie, visibilité, etc.) qui peuvent être incontournables pour certaines situations. En amont, un lever topographique de zones viables pourrait être réalisé avant tout placement de la station. Cette optimisation mathématique pourrait donc être utilisée à l'aide de ces zones levées *a priori*.

La considération d'équations issues des hypothèses de l'ordre topographique ne déroge pas à la règle et des réflexions analogues peuvent s'y appliquer. En réalité, chaque équation peut être vue mathématiquement comme la création de *LOS* dont la mesure selon celle-ci est nulle. Par exemple, l'utilisation d'un plan généré par les gradients revient à supposer une déformation nulle selon la normale de ce même plan. L'emploi de l'orientation de la pente revient à considérer une déformation nulle selon la normale du plan vertical orienté par l'angle concerné. La considération du vecteur de pente revient à utiliser deux *LOS* perpendiculaires à ce vecteur dont les mesures réalisées selon celles-ci sont nulles. Nous pouvons rapidement remarquer que chaque hypothèse ne peut directement être employée pour réduire le nombre nécessaire de points de vue *InSAR*. Une évaluation géométrique

est toujours nécessaire avant tout calcul. De plus, une optimisation du placement des appareils terrestres est à réaliser par rapport à ces hypothèses.

Conclusion

Pour conclure, nous avons pu discuter dans cet article de l'utilisation de mesures par la technique de l'*InSAR* en vue de déterminer des déformations en 3D de glissement de terrain. Nous avons tout d'abord considéré les équations liées à ces mesures pour ensuite traduire mathématiquement différentes hypothèses touchant l'aspect géométrique des pentes. Nous avons pu énumérer quelques problématiques de la combinaison de ces données et avons notamment insisté sur la configuration géométrique des différentes entités mathématiques qui entrent en jeu lors de l'inversion des systèmes d'équations. Nous avons considéré un paramètre visant l'évaluation de ces configurations et avons illustré cela par un exemple en utilisant trois points de vue, dont deux satellitaires et un terrestre. Dans ce même contexte, nous avons tenté d'optimiser le placement de la station terrestre dans l'intention d'améliorer la disposition des *LOS*. Finalement, malgré l'inconvénient lié aux mesures selon les *LOS*, l'*InSAR* reste largement utilisée aujourd'hui pour ses nombreux avantages d'usage et dispose de plus en plus de perspectives quant à son utilisation.

Je tiens à remercier Floriane Provost, encadrante de ce projet de fin d'études, pour son suivi et son aide. De plus, je remercie l'École et observatoire des sciences de la Terre pour son accueil au sein de ses locaux. ●

Bibliographie

Dai, K., Deng, J., Xu, Q., Li, Z., Shi, X., Hancock, C., Wen, N., Zhang, L. et Zhuo, G. (2022). *Interpretation and sensitivity analysis of the InSAR line of sight displacements in landslide measurements*. *GIScience & Remote Sensing*, vol.59(1), pages 1226-1242. Doi: 10.1080/15481603.2022.2100054.
 Dictionnaire environnement (2010). *Définition de glissement de terrain* [internet] Disponible sur https://www.dictionnaire-environnement.com/glissement_de_terrain_ID5449.html. Consulté le 27 octobre 2023.

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F. et Massonnet, D. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications, The Netherlands.

Fuhrmann, T., Garthwaite, M.C. (2019). *Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion*. *Remote Sensing*, vol.11(3), no.241. Doi: 10.3390/rs11030241.

Hanssen, R.F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands. ISBN 90-73235-43-X. Doi: 10.1007/0-306-47633-9.

Samsonov, S., Dille, A., Dewitte, O., Kervyn, F. et d'Oreye, N. (2020). *Satellite interferometry for mapping surface deformation time series in one, two and three dimensions: A new method illustrated on a slow-moving landslide*. *Engineering Geology*, vol.266. ISSN 0013-7952. Doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105471.

Zevenbergen, L. W. et Thorne, C. R. (1987). *Quantitative analysis of land surface topography*. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 12, pages 47-56. Doi: 10.1002/esp.3290120107.

Zevenbergen, L. W. et Thorne, C. R. (1987). *Quantitative analysis of land surface topography*. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 12, pages 47-56. Doi: 10.1002/esp.3290120107.

Zevenbergen, L. W. et Thorne, C. R. (1987). *Quantitative analysis of land surface topography*. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 12, pages 47-56. Doi: 10.1002/esp.3290120107.

Contact

Mathéo METZGER
 Ingénieur géomètre topographe
 de l'Insa Strasbourg
metzgermatheo@gmail.com

ABSTRACT

Key words: InSAR, deformation, landslide, LOS

The InSAR technique can be used to determine the deformation fields of an area of interest along the lines of sight (LOS). Therefore, obtaining all movement information from one point of view is not feasible. 3D deformations can be calculated by using several points of view, and even using topographical hypothesis in the context of landslides. Before this merge, there are several questions that must receive priority attention.