

Lasergrammétrie et Interférométrie radar : des techniques topographiques innovantes pour l'auscultation d'ouvrages hydrauliques

Lasergrammetry and radar Interferometry : Innovative survey measurement techniques for monitoring hydraulic structures displacement

Rémy Boudon, Sandra Berni
EDF DPIH DTG Département Surveillance, 12 rue Saint Sidoine, 69003 LYON FRANCE
remy.boudon@edf.fr, sandra.berni@edf.fr

Fifamè Koudogbo, Anne Urdiruz
ALTAMIRA INFORMATION, C/ Còrsega 381-387, 08037 BARCELONE ESPAGNE
ALTAMIRA INFORMATION, 8-10 rue Hermès, 31520 RAMONVILLE ST AGNE FRANCE
fifame.koudogbo@altamira-information.com, anne.urdiruz@altamira-information.com

MOTS CLÉS

Topographie, Lasergrammétrie, Interférométrie, InSAR, Imagerie SAR, Glissements de terrain, Auscultation, Surveillance, Déformation, Déplacement, Mouvement

RÉSUMÉ

Les techniques de mesure topographique sont largement utilisées pour répondre aux besoins d'auscultation des déplacements d'ouvrages hydrauliques, tant sur les structures que sur leur environnement. Ces techniques ont fortement évolué ces dernières années, grâce bien sûr aux apports considérables de l'informatique, mais aussi grâce aux nouvelles technologies de mesure et de communication. Le métier du topographe ausculteur a suivi ces évolutions. Ainsi, des techniques terrestres les plus simples aux techniques spatiales les plus sophistiquées, la palette est large et les différentes manières de les mettre en œuvre et de les associer aux autres capteurs de déplacement disponibles en instrumentation augmentent encore leur capacité à répondre efficacement aux besoins des ingénieurs structure.

Parmi les techniques remarquables aujourd'hui, la lasergrammétrie, qui permet d'envisager des modes de surveillance "surfactive" et non plus "ponctuelle", qui peuvent s'avérer beaucoup plus pertinents dans le cas de structures non monolithiques (digues, glissements...). Mais le spatial n'est pas en reste : la mesure de déplacement par Interférométrie radar (InSAR, SAR pour Synthetic Aperture Radar ou Radar à Synthèse d'Ouverture) est une technique de plus en plus utilisée pour la surveillance des ouvrages, notamment lors de travaux. Grâce aux données radar archivées depuis les années 1990, cette technique permet aussi de reconstituer des historiques de mesures dans des zones d'intérêt. Une étude InSAR historique du barrage de prise d'eau des Brévières a ainsi été réalisée, qui a permis de conforter le diagnostic géologique et l'origine des désordres constatés.

Il faut cependant garder à l'esprit que toutes ces technologies aussi automatisées et sophistiquées soient-elles, doivent toujours être parfaitement dominées par leurs utilisateurs, sous peine de commettre des erreurs qui peuvent être lourdes de conséquences dans le domaine de la surveillance. L'étalonnage et la vérification des scanners laser et la qualification de la précision de l'interférométrie radar satellite sont ainsi aujourd'hui à l'étude à EDF.

ABSTRACT

Survey measurement techniques are widely used to meet the needs of monitoring dam deformation of both the structure itself and its environment. These techniques have considerably progressed during last decade, thanks logically to the large contributions of computers, but also by new technologies for measurement and communication. The job of monitoring surveyor followed these developments. From the simplest terrestrial techniques, to the most sophisticated Space technologies, the range is wide and the different ways to implement them and to associate them with other displacement sensor available in instrumentation, further increase their ability to respond efficiently to structural engineer needs.

Among the remarkable techniques today, the laser scanning, which allows to consider new ways of monitoring based on "surface" evolution rather than "point" evolution. Approach which can be much more relevant in the case of non-monolithic structures (embankment dam, landslides ...). But Space technology is not left out: satellite measurement of displacement by "Synthetic Aperture Radar Interferometry" technique (InSAR), is increasingly used for monitoring of structures and environments, in particular during construction work progress. With this technique and when sites are suitable, available satellite radar data archived since the 1990s may allow to reconstruct time series charts showing evolution of ground motion over time in areas of interest.

However, it is necessary to keep in mind that all these technologies as automated and sophisticated they are, should always be thoroughly dominated by their users, in particular in the field of monitoring structures. The calibration and the verification of laser scanner instrument and the characterization of the accuracy of InSAR technique are now being considered at EDF.

1. INTRODUCTION

Les techniques de mesure topographique sont largement utilisées pour répondre aux besoins d'auscultation des déplacements d'ouvrages hydrauliques, tant sur les structures que sur leur environnement. Ces techniques ont fortement évolué ces dernières années, grâce bien sûr aux apports considérables de l'informatique, mais aussi grâce aux nouvelles technologies de mesure et de communication. Le métier du topographe ausculteur a suivi ces évolutions. Ainsi, des techniques terrestres les plus simples aux techniques spatiales les plus sophistiquées, la palette est large et les différentes manières de les mettre en œuvre et de les associer aux autres capteurs de déplacement disponibles en instrumentation augmentent encore leur capacité à répondre efficacement aux besoins des ingénieurs structure.

Deux techniques remarquables aujourd'hui de par leur potentiel pour la surveillance d'ouvrages, sont développées dans cet article au travers d'applications réalisées.

La lasergrammétrie permet d'envisager des modes de surveillance "surfacique" et non plus "ponctuelle", qui peuvent s'avérer beaucoup plus pertinents dans le cas de structures non monolithiques (digues, glissements...). Une surveillance du parement aval empierré du barrage d'Araing a ainsi été expérimentée.

La mesure de déplacement par interférométrie radar (InSAR) est une technique de plus en plus utilisée pour la surveillance des ouvrages, notamment lors de travaux. Grâce aux données radar archivées depuis les années 1990, cette technique permet aussi de reconstituer des historiques de mesures dans des zones d'intérêt ; une étude InSAR historique du barrage de prise d'eau des Brévières a ainsi été réalisée. Elle a permis de conforter le diagnostic géologique et l'origine des désordres constatés.

2. SUIVI D'OUVRAGE PAR LASERGRAMMETRIE

2.1 Principes généraux

La lasergrammétrie est une technique permettant d'acquérir rapidement et avec une résolution très fine des données 3D, à partir de scanner lasers. Elle couvre de nombreux domaines : cartographie, architecture, industrie, construction... et aujourd'hui la surveillance d'ouvrages.

Contrairement aux techniques topographiques classiques utilisant des cibles ou des prismes comme point de mesure, le scanner laser réalise une mesure polaire – angle horizontal, angle vertical, distance – sans réflecteur directement sur la surface de l'objet. Grâce à un système de balayage rapide, il permet d'acquérir de l'ordre de 100 000 points à la seconde sans contact et ce, à des portées allant jusqu'à plusieurs centaines de mètres. Même si sa précision n'atteint pas celle des tachéomètres (tachéomètre = théodolite + distancemètre intégré), la densité de points mesurables sur un objet est elle très intéressante.

En effet, sur des ouvrages non monolithiques ou très déformables comme les digues par exemple, le choix du nombre, des emplacements et de la matérialisation des points de mesure présente toujours le risque

de ne pas être le bon, et que des désordres apparaissent en dehors des zones initialement identifiées, sans être détectés.

Dès 2006, après développement de procédures de mesure appropriées, EDF a fait le choix d'expérimenter cette technologie pour d'une part le contrôle géométrique des coques minces des aéroréfrigérants des centrales thermiques et nucléaires en remplacement de la photogrammétrie, et d'autre part le suivi de parements empierreés de barrages susceptibles de développer localement des boursouflures.



Figure 1: Scanner laser stationné sur pilier d'auscultation pour la mesure lasergrammétrique d'un aéroréfrigérant

2.2 Référentiel de mesure

Un relevé par scanner laser, comme tout relevé topographique, passe par un géo-référencement dans le référentiel choisi pour exploiter les mesures.

Ce référentiel doit donc être matérialisé, déterminé et suivi par topographie classique, afin de mettre à disposition, pour chaque station du scanner laser, les points d'appuis nécessaires à son géo-référencement. De la qualité de ce référentiel dépendra directement la qualité du calage du nuage de points final.

Le géo-référencement d'un relevé par scanner laser à partir de plusieurs stations s'apparente à celui effectué lors de mesures 3D par tachéométrie classique. La mesure de cibles positionnées sur les points connus du référentiel permet de caler l'ensemble du nuage de points relevés dans le référentiel. La mesure de points communs entre les différentes stations permet de consolider l'ensemble, de même que des techniques d'ajustement de type "nuage – nuage" sur des surfaces communes, scannées également depuis différentes stations.

Les scanners les plus récents permettent en outre de stationner l'instrument à la verticale d'un point connu, un compensateur ou inclinomètre bi-axial permettant de garantir la verticalité de l'axe de rotation vertical de l'instrument. Ils s'apparentent ainsi encore un peu plus aux tachéomètres, en facilitant et en améliorant la précision du géo-référencement.

Pour son application à la surveillance, le géo-référencement est fondamental. Assurer la qualité et la pérennité du référentiel topographique, ainsi que la cohérence d'ensemble d'un nuage de points saisi depuis plusieurs stations, sont donc indispensables.

2.3 Cas concret d'application sur le barrage d'Araing

Contexte

Le barrage d'Araing situé en Ariège près d'Eylie, est un barrage poids en enrochements constitué de dalles schisteuses mises en vrac dans le corps de l'ouvrage, et rangées à la main sur les parements aval et amont, ce dernier étant recouvert d'un masque d'étanchéité en béton armé. Les 2,5m supérieurs sont constitués de plots en béton de 3m de largeur environ.

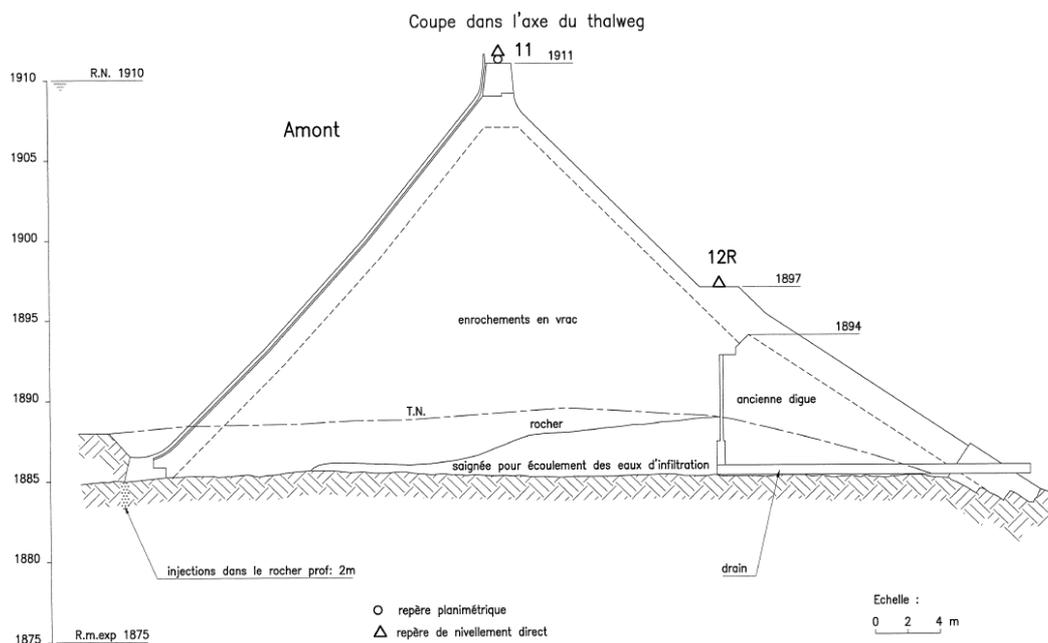


Figure 2: coupe du barrage d'Araing

Lors de sa mise en eau en 1942, des mouvements d'adaptation importants (déplacements vers l'aval et tassements) étaient observés, dont les résultantes étaient pratiquement parallèles au parement aval. Ces déformations ont provoqué mécaniquement l'apparition de boursouflures sur le parement aval, atteignant des amplitudes de plusieurs dizaines de cm nécessitant réparations et renforcement du pied aval. Par la suite, ces mouvements se sont amortis progressivement, réduisant également l'apparition de nouvelles boursouflures.

Expérimentation

Dans le but de détecter et suivre l'évolution du phénomène résiduel de boursouflures localisées sur le parement aval, une expérimentation de la technique lasergrammétrie a été mise en oeuvre. En 2006, le référentiel topographique du site a tout d'abord été renforcé : des rivets scellés dans des affleurement rocheux ont été implantés puis mesurés par topographie classique de manière à créer et déterminer un réseau de points stables et pérennes autour de l'ouvrage. Une première lasergrammétrie complète du parement aval a été réalisée à partir de 6 stations géoréférencées dans le référentiel du site par l'intermédiaire de cibles (environ 10 par station). La densité du relevé était à minima de 1 point tous les 2 cm sur l'ensemble du parement aval.

En 2011, une deuxième campagne de mesure était réalisée de manière similaire, mais avec une version de scanner plus récent, permettant la mise en station du scanner à la verticale de points connus du référentiel.



Figure 3: scanner laser stationné sur trépied

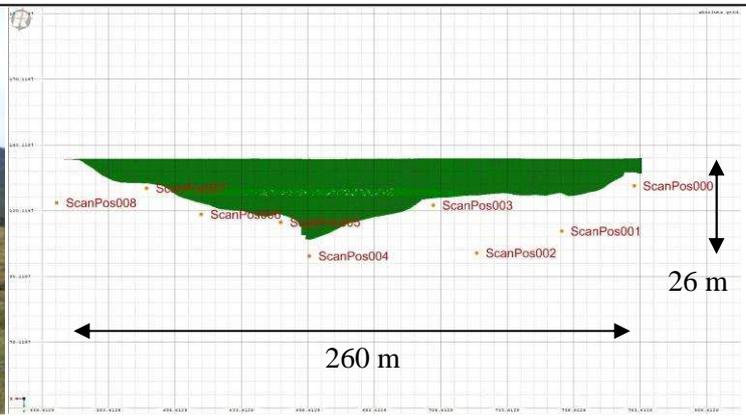


Figure 4: positions des stations de scanner vu d'aval

Résultats

Le tableau suivant présente les ordres de grandeurs des précisions obtenues avec la technique lasergrammétrie dans la configuration du barrage d'Araing et avec le matériel utilisé en 2011 :

	Ecart type (1σ)
Coordonnées des points du référentiel	$\pm 3\text{mm}$
Géo-référencement des stations de scan	$\pm 5\text{mm}$
Coordonnées des points du nuage final	$\pm 10\text{mm}$

Tableau 1: ordre de grandeur des précisions obtenues par lasergrammétrie

Le retour d'expérience du scanner utilisé en 2006 fait toutefois apparaître des performances moindres, de l'ordre de $\pm 20\text{mm}$ sur les coordonnées des points du nuage final.

En raison de l'absence de joint entre les pierres du parement aval, des points ont été mesurés entre les pierres. Pour éliminer ces points, un filtre de type « progressive morphological filter » a été utilisé. Ce traitement considère les points du parement comme une surface « sol » et les points entre les pierres comme des points « hors sol » qui sont éliminés. La résolution des nuages de points en sortie de ce traitement est de 1 point tous les 5 cm. Enfin, un modèle numérique du parement a été calculé pour chaque campagne de mesure.

Exploitation

La comparaison des relevés 2011 – 2006 fait apparaître de écarts compris entre -2cm (points bleus) à $+2\text{cm}$ (points jaune). Au regard des précisions annoncées ci-dessus, ces déplacements ne sont pas significatifs et ne mettent pas en évidence de zone d'évolution notable.

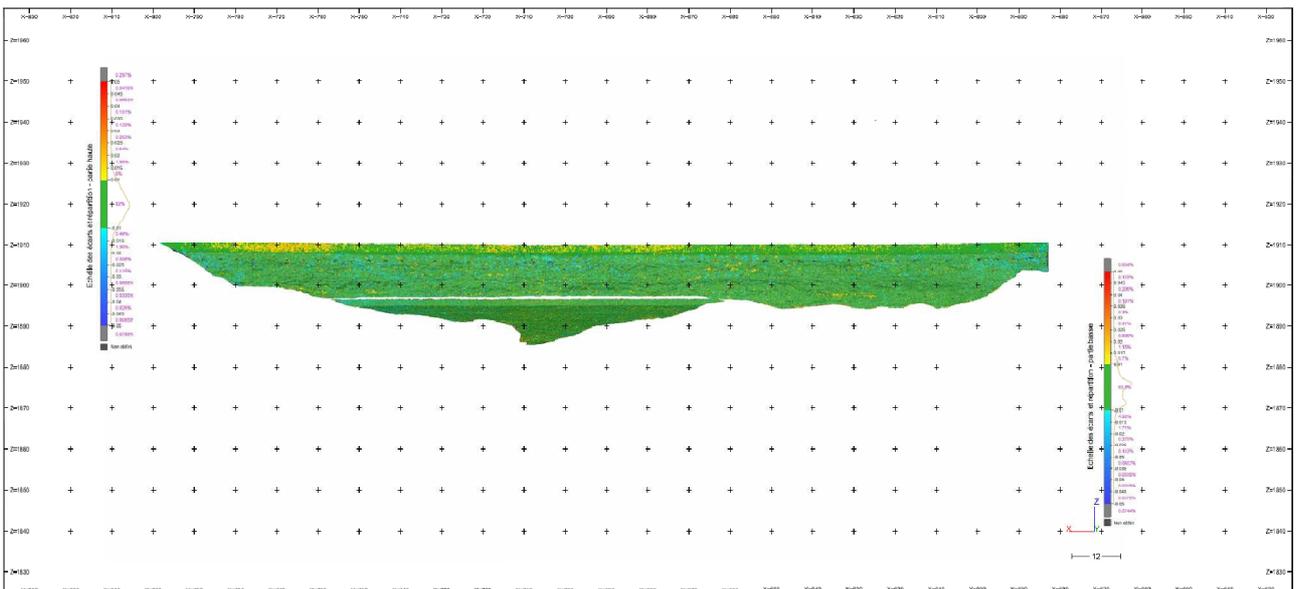


Figure 5 : comparaison des relevés (maillages) 2011 – 2006

En effet, le mouvement résiduel global de l'ouvrage observé en crête par le dispositif d'auscultation planimétrique du barrage, inférieur à 1cm vers l'aval sur la période 2006 – 2011 est trop faible pour être détecté par lasergrammétrie. D'autre part, aucune évolution de boursouffle n'est effectivement observée en inspection visuelle.

Perspectives

Cette expérimentation se poursuit sur d'autres barrages du même type comme le barrage d'Escoubous et celui de Portillon où une comparaison directe pourra être effectuée grâce aux mesures topographiques classiques réalisées sur les boursouffles.

Parallèlement, les procédures de relevés sur site continuent à être optimisées pour l'auscultation : contrôle en temps réel in situ de manière à réaliser les reprises nécessaires en cas de dépassement de seuils de tolérance, optimisation des calculs de consolidation des nuages de points et des calculs de calage dans le référentiel du site. En outre, les procédures d'étalonnage et de vérification in situ de cet instrument particulier qu'est le scanner laser, sont en cours d'élaboration à EDF. Leurs mises en œuvre systématiques fiabiliseront les relevés et garantiront la qualité des livrables.

3. ANALYSE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN A PARTIR DE LA TECHNOLOGIE INSAR - SPN

3.1 Méthodologie de la mesure de mouvement du sol

3.1.1 L'interférométrie radar

L'interférométrie SAR (InSAR) est l'une des applications majeures de l'imagerie radar. L'interférométrie est basée sur l'analyse du signal radar entre deux images SAR (Synthetic Aperture Radar ou Radar à Synthèse d'Ouverture) acquises avec des angles de vue légèrement différents. Les satellites radar enregistrent, avec une très grande précision, la distance parcourue par l'onde émise par le satellite pour atteindre la cible au sol. En analysant l'évolution de la distance entre le capteur et un point au sol au fil du temps, la technologie InSAR permet de dériver une information très précise sur la topographie de la scène et sur les mouvements du sol.

Les signaux radar correspondent à des ondes électromagnétiques émises dans le domaine des micro-ondes. La longueur d'onde est directement liée à la magnitude de mouvement qui pourra être mesurée. La grande variété de systèmes SAR scientifiques et commerciaux permet, pour chaque type de site d'intérêt, de sélectionner les images satellitaires les plus adéquates en fonction de la nature du site, de l'application concernée et de l'archive d'images disponible (pour une étude historique). Les caractéristiques des satellites radar et leurs performances pour des études de mouvement du sol sont résumées dans le Tableau 2.

	ERS/ENVISAT	ALOS	RADARSAT-2	TerraSAR-X	COSMO-SkyMed
Mission	1991-2010	2006-2011	2007- today	2007- today	2007 - today
Bande	C	L	C	X	X
Cycle [jours]	35	46	24	11	8
Résolution [mxm]	20x4	10x10	5x5	3x3	3x3
Précision de la mesure [mm]	3	7	3	2	2
Avantages	Importante archive d'images	Détection de plus forts mouvements (cm-dm) – Efficace aussi dans les zones de végétation	Mouvements de plus grande magnitude détectable (par rapport à la bande X)	Résolution spatiale jusqu'à 1 m	Meilleure resolution temporelle, jusqu'à 4 jours

Tableau 2: Caractéristiques des missions satellitaires utilisées pour la mesure de mouvement du sol à partir de l'interférométrie

3.1.2 La méthodologie SPN

La technique Persistent Scatterer Interferometry (PSI) peut être employée pour détecter, mesurer et surveiller les mouvements du terrain (subsides ou soulèvements), les glissements de terrain, vérifier la stabilité d'infrastructures ou anticiper les risques d'inondations et surveiller les activités sismiques.

La chaîne interférométrique SPN (Stable Point Network ou Réseau de Points stables) a été développée par Altamira Information [1] et a fait l'objet d'une certification par l'ESA dans le cadre du programme GMES TerraFirma [2]. Cette technique basée sur des traitements statistiques itératifs requiert une grande quantité d'images (entre 14 et 25 images au minimum en fonction des missions satellite).

Afin de mesurer les mouvements de terrain, la technologie InSAR se base sur la comparaison de l'information de phase fournie par chaque image radar durant la période d'étude. A partir de ces données radar acquises à différentes dates, l'algorithme PSI identifie les cibles communes à toutes les images (et référencées à partir de leur position) qui diffusent le signal radar vers le satellite d'une manière nette et constante (réflecteurs persistants). Ces cibles agissent comme des réflecteurs persistants (« Persistent Scatterers » en anglais ou PS) en raison de leurs caractéristiques géométriques et diélectriques. Elles correspondent le plus souvent à des éléments de structures artificielles (bâtiments, ponts, tours, etc.) mais également à des secteurs de zones sans végétation (sols nus) ou à des affleurements rocheux.

Il est enfin nécessaire de souligner que plus le nombre d'images disponibles est grand, meilleure sera la qualité finale du produit en terme de nombre de points de mesure et de précision. Le résultat du traitement est une carte de déformation de surface qui indique pour chaque point de mesure l'élévation ou l'enfoncement moyen annuel pour la période d'analyse. Un profil indiquant l'évolution du mouvement dans le temps pour chaque point de mesure est aussi fourni. Les données d'entrée et de sortie du traitement sont schématisées sur la figure 6.

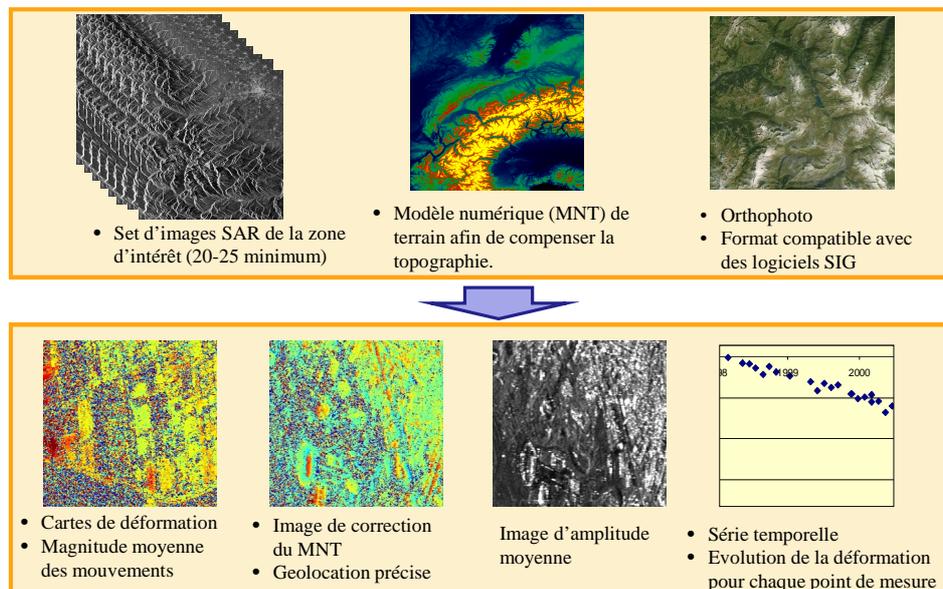


Figure 6 : Données d'entrée et de sortie de la chaîne de traitement SPN

3.2 Distorsions géométriques

Un radar SAR est un système actif qui illumine latéralement une surface au sol en envoyant une série d'ondes électromagnétiques en direction d'une cible potentielle et analyse par la suite le signal retour réfléchi.

La géométrie d'acquisition des systèmes SAR est à l'origine de distorsions spécifiques causées par la projection d'une scène réelle (3-D) sur le plan oblique de l'acquisition (2-D). Les trois principaux types de distorsions géométriques inhérentes à la configuration de l'acquisition SAR sont :

- le repliement du relief ou Foreshortening ;
- l'ombre ou Shadowing ;
- les inversions de relief ou Layover.

Du fait de la géométrie d'acquisition du SAR, la projection en distance-temps des trois points définissant une colline montre que, pour le versant faisant face au capteur, la base et le sommet sont imagés dans un intervalle de temps très court. Par conséquent, ce versant est comprimé sur l'image SAR alors que le versant opposé est considérablement plus long. C'est l'effet du repliement de relief ou foreshortening. Cet effet peut être corrigé lors de la géolocalisation des mesures InSAR.

L'inversion de relief est un cas extrême de repliement du relief. Elle apparaît quand l'angle d'incidence est plus petit que l'angle donné par la pente locale, particulièrement en cas de pentes très raides orientées vers le satellite ; la pente locale est alors telle que l'angle entre le vecteur (Satellite - Point au sol) et la normale à la surface imagée est négatif. Les sommets des montagnes (points B et B' sur la figure 7a), plus proches du radar, sont imagés avant leur base (points A et A' sur la figure 7a), plusieurs points au sol se retrouvent localisés sur la même position dans l'image radar. Aucune mesure ne pourra être faite dans les zones d'inversion de relief puisque le signal radar lui-même est fortement distordu.

Le deuxième type de distorsion qui empêche les mesures de mouvement est l'ombre. Une ombre radar est le reflet d'une absence de rétrodiffusion ; elle apparaît lorsqu'une partie d'une ligne image est masquée par la partie précédente de cette ligne image. Dans l'exemple proposé sur la figure 7b, les points situés entre B et D sont peu ou pas du tout éclairés par le signal radar ; les pixels radar situés entre B' et D' présentent donc un niveau de rétrodiffusion très faible sur l'image SAR.

La présence, la forme et la quantité d'ombre radar produite par des éléments du relief dépendent de plusieurs facteurs comme la direction de l'illumination, l'angle d'incidence, l'altitude de la plate-forme et l'orientation de la pente.

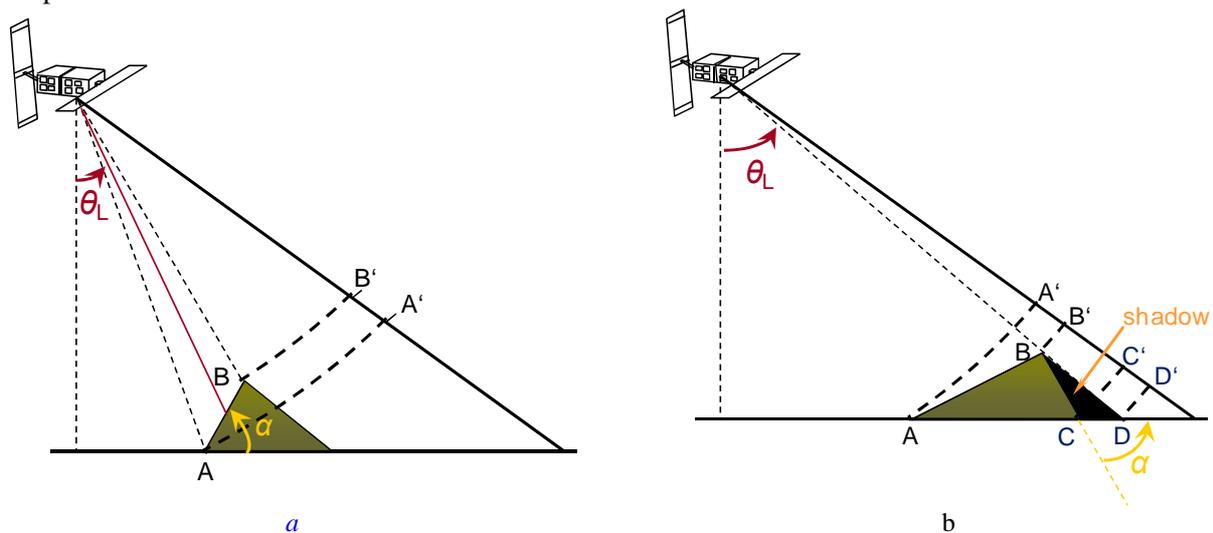


Figure 7 : Distorsions géométriques inhérentes à l'imagerie SAR; a) repliement de relief ou layover, b) ombre

3.3 Projection de la mesure de mouvement dans le sens de la pente

Dans les applications PSI, le mouvement est mesuré dans le plan image du radar, c'est-à-dire dans la direction de la ligne de visée. Sur une zone plane, ceci n'a pas de conséquence majeure ; dans les zones de relief, différents facteurs doivent par contre être pris en compte afin d'éviter une interprétation incorrecte des mesures de déplacement. En particulier l'orientation de la pente de la montagne par rapport à la ligne de visée du satellite doit être considérée. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre deux exemples de configuration de mesure de mouvement.

- Dans le cas 1, la ligne de visée du satellite est orientée dans la direction de la pente de la montagne. En glissant, la cible s'éloigne du capteur, la distance R_2 est plus importante que R_1 . Les mesures de mouvement indiquent un glissement de terrain ; cependant considérant la direction de la ligne de visée, le mouvement détecté est plus important qu'il ne l'est en réalité.
- Dans le cas 2, le satellite est positionné face à la pente de la montagne. Le glissement du point résulte dans le fait qu'il se rapproche du capteur ; la distance R_4 est plus faible que la distance R_3 . Ceci se traduit, en terme de mesure, par une élévation de la cible par rapport à sa position initiale.

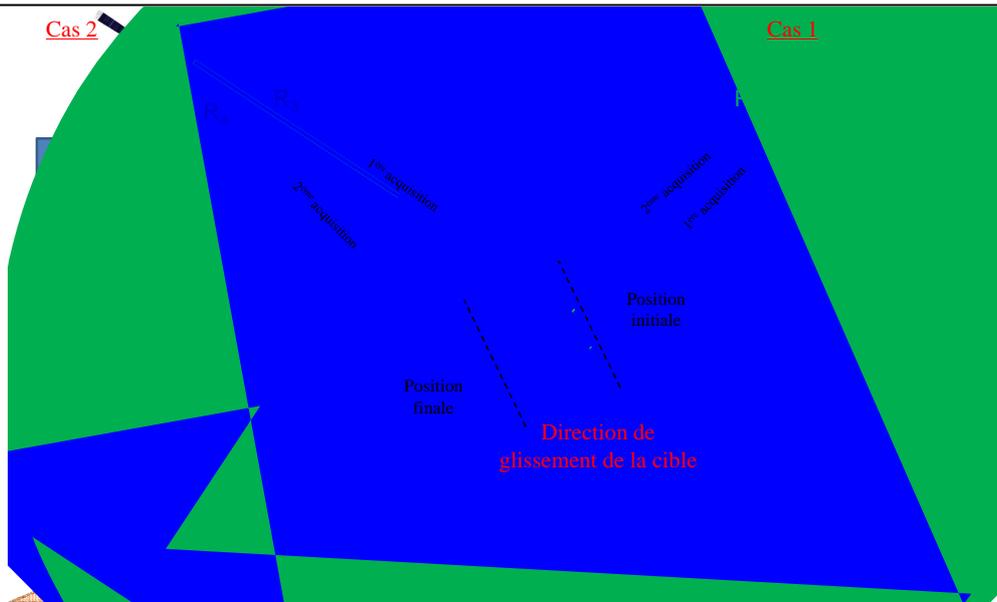


Figure 8 : *Mouvement suivant la ligne de visée du radar vs mouvement dans le sens de la pente*

Afin de s'affranchir de cette dépendance relative à l'orientation du mouvement, une méthodologie simple a été développée et est appliquée afin de projeter les mesures dans la direction de la pente.

La géométrie de l'acquisition peut être schématisée par la figure 9. V_{LOS} est le déplacement mesuré par la technique SPN, V_{pente} est le déplacement réel à déterminer.

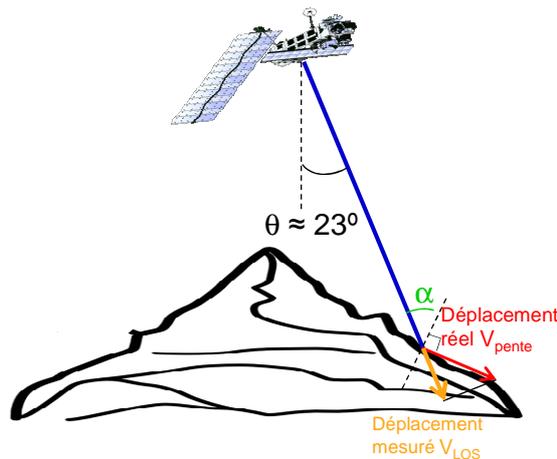


Figure 9: *Configuration d'acquisition dans les zones de relief et projection du mouvement dans le sens de la pente*

La procédure consiste à déterminer l'angle entre la ligne de visée du satellite et la normale locale à la pente de la montagne ; cet angle est appelé angle d'incidence locale et représenté par α sur la figure 9. Cet angle peut être déterminé à partir de l'angle d'incidence du satellite et d'un modèle précis de la topographie du sol. Une résolution plus ou moins équivalente à celle des images SAR est requise.

Une fois l'angle d'incidence local calculé en chaque point de mesure, il est possible d'analyser la position du point par rapport au capteur et ainsi de corriger la mesure de mouvement en la projetant dans le sens de la pente aux points qui le nécessitent.

3.4 Cas concret d'application sur le barrage de Tignes et la prise d'eau des Brévières

Ce paragraphe présente un cas d'application. Le barrage et la prise d'eau des Brévières sont situés en aval du barrage de Tignes, dans la vallée de l'Isère, et constituent l'ouvrage d'alimentation de l'usine de Malgovert. Depuis une quarantaine d'année, des dégradations évolutives sont observées sur le génie civil des ouvrages. Un dispositif d'auscultation composé de mesures topographiques classiques, d'inclinomètres et d'extensomètres a permis de suivre l'évolution des déformations, d'en déterminer les cinétiques et de révéler

l'existence d'un probable mouvement d'ensemble des rives qui en serait à l'origine. Des reconnaissances géotechniques ont également été menées afin de mieux caractériser la géologie du site.

Dans le but de conforter le diagnostic des phénomènes géologiques en jeu, une étude d'interférométrie radar a été lancée en 2011. Profitant de cette opportunité, le barrage de Tignes a été inclus dans le périmètre de l'étude, afin de vérifier que les mouvements de terrain suspectés ne l'affectaient pas.

3.4.1 Localisation géographique de la zone d'étude et distorsions géométriques

La zone d'intérêt se situe entre le Sud du Lac de Chevril et le Lieu-dit du Chenal, plus au Nord. Elle se caractérise par une vallée encaissée et son fort relief couvert par la neige en hiver. Des forêts sont présentes sur certains versants où alternent roches, sols nus, et prairies. Les secteurs d'intérêt sont localisables sur l'image Google Earth proposée sur la figure 10. Les rectangles rouge et bleu représentent les délimitations des rives gauche et droite sur lesquelles l'étude de mouvement de terrain va se focaliser.

Les typologies des deux rives sont différentes ; la rive gauche est plus minérale avec peu d'habitations, elle est caractérisée par une forte pente, des éboulis actifs sont de plus répertoriés. La rive droite présente une couverture végétale plus importante et quelques habitations ; sa pente est moyenne.

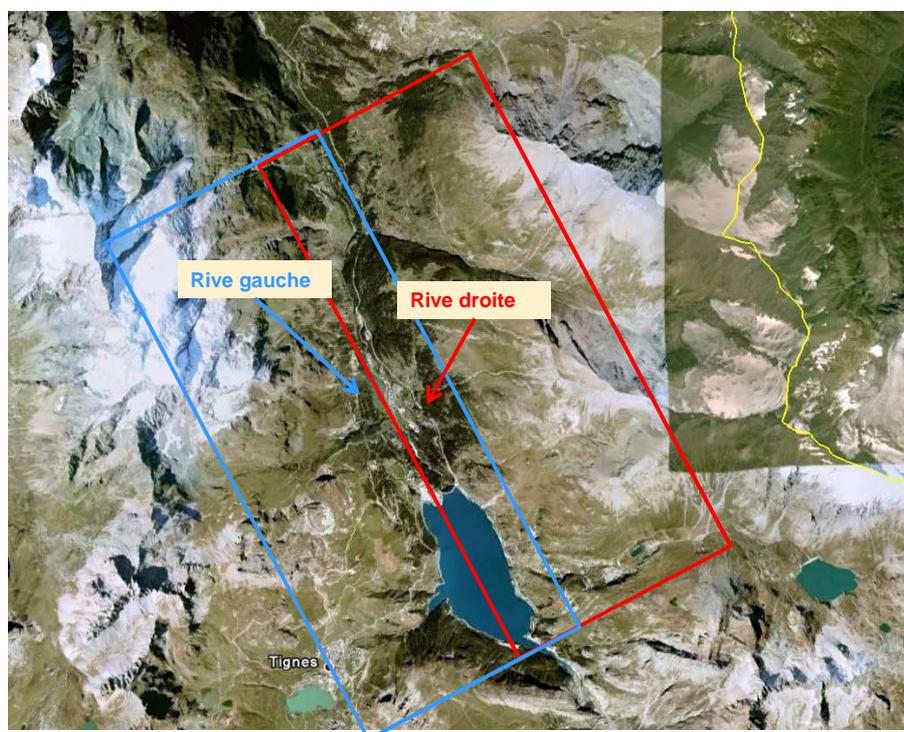


Figure 10: Présentation de la zone d'intérêt - © Google Earth 2011 pour l'image d'arrière plan

La topographie de la zone d'intérêt génère des distorsions géométriques ; la figure 11 montre les cartes de distorsions dans le cas où des orbites ascendantes ou descendantes sont considérées, avec une incidence d'environ 23° (correspondant aux données d'archive disponibles). Les zones affectées par des distorsions et donc sur lesquelles aucune mesure de déplacement n'est accessible, sont codées en jaune (compression) et en rouge (ombre). On remarquera que les modes de visée ascendant et descendant sont complémentaires ; ils permettent ainsi, en les combinant, d'avoir une visibilité totale de la zone d'étude. Le mode ascendant a ainsi permis l'étude du versant gauche, alors que le mode descendant a été utilisé pour analyser la stabilité du versant droit.

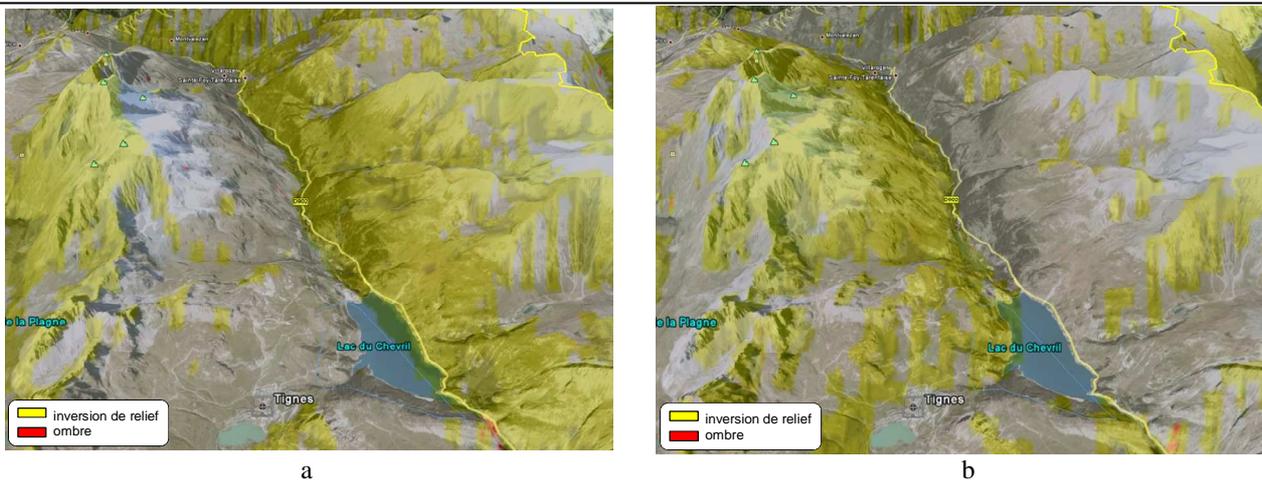


Figure 11: Distorsions géométriques inhérentes à la configuration d'acquisition dans le cas de l'observation de la zone d'intérêt en mode a) ascendant et b) descendant – Les zones d'inversion de relief et d'ombre sont codées en jaune et rouge, respectivement.

3.4.2 Archive de données satellitaires sur la zone

Des images ENVISAT ASAR acquises sur la zone d'intérêt entre 2004 et 2010 sont utilisées. Considérant le relief de la région, l'étude des déplacements sera basée sur deux analyses, à partir d'images acquises en orbites ascendante (étude du versant gauche) et descendante (étude du versant droit).

La figure 12 montre la couverture de la zone d'intérêt par les traces ascendant 301 et descendant 294 du capteur ENVISAT. Chaque image a une extension d'environ 100x100km.

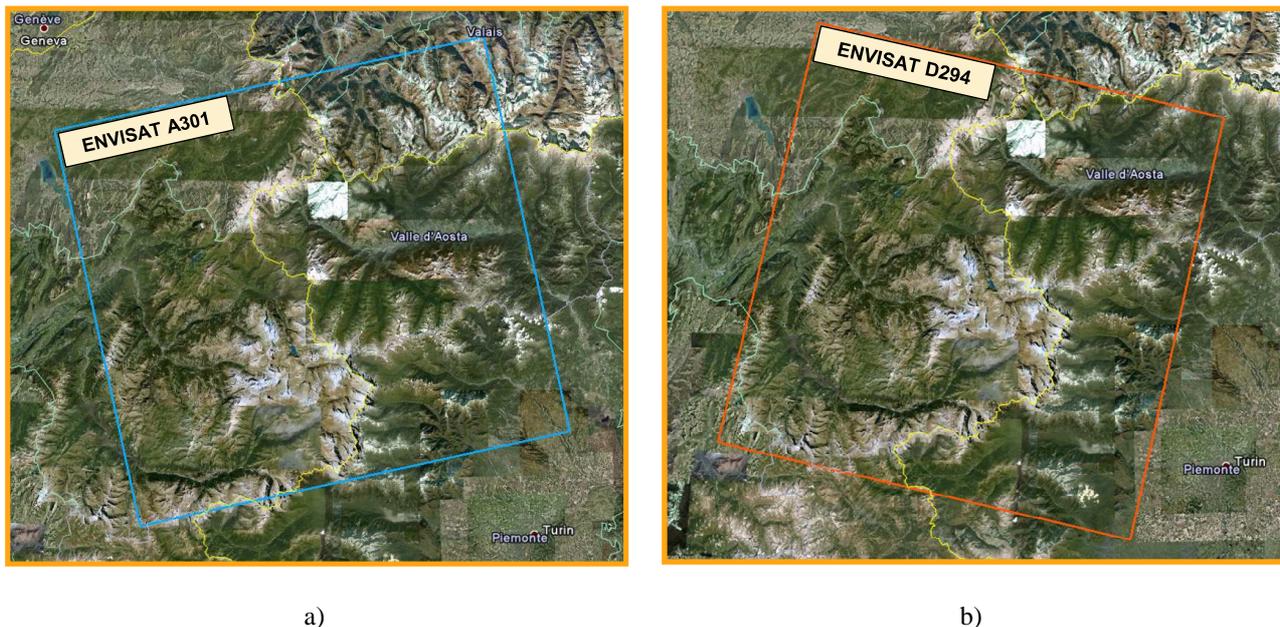


Figure 12 : Couverture de la zone d'intérêt en mode a) ascendant et b) descendant - © Google Earth 2011 pour l'image d'arrière plan

Les figures 13 et 14 montrent la distribution temporelle des images ENVISAT le long de la période considérée pour l'analyse. Quelles que soient les directions d'orbites considérées, afin de s'affranchir des perturbations du signal radar dues à la présence de neige, certaines scènes, correspondant principalement aux mois d'hiver, n'ont pas été considérées pour le traitement interférométrique ; cette précaution permet d'assurer la qualité du produit final.



Figure 13 : Distribution temporelle des images ENVISAT acquises en mode ascendant (orbite 301)



Figure 14 : Distribution temporelle des images ENVISAT acquises en mode descendant (orbite 294).

La période considérée pour l'analyse de la rive gauche s'étend de juin 2004 à décembre 2010 et de septembre 2004 à octobre 2010 pour la rive droite, recouvrant ainsi intégralement 6 années.

Compte tenu de la quantité d'images et des caractéristiques de la couverture du sol sur la zone d'intérêt, il a été décidé d'appliquer un traitement SPN avec un multi-vue spatial dans le cas des deux études. Ce type de traitement a été sélectionné en vue d'améliorer la sélection des zones au sol qui peuvent être exploitées comme points de mesure étant donné qu'elles présentent une réflectivité de bonne qualité et stable. La résolution spatiale est réduite par rapport à une analyse haute résolution, mais la qualité de phase est améliorée grâce à la réduction du bruit (obtenu grâce à la moyenne).

Les spécifications techniques des résultats du traitement SPN sont répertoriées dans le Tableau 3.

	Specs ENVISAT
Résolution spatiale	40 m
Précision planimétrique	1 m
Précision de la mesure de déplacement	3 mm/an
Précision absolue	5 mm

Tableau 3: Précision de la mesure de déplacement sur les rives gauche et droite du site d'intérêt

3.4.3 Résultats

La figure 15 montre la carte globale de déplacement moyen le long de la pente obtenue à partir du traitement SPN des images ENVISAT acquises selon les modes ascendant et descendant pour la période 2004 à 2010. Le système de coordonnées utilisé pour la production de la carte de mouvement est le Lambert zone III.

Les différents points de couleur correspondent à des cibles naturelles, qui ont une rétrodiffusion importante et constante sur la période d'étude considérée. Ces cibles ont été sélectionnées comme points de mesure (voir section 0) à partir de la stabilité de leur rétrodiffusion et de différents paramètres de qualité calculés durant le traitement. Ces points sont principalement localisés dans les infrastructures et sur les rochers qui constituent de bons réflecteurs au fil du temps. Peu d'entre eux sont situés dans les régions où la végétation est importante.

L'information sur la vitesse de glissement des PS est donnée en mm par an à partir de l'échelle variant du rouge au bleu, suivant l'orientation et l'intensité du mouvement. Les précisions altimétrique et planimétrique sont définies par le MNT SRTM et les caractéristiques des données SAR utilisées.

Le point de référence pour la mesure est directement sélectionné par le logiciel SPN. C'est un PS de bonne qualité, situé dans une région où plusieurs autres PS ont été détectés. Il est à noter que le même point de référence a été utilisé pour les deux traitements.

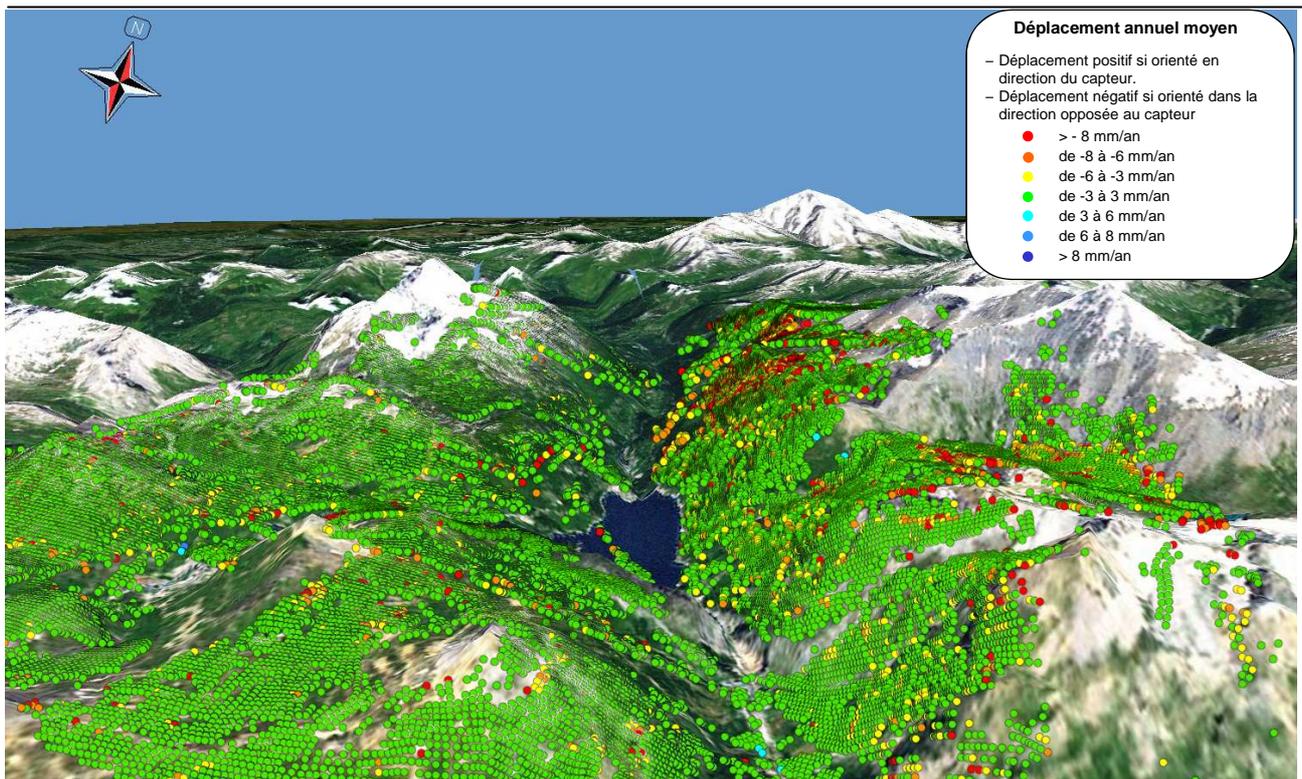


Figure 15: Carte de déplacement le long des versants gauche et droit générée à partir de l'étude de données ENVISAT acquises entre 2004 et 2010 - (Microsoft® Bing Maps collection utilisée pour l'image d'arrière plan)

Le **Tableau 4** donne une moyenne des performances du traitement SPN sur la zone. Il est cependant important de souligner que, du fait du relief et de la végétation, les points de mesure ne sont pas répartis de façon uniforme sur les zones d'analyse.

	Nombre de PS	Densité de PS
Versant gauche	29793	89 PS/Km ²
Versant droit	20613	61 PS/Km ²

Tableau 4: Densité de points de mesure détectés lors du traitement SPN des rives gauche et droite

29793 points de mesure ont été détectés sur le versant gauche à partir de l'étude des données en mode descendant. Les nombreux points verts sur cette rive indiquent une relative stabilité. Quelques régions de glissement de terrain sont néanmoins observables sur le graphique 13 (points jaunes, oranges et rouges).

Le résultat du traitement SPN de la rive gauche est résumé dans le Tableau 5; la répartition des taux de déplacement annuels des points de mesure sélectionnés est donnée.

	Taux de déplacement	Quantité de PS affectés
Déplacement négatif si orienté en direction opposée au radar	> -8 mm/an	418 (1.40 %)
	de -8 à -6 mm/an	317 (1.06 %)
	de -6 à -3 mm/an	1215 (4.08 %)
Stabilité	de -3 à +3 mm/an	27839 (93.44 %)
Déplacement positif si orienté en direction du radar	de +3 à +6 mm/an	2 (0.01 %)
	de +6 à +8 mm/an	1 (0.00 %)
	> +8 mm/an	1 (0.00 %)

Tableau 5: Récapitulatif du résultat du traitement SPN réalisé pour l'étude de la rive gauche

Sur la rive droite, 20613 points ont été détectés. La densité de points de mesure est plus faible que dans le cas de l'étude de la rive gauche, cette différence étant principalement due aux caractéristiques de la couverture de la rive droite qui présente des zones de végétation importantes et peu d'infrastructures.

La répartition des taux de déplacements annuels des points de mesure est donnée dans le Tableau 6 pour le cas de la rive droite. Elle montre ainsi des déplacements plus importants que sur la rive gauche. Le pourcentage de points ne subissant aucun glissement (points verts) est égal à 77% dans ce cas, alors qu'il était supérieur à 93% dans le cas de la rive opposée (Tableau 5).

	Taux de déplacement	Quantité de PS affectés
Déplacement négatif si orienté en direction opposée au radar	> -8 mm/an	1096 (5.32 %)
	de -8 à -6 mm/an	1000 (4.85 %)
	de -6 à -3 mm/an	2572 (12.48 %)
Stabilité	de -3 à +3 mm/an	15916 (77.20 %)
Déplacement positif si orienté en direction du radar	de +3 à +6 mm/an	29 (0.14 %)
	de +6 à +8 mm/an	0 (0.00 %)
	> +8 mm/an	0 (0.00 %)

Tableau 6: Récapitulatif du résultat du traitement SPN réalisé pour l'étude de la rive droite

Plusieurs régions affectées par des glissements de terrain de plus ou moins grande amplitude sont observables sur la rive droite. En particulier, la figure 16 est un agrandissement de la carte de déplacement le long du versant droit ; les nombreux points jaune, orange et rouge indiquent des zones de glissement de terrain de plus ou moins grande magnitude. Certains points subissant des glissement de plus de 1,8 cm/an ont ainsi été détectés.

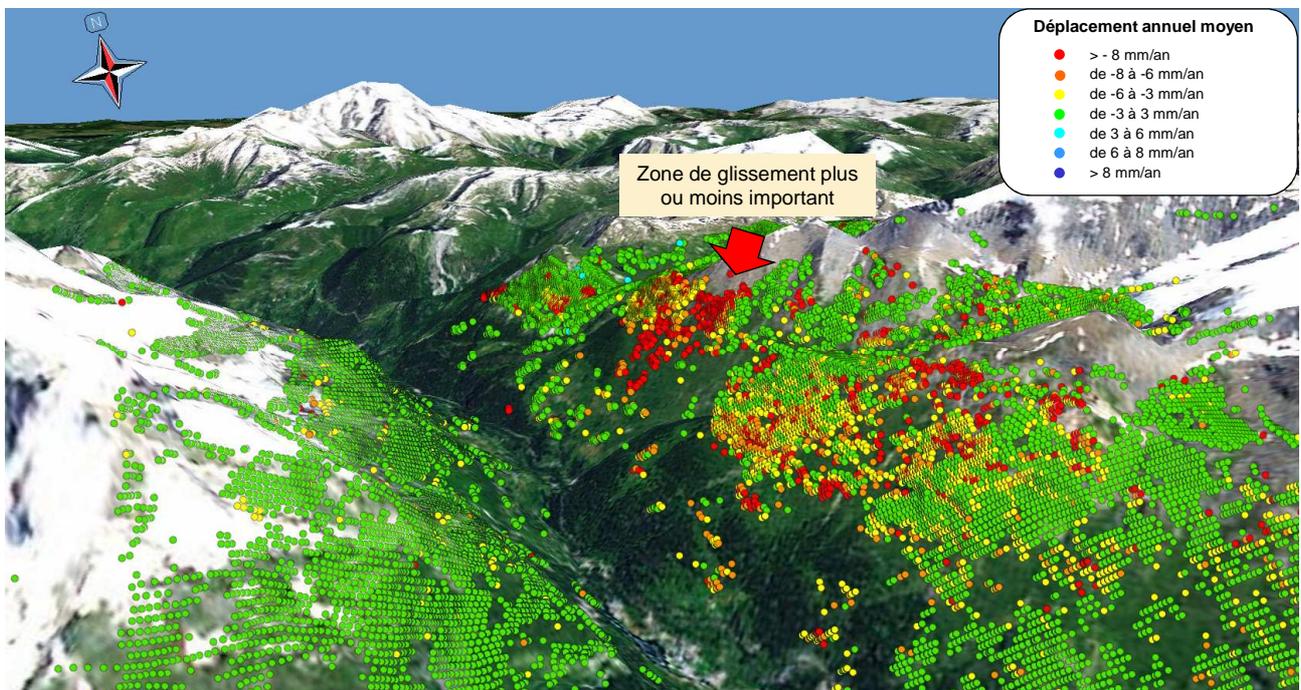


Figure 16 : Agrandissement de la carte de déplacement – plusieurs zones de glissement sont identifiables sur la rive droite

3.5 Conclusion de l'étude SPN

L'étude SPN, basée sur deux analyses indépendantes, a permis d'observer la totalité des versants, même dans les zones de fort relief, en compensant la perte d'information due aux distorsions géométriques par l'utilisation des deux modes d'acquisitions complémentaires.

La technique InSAR a permis d'identifier près de 55000 points de mesure sur l'ensemble de la zone d'intérêt et ainsi de produire une vision globale des déplacements des versants qui impactent les infrastructures EDF comprises entre le barrage de Tignes et la prise d'eau des Brévières. Malgré l'absence de point mesuré par la technique InSAR directement sur les ouvrages, les ordres de grandeurs des déplacements correspondent aux observations réalisées sur les dispositifs d'auscultation in situ. Les résultats sont cependant à prendre avec précaution puisque la majorité des points en déplacement sur la rive droite est située sur une zone de moraine, très susceptible de bouger, sur la partie supérieure du versant.

Les résultats de cette étude sont venus corroborer l'hypothèse d'un glissement de terrain de grande ampleur en rive droite et ont permis de confirmer la fixité globale de la rive gauche. Ils valident ainsi le diagnostic géologique établi.

L'analyse historique a ainsi démontré la pertinence de la méthode SPN ; une surveillance des versants et des différentes infrastructures pourrait être envisagée grâce aux missions SAR plus récentes. Les missions comme TerraSAR-X ou COSMO-SkyMed offrent des résolutions de 3 m, ce qui permettrait de densifier significativement les réseaux de mesure (de l'ordre d'un facteur 20) et de mettre en évidence des gradients de mouvements pour un suivi opérationnel. Ces missions, avec des périodes de re-visites de l'ordre d'une dizaine de jours, donnent aussi la possibilité de constituer en moins d'un an des jeux de données adéquats pour un traitement SPN, tout en réduisant les interruptions dues aux mois d'hiver.

3.6 Perspectives

L'interférométrie radar est une technique de mesure de déplacement bien adaptée à la mesure sur de très grandes surfaces. Très employée en géophysique et en prévention des risques naturels, elle est maintenant de plus en plus utilisée pour la surveillance, en particulier des « grands ouvrages », tels que des lignes de chemin de fer, des pipelines, des champs d'éoliennes... L'utilisation de points de mesures artificiels (coins réflecteurs) offre également des perspectives très intéressantes lorsque les points naturels font défaut ou lorsque l'on souhaite mesurer un déplacement à un endroit bien précis.

Son application à la surveillance opérationnelle des déplacements d'ouvrages hydrauliques nécessite aujourd'hui d'évaluer l'incertitude de mesure associée à cette chaîne de traitement particulière. Pour ce faire, une expérimentation est lancée sur le barrage de Puylaurent afin de quantifier la précision de cette technique et de travailler sur l'amélioration des algorithmes existants.

4. CONCLUSION

Ces deux expérimentations sur des cas concrets ouvrent des perspectives intéressantes pour la surveillance d'ouvrage. Comme pour toute technologie de mesure innovante, leur utilisation requiert une bonne maîtrise de l'ensemble de la chaîne d'acquisition et de traitement ainsi qu'une qualification de l'incertitude associée. Cette étape de validation avant mise en œuvre opérationnelle, parfois longue, reste incontournable.

D'autre part, concernant l'interprétation des mesures pour le diagnostic de comportement d'ouvrage, la définition du référentiel dans lequel les déplacements sont exprimés doit être sans ambiguïté et sa pérennité est indispensable.

REMERCIEMENTS

Guy D'Urso et Didier Boldo – EDF R&D.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Duro, J., Inglada, J., Closa, J., Adam, J. et Arnaud, A. (2003). High resolution differential interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data. FRINGE, 1-5 Décembre 2003.
- [2] Adam, N., Parizzi, A., Crosetto, M. (2009), Practical Persistent Scatterer Processing Validation in the Course of the Terrafirma Project. Journal of Applied Geophysics, vol. 69, pp.59-65.