

STRATEGIE D'UTILISATION DES IMAGES SATELLITES OPTIQUES POUR LE SUIVI DES MOUVEMENTS DE VERSANT

STRATEGY FOR THE USE OF OPTICAL SATELLITE IMAGES FOR THE STUDY OF LANDSLIDE DEFORMATION

Marie-Aurélié CHANUT^{1*}, Laurent DUBOIS¹, Pierre AZEMARD², Marianne CHAHINE³

¹ Cerema Centre-Est, 25 avenue François Mitterrand, 69674 BRON Cedex

² Cerema Méditerranée, avenue A. Einstein, 13593 AIX-EN-PROVENCE Cedex 3

³ Cerema Infrastructures de Transports et Matériaux, 110 rue de Paris, 77171 SOURDUN

RÉSUMÉ – Les conditions d'utilisation opérationnelle des images satellites sont investiguées sur deux glissements (Chambon et Pas de l'Ours). Deux traitements simple par corrélation d'images et avancé par corrélation multi-paires permettent d'obtenir les champs de déplacements quand les valeurs de déplacements sont respectivement très supérieures à la taille du pixel ou du même ordre de grandeur.

ABSTRACT – The conditions of operational use of satellite images are investigated on two landslides (Chambon and Pas de l'Ours). Two treatments by image correlation (simple) and by multi-pair correlation (advanced) make it possible to obtain displacements field when the displacement values are respectively much greater than the size of the pixel or of the same order of magnitude.

1. Introduction

Les images satellites de télédétection optique (par exemple Landsat, SPOT, Pléiades ou Sentinel-2) offrent un grand potentiel pour l'observation de la surface terrestre et en particulier pour étudier les mouvements de surface. Il existe de plus en plus de satellites d'observation qui fournissent des images de plus en plus résolues et avec des périodes de revisite de plus en plus courtes : la future génération de satellites Néo fournira, par exemple, chaque jour des images optiques avec une résolution de 40 cm. Parallèlement à cette mise à disposition d'images, les traitements de géoréférencement et d'orthorectification se sont structurés et systématisés. Notamment, la plateforme GéoSud met à disposition des images brutes mais aussi des images orthorectifiées selon un procédé standardisé et identique pour une séquence d'images acquises avec le même satellite. Les sources d'erreurs liées aux capteurs imparfaits, procédés de géoréférencement et d'orthorectification, qui peuvent dégrader les résultats des traitements, sont donc limitées avec ce traitement systématique. Dans la littérature (Stumpf et al, 2014b ; Lacroix et al., 2018; Stumpf 2017), il a été démontré la possibilité de calculer des champs de déplacements pour des mouvements de terrain à partir d'images Pléiades ou Sentinel 2. Toutefois, ces travaux relèvent de la recherche et la traduction en outil opérationnel n'est pas réalisée : il reste à préciser les outils, les temps de calcul, les limites des résultats et leur interprétation. En particulier, les images optiques disponibles sont abondantes en théorie mais ne sont pas toutes exploitables à cause des conditions climatiques (brouillard, pluie, neige, ...). C'est dans ce contexte que nous souhaitons préciser les conditions d'utilisation opérationnelle de ces images pour des études de suivi de mouvements de terrain (images fournies prétraitées et traitements de corrélation d'images standardisés).

Dans cet objectif, la partie 2 présente les sites d'études, les images satellites utilisées et la finalité de leur traitement. La partie 3 cite les méthodes de traitement développées par

les universitaires qui sont adaptées pour l'opérationnel et présente les résultats obtenus sur les sites d'études. La partie 4 propose une stratégie d'utilisation opérationnelle des images satellites au regard des résultats obtenus.

2. Sites d'études et images satellites disponibles

Deux sites situés dans le massif alpin (Figure 1) avec des cinétiques différentes sont choisis pour l'étude : le glissement du Chambon qui est lent (quelques mètres par an) et celui du Pas de l'Ours plus rapide (quelques dizaines de mètres par an).

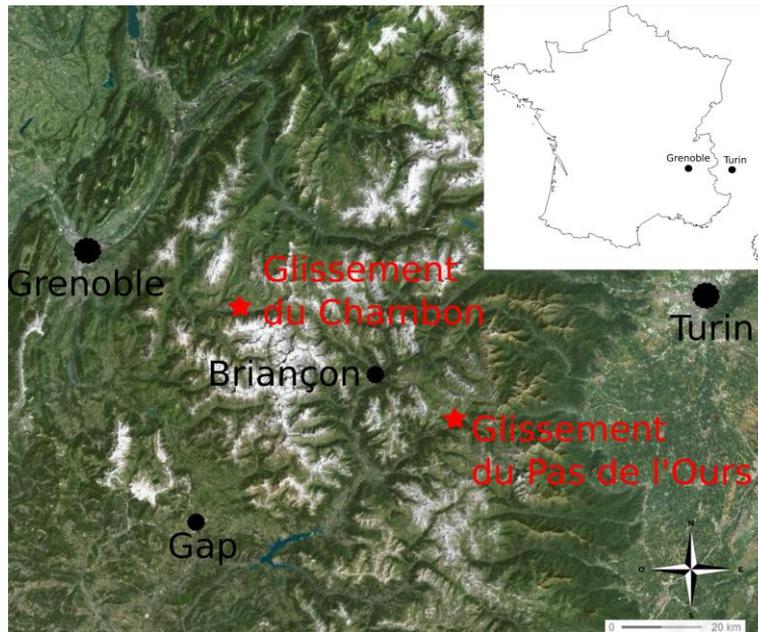


Figure 1: Localisation des sites d'études dans les Alpes

Glissement du Chambon

Le glissement de terrain du Chambon affecte un versant de la vallée de la Romanche dans le massif de l'Oisans, surplombant la retenue du barrage hydroélectrique du Chambon à Mizoën dans le département de l'Isère (Figure 2-a). D'un point de vue géologique, le versant instable est constitué de schistes relativement homogènes (marnes métamorphisées) d'âge Aalénien. En surface, les schistes présentent un débit feuilleté, sont très altérés et peu résistants. En profondeur, les schistes sont plus sains et compacts. Le glissement s'est déclenché en avril 2015 selon un mécanisme de rupture progressive et a fait suite à une longue phase de pré-rupture, s'étalant sur plusieurs dizaines d'années au minimum et mettant en jeu le comportement mécanique particulier des schistes. Il est bien délimité, avec une surface en forme de cuillère, un escarpement principal en vaste arc de cercle et des déplacements présentant une double composante translationnelle et rotationnelle. Le glissement se développe sur environ 180 m de haut et 100 m de large. L'épaisseur des terrains en mouvement est de l'ordre de 40 m. Le bourrelet de pied est situé au fond de la retenue sous le niveau d'eau.

De grands déplacements ont eu lieu en juillet 2015 et ont fortement modifié la morphologie de la surface (déplacements cumulés de l'ordre de 15 à 20 m associés au glissement d'une des masses dans le barrage). Depuis fin juillet 2015, les déplacements en surface du glissement se poursuivent (de l'ordre de 5 mm/jour pour le compartiment le plus rapide et 1 mm/jour pour les deux autres compartiments en étroite relation avec les variations du niveau d'eau de la retenue et la pluviosité (Dubois et al. 2016)).

Les images satellites visent à contribuer à suivre la dynamique du glissement du Chambon à partir d'août 2015. Quatre images sont sélectionnées à intervalles d'environ

une année : 30/08/15, 09/09/16, 21/08/17, 12/08/18. Les résultats obtenus à partir des images satellites seront confrontés aux données terrestres validées (mesures géodésiques et analyse de modèles 3D construits par photogrammétrie terrestre ou acquis par scanner laser).

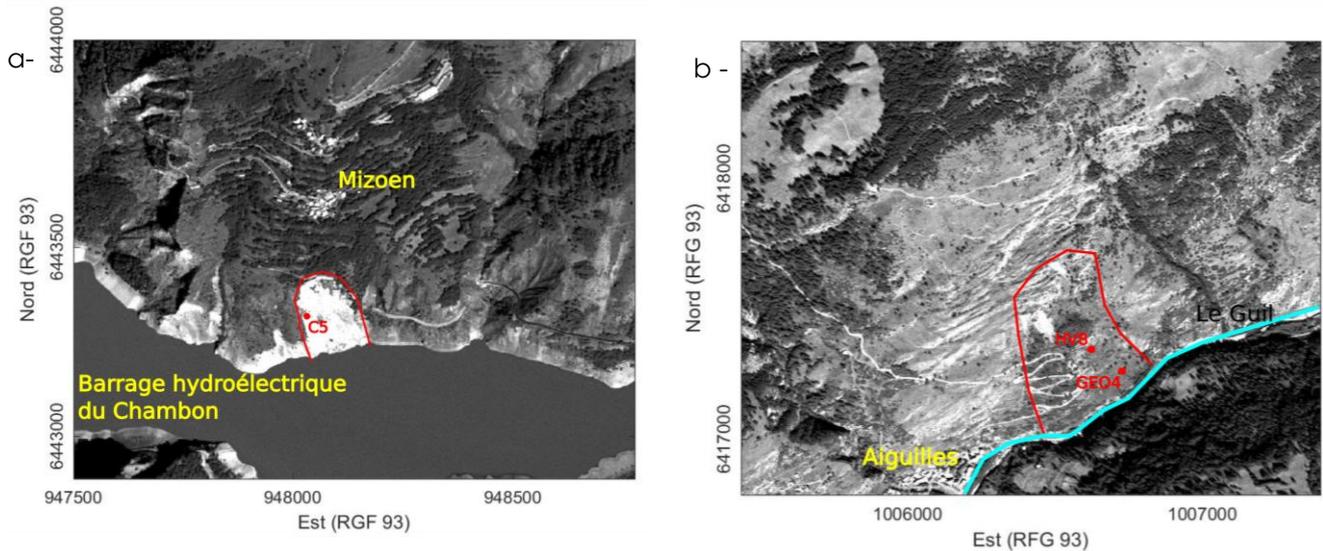


Figure 2: Cas d'études : a - glissement du Chambon - image Spot 5 du 21/08/2017, b- glissement du Pas de L'Ours - image Spot5 du 01/09/2014.

Glissement du Pas de l'Ours

Le glissement du Pas de l'Ours est situé dans la vallée du Guil (Hautes-Alpes). Il surplombe le Guil et se développe sur 480 m de large et 650 m de long (Figure 2) pour un dénivelé de 450 m environ. L'escarpement sommital, orienté ENE-OSO, est associé à un paléo-glissement, déjà signalé sur la carte géologique du BRGM (2003) et perceptible sur les anciennes photographies aériennes (1948). L'ensemble du versant est constitué d'alternances schisto-calcaires de la série des schistes lustrés piémontais présentant un pendage assez homogène d'environ 30° vers l'OSO.

La réactivation du glissement commence en partie haute avec des chutes de blocs observées sur la Piste des Lombards en 2014, puis sur la RD947. Mais c'est à partir de mars 2017 que les parties basses et centrales du glissement ont commencé à s'accélérer, jusqu'à des vitesses de 10 cm/an, en affectant fortement la RD jusqu'à la destruction du mur de soutènement. En partie haute, on observe un comportement rocheux avec le décrochement de grandes lames rocheuses alimentant des éboulis alors qu'en partie basse, on observe des langues de glissement plus caractéristiques d'un glissement dans les sols. L'épaisseur en mouvement est mal connue, estimée à une quarantaine de mètres.

Dans ce cas d'étude, les images satellites permettent de remonter dans le temps et visent à comprendre la réactivation du glissement : où, comment, quand. Cinq images sont sélectionnées à intervalles d'environ une année : 23/09/13, 01/09/14, 09/07/15, 22/08/16 et 05/10/17. Les résultats obtenus à partir des images satellites seront confrontés aux mesures géodésiques disponibles sur le site à partir de 2017.

3. Méthodes de traitement et résultats

L'outil classique de traitement des images optiques est la corrélation d'images appropriée pour la quantification des déplacements de surface cohérents sur de grandes surfaces

dans des zones à faible couvert végétal. Deux approches basées sur la corrélation d'images sont indiquées dans la suite avant d'être appliquées aux sites d'études.

3.1. Méthodes

Corrélation d'images

La corrélation d'images est une méthode de flots optiques qui vise à construire un champ de déplacements visuel qui permet de mettre en évidence les variations entre deux images (Leprince et al., 2007). Cette première méthode est considérée comme l'approche simple. Le principe est le suivant : pour chaque pixel de la première image, le pixel le plus ressemblant est recherché dans la seconde image au sein d'une fenêtre de corrélation. La notion de ressemblance est définie par les variations radiométriques dans un voisinage autour du pixel. Autrement dit, on cherche dans la deuxième image, au sein de la fenêtre de corrélation, le voisinage le plus ressemblant de celui du pixel traité de la première image. Pour cela, la fonction de corrélation croisée est calculée pour tous les voisinages de l'image 2 dans la fenêtre de corrélation et le voisinage le plus ressemblant est celui qui maximise la fonction de corrélation. Le degré de ressemblance est retranscrit au moyen du score de corrélation qui indique si le voisinage le plus ressemblant est ressemblant ou non. En sortie, on dispose de deux cartes de déplacements horizontaux et verticaux et d'une carte de score de corrélation.

L'outil que nous nous proposons d'utiliser pour réaliser la corrélation d'images est le corrélateur 2D implémenté dans le logiciel MicMac open-source et gratuit (Pierrot-Deseilligny et al, 2015).

Corrélation multi-paires

La corrélation d'images multi-paires est une méthode plus évoluée proposée par (Stumpf et al, 2017). Cette deuxième méthode est considérée comme l'approche avancée. Il s'agit de réaliser des corrélations d'images pour toutes les paires d'images au sein d'une série pour réaliser une redondance des corrélations et ainsi diminuer le niveau de bruit. Ensuite, les résultats sont post-traités en construisant un vecteur cohérence (Stumpf et al, 2017) pour analyser les variations de direction du vecteur déplacement. Si en un point, le vecteur déplacement présente toujours la même direction, il y a cohérence des résultats, la valeur 1 est attribuée pour la cohérence au point et la moyenne des valeurs de déplacements obtenues par les corrélations multi-paires est calculée. Si la direction des vecteurs déplacements varient beaucoup, il n'y a pas de cohérence entre les résultats (bruit) et une valeur proche de 0 est attribuée à la cohérence au point. Pour la suite, un tel point n'est plus considéré car trop affecté par le bruit. Cette approche par corrélation de multi-paires d'images suppose que la dynamique reste la même sur la période couverte par la série d'images. Sinon, la construction du vecteur cohérence n'est pas pertinente.

Une chaîne de traitement automatique a été développée par CNRS EOST et mise en place sur le site GeoHazards Tep (Terradue, 2020) ; son utilisation est toutefois limitée à des fins de recherche. Pour des applications opérationnelles, nous avons donc simplifié la procédure proposée par (Stumpf et al., 2017) et implémenté uniquement le calcul du vecteur cohérence dans un script Matlab pour post-traiter les calculs des corrélations d'images réalisés avec MicMac.

3.2. Résultats

Dans la logique poursuivie d'une utilisation opérationnelle, l'approche simple par corrélation de deux images est tout d'abord préférée.

Dans le cas du glissement du Chambon, le calcul est réalisé à partir des images du 09/09/16 et du 21/08/17. Les points sont filtrés avec des valeurs élevées de score de corrélation (SC, Figure 3-a) supérieurs à 200. Les déplacements sur la période sont présentés sur la Figure 3-b. Les valeurs de déplacements ne permettent pas de mettre en évidence le mouvement du glissement du Chambon. Le bruit de la méthode est élevé et les valeurs de déplacements au niveau de la zone en mouvement sont de l'ordre du bruit. Il existe en effet, dans le voisinage du mouvement, des zones présentant également des déplacements élevés, voire supérieurs aux déplacements réels. On ne peut pas différencier les zones en mouvement des zones stables.

A noter que le temps de calcul d'une corrélation entre deux images (1000 x 1000 pixels) est compris entre 20 min pour une précision de 0,2 pixels et 1h30 pour une précision de 0,1 pixels.

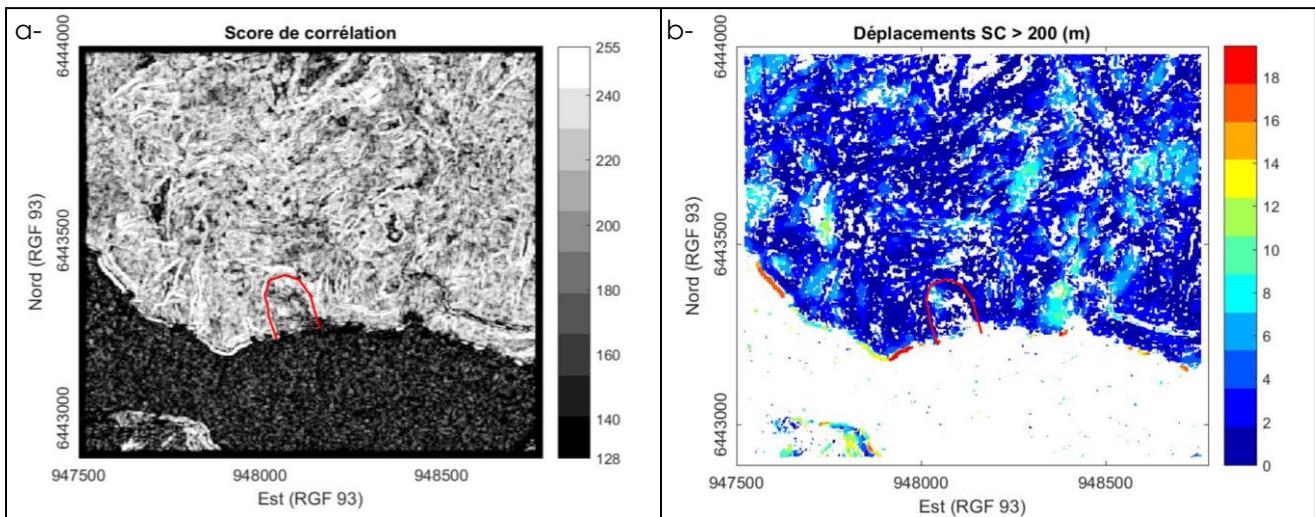


Figure 3 : Résultats du traitement simple (corrélation de deux images) sur les images des 09/09/16 et 21/08/2017 du glissement du Chambon : a- score de corrélation, b- déplacements calculés sur la période (points filtrés avec $SC > 200$).

A l'inverse, sur le glissement du Pas de L'Ours, la corrélation d'images permet de montrer les mouvements des différentes zones au cours du temps et le phénomène de réactivation du glissement (Figure 4). Les cartes des déplacements horizontaux et verticaux obtenus sont combinés pour construire les déplacements 2D. Les mesures in-situ n'ont été mises en place qu'à l'automne 2017 (Figure 5), mais il est néanmoins intéressant d'y confronter nos résultats. La courbe des déplacements mesurés au niveau de la cible HV8 (Figure 2-b) montre un comportement qui s'accélère au printemps 2018 avec des valeurs cumulées de déplacements qui sont de l'ordre de 20 m (respectivement 16 m au niveau de HV8 et 20 m au niveau de GEO4). Nos périodes d'études qui couvrent un an environ mettent en évidence des déplacements égaux à 5 à 10 m au niveau de HV8 entre 09/07/15 et 22/08/16 (Figure 5-a), 10 m entre 22/08/16 et 05/10/17 et sur cette même période au niveau de GEO4 5 à 20 m (Figure 5-b). Les ordres de grandeur fournis par la méthode de corrélation d'images sont donc cohérents avec les dynamiques observées et les mesures in-situ.

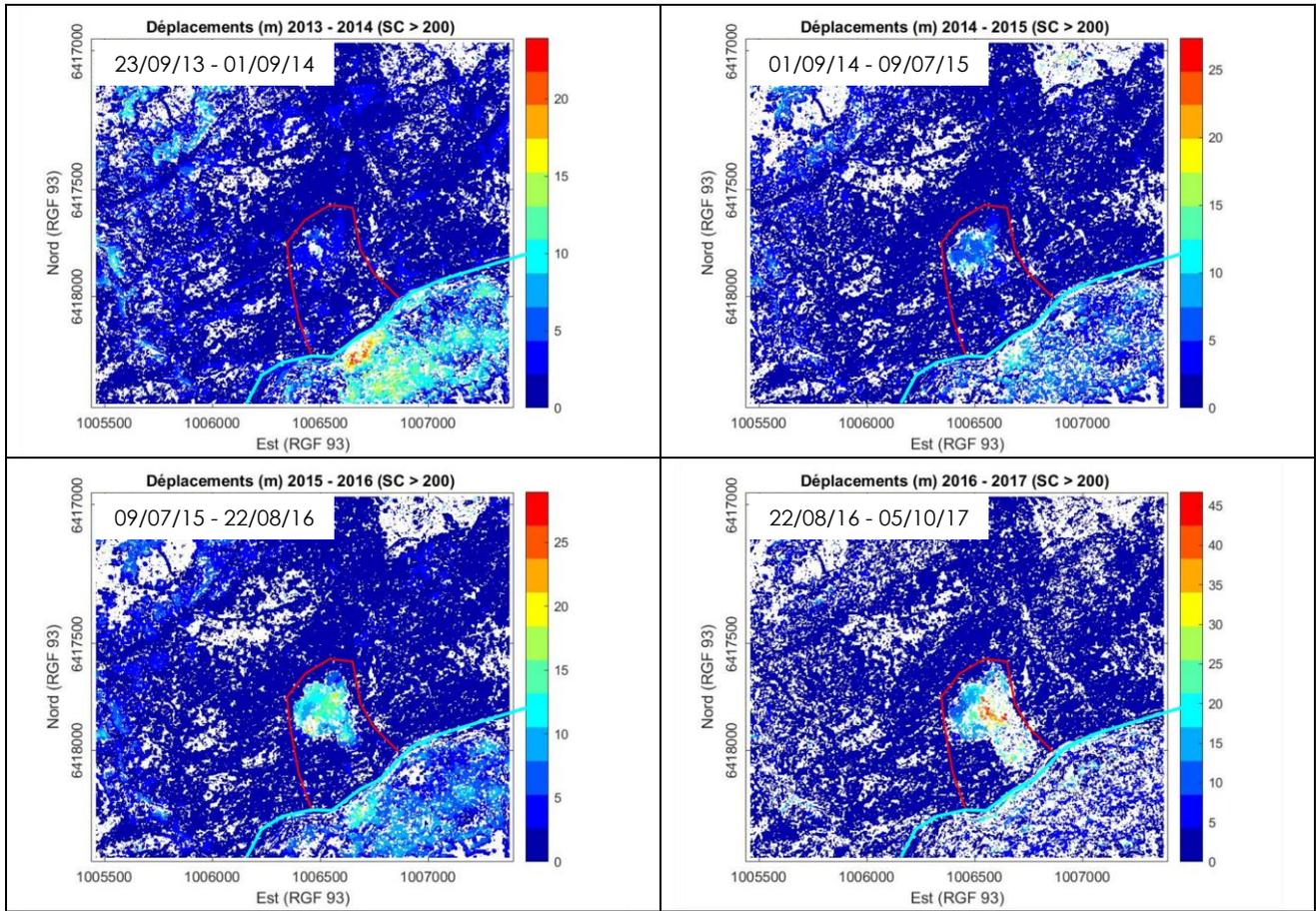


Figure 4 : Valeurs des déplacements 2D fournis par corrélation de deux images sur les 4 périodes d'étude : 23/09/13 - 01/09/14, 01/09/14 - 09/07/15, 09/07/15-22/08/16, 22/08/16-05/10/17.

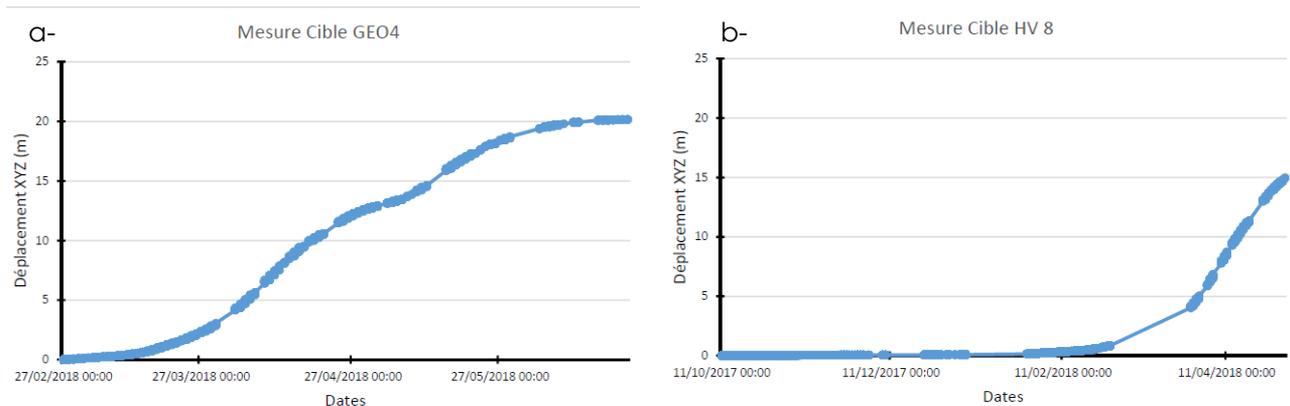


Figure 5 : Déplacements mesurés par géodésie sur les cibles GEO4 et HV8 pendant le printemps 2018 sur le glissement du Pas de l'Ours

Après l'échec de la méthode simple, la méthode avancée est déployée sur le glissement du Chambon avec la série d'images suivantes : 30/08/15, 09/09/16, 21/08/17 et 12/08/18. Suite aux corrélations unitaires entre les paires d'images, le vecteur cohérence (VC) est calculé (Figure 6-a). Les pixels pour lesquels les vecteurs direction des déplacements calculés sur chaque intervalle ne sont pas cohérents ($VC < 0,6$) sont éliminés. Pour les autres, la valeur de déplacement moyen est fournie en moyennant les valeurs des déplacements obtenues sur les périodes de calculs (Figure 6-b). La zone en mouvement est nettement mise en évidence. Le niveau de bruit a été abaissé par rapport à l'approche simple et on note des valeurs de déplacements moyen annuels au niveau du glissement du Chambon comprises entre 1,5 à 4 m. Ces valeurs sont cohérentes avec les données instrumentales disponibles ou issues de l'exploitation de modèles 3D. En effet, le

déplacement de la cible C5 (Figure 2-a), située dans la zone en mouvement la plus active, est égal à 3,10 m entre le 30/08/15 et 09/09/16, période du suivi par géodésie pour le compte du CD 38. Le suivi de la déformation par exploitation des modèles 3D acquis par scanner laser ou photogrammétrie terrestres (Chanut et al, 2017) a montré des déplacements moyens et maximaux égaux à 1,1 m et 3 m entre août 2016 et juillet 2017, 2,2 m et 4,5 m entre juillet 2017 et août 2018.

Le temps de calcul de cette méthode avancée correspond au nombre de paires d'images corrélées multiplié par le temps unitaire d'une corrélation (entre 20 min et 1h30 suivant la précision souhaitée), le temps de calcul du vecteur cohérence étant négligeable par rapport au reste du calcul.

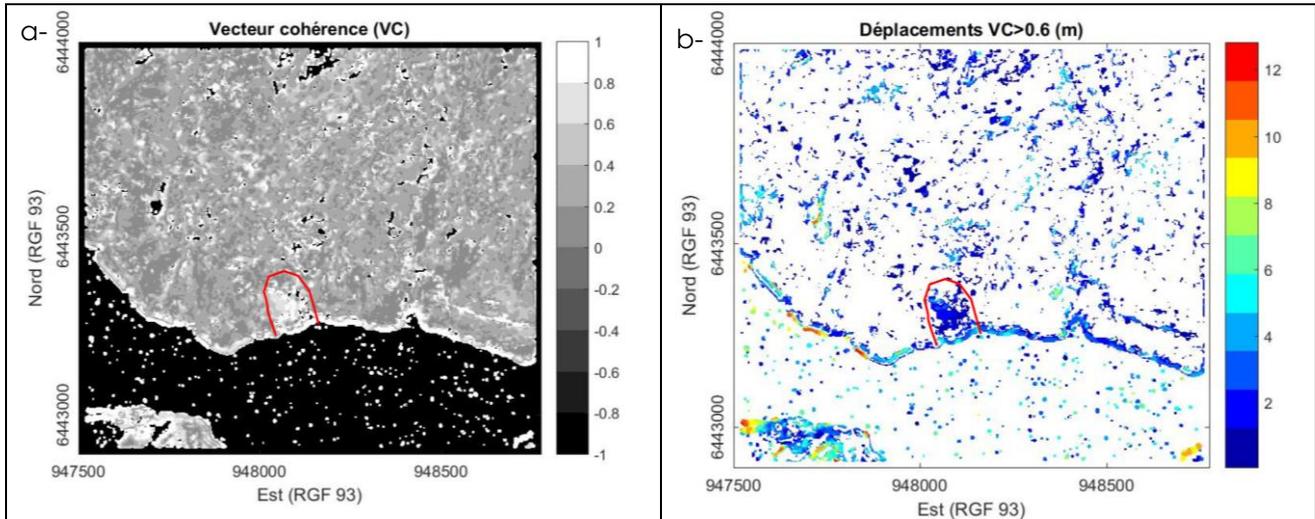


Figure 6 : Résultats du traitement avancé (corrélations multi-paires, construction du vecteur cohérence) sur une série d'images du glissement du Chambon (30/08/15, 09/09/16, 21/08/17 et 12/08/18) : a- vecteur cohérence, b-déplacements (m) moyens sur chaque période (points filtrés avec VC > 0.6)

4. Proposition d'une stratégie d'utilisation des images satellites

Suite aux résultats obtenus sur les sites du Chambon et du Pas de l'Ours, nous observons que le point crucial dans le traitement des images satellites optiques est le rapport entre les valeurs des déplacements de surface sur chaque intervalle d'étude et la résolution des images disponibles. Pour réaliser un traitement adapté, il faut mettre en adéquation la taille du pixel des images, les déplacements à quantifier et la méthode employée. Nous proposons donc les bases suivantes pour l'utilisation des images satellites optiques pour le suivi de l'évolution des mouvements de terrain :

- si le ratio entre le déplacement de surface sur chaque intervalle et la taille du pixel est supérieur à 10 (valeur à confirmer/modifier suite à des calculs futurs à réaliser avec des images satellites ayant une résolution différente), l'approche simple par corrélation d'images est suffisante pour fournir un champ des déplacements représentatif,
- si le ratio entre le déplacement de surface et la taille du pixel est supérieur à 2 (valeur à confirmer/modifier également), l'approche avancée par corrélation de multi-paires d'images permet tout de même de quantifier les déplacements,
- sinon (ratio entre le déplacement de surface et la taille du pixel est inférieur à 2, valeur à confirmer), les méthodes de corrélation d'images simple ou avancée ne permettent pas d'accéder à la valeur des déplacements, le bruit étant supérieur à l'ordre de grandeur de ces derniers.

5. Conclusions perspectives

L'approche simple appliquée au glissement du Pas de l'Ours a permis de montrer la réactivation du glissement. Cette approche n'a pas été suffisante pour le glissement du Chambon. Par contre, l'approche avancée a permis de filtrer le bruit et de mettre en évidence les déplacements réels pour ce dernier cas. Les images satellites permettent donc, en cas de faible couverture végétale, de fournir un ordre de grandeur des déplacements en 2D (valeurs et direction) pour des mouvements d'une amplitude supérieure à deux pixels. Actuellement, la résolution maximale des images est de 0,5 m, soit une amplitude minimale détectée égale à 1 m. Pour des mouvements d'amplitude plus faible, d'autres dispositifs de mesure doivent être envisagés : notamment les images satellites radar quand le site est adapté, les acquisitions Lidar ou des mesures plus classiques in-situ par tachéomètre par exemple.

Références bibliographiques

- Chanut, M.A., Kasperski, J., Dubois L., Dauphin, S., Duranthon, J.P., 2017. Quantification des déplacements par la méthode PLaS – application au glissement du Chambon. *Revue Française de Géotechnique*. 150, 4. <https://doi.org/10.1051/geotech/2017009>.
- Dubois, L., Dauphin, S., Rul, G., 2016. Le glissement du Chambon : évolution du phénomène et gestion de crise. *Revue Française de Géotechnique*. 148, 2. <https://doi.org/10.1051/geotech/2016010>.
- Lacroix, P., Bièvre, G., Pathier, E., Kniess, U., Jongmans, D., 2018. Use of Sentinel-2 images for the detection of precursory motions before landslide failures. *Remote Sensing of Environment*. 215, 507-516. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.042>.
- Leprince, S., Ayoub, F., Klingner, Y., Avouac, J. P., 2007. Co-Registration of Optically Sensed Images and Correlation (COSICorr): An operational methodology for ground deformation measurements. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2007)*, Barcelona.
- Pierrot-Deseilligny, M., Belveaux, J., Choqueux, G., Deveau, M., Girod, L., 2015. MicMac, Apero and Other Beverages in a Nutshell, ENSG — Marne-la-Vallée. Available online: <https://micmac.engg.eu/index.php/Accueil> (last consult : 06/06/2019).
- Stumpf A., Malet J.P., Delacourt C. (2017). Correlation of satellite image time-series for the detection and monitoring of slow-moving landslides. *Remote Sensing of Environment*. 189, 40-55. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.007>.
- Stumpf A., Malet J.-P., Allemand P., Ulrich P. (2014) Surface reconstruction and landslide displacement measurements with Pléiades satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 95, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.05.008>.
- Terradue, 2020. <https://terradue.github.io/doc-tep-geohazards/tutorials/mpic-opt.html>