

# Des preuves venues de l'espace

## Des missions inédites ont été confiées aux topographes lors du percement du tunnel du Katzenberg

■ Klaus HERRMANN - Version française : Olivier REIS

Le présent article est la traduction en français de la version originale parue en décembre 2009 dans la revue allemande "Der Eisenbahningenieur" (site Internet de l'éditeur : [www.eurailpress.de/ei](http://www.eurailpress.de/ei))

*L'éventail des tâches dévolues aux ingénieurs topographes s'est profondément et durablement modifié au cours des vingt dernières années. Le développement effréné des nouvelles technologies exige désormais d'eux qu'ils sachent faire preuve d'une grande souplesse et soient ouverts à l'innovation. A peine l'utilisation des systèmes mondiaux de satellites de navigation (GNSS) ou du balayage laser a-t-elle pris rang parmi les tâches topographiques standard qu'une nouvelle possibilité, plus renversante encore, s'esquisse déjà pour les géodésiens, à savoir le recours à la télédétection spatiale pour apporter la preuve d'un état de fait donné.*

*Le présent article est consacré à l'établissement des preuves attestant la stabilité d'une zone résidentielle potentiellement menacée par la construction du tunnel du Katzenberg, sur la ligne de la Deutsche Bahn Karlsruhe – Bâle. Des données satellite (figure 1) fournies par l'Agence spatiale européenne (ESA) servent à cerner le comportement antérieur (par une recherche dans le passé) du coteau de Bad Bellingen en termes de déformations avant le début des travaux de percement par des tunneliers. La méthode scientifique utilisée pour recueillir les données requises, l'interférométrie radar, est par ailleurs exposée.*

### ■ MOTS-CLÉS

Interférométrie RSO, interférogramme, images radar, séries temporelles.

### La méthode

La méthode désignée sous le nom d'interférométrie RSO (radar à synthèse d'ouverture) utilise des capteurs embarqués sur des satellites pour envoyer des impulsions radar vers la Terre. Les impulsions réfléchies par la surface terrestre sont reçues en retour par une ou plusieurs antennes qui permettent d'enregistrer le temps de parcours, la phase et l'intensité des signaux captés, informations à partir desquelles la distance séparant le point de réflexion d'un capteur donné peut être déterminée. Les longueurs d'onde des signaux utilisés peuvent varier de quelques centimètres à plusieurs mètres. Des images radar (figure 2) peuvent se déduire de la réunion de tous les échos récupérés par les capteurs. En interférométrie RSO, c'est la différence de phase entre deux enregistrements radar, réalisés depuis des positions légèrement décalées, qui est exploitée. Cette différence de phase entretient un lien direct avec la topographie et peut servir à générer des modèles numériques de terrain (MNT) à haute résolution. Si l'on compare des enregistrements réalisés à des échéances assez éloi-



Figure 1. Envisat – satellite environnemental de l'agence spatiale européenne (ESA).

gnées (méthode différentielle), de très faibles modifications de l'altitude, d'ordre subcentimétrique, peuvent être détectées.

La percée décisive, permettant d'utiliser des données de télédétection pour effectuer des mesures géodésiques précises, a été réalisée en 1995, lorsque les satellites ERS-1 et ERS-2, ayant chacun un radar à synthèse d'ou-

verture (RSO) à son bord, furent simultanément en orbite.

Dans le cas d'un système radar, l'ouverture désigne la surface de l'antenne capable d'émettre ou de recevoir des ondes électromagnétiques. La résolution géométrique atteignable par cette méthode est inversement proportionnelle à la taille de l'ouverture. Plus les dimensions géométriques de l'antenne

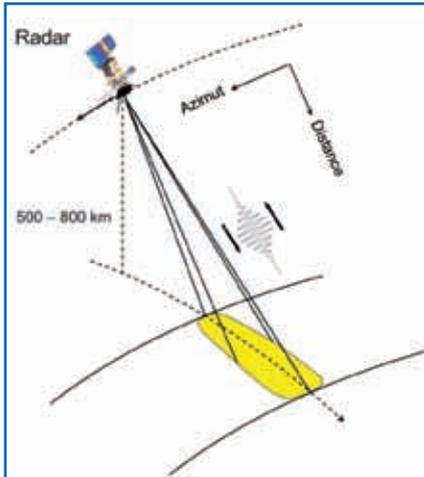


Figure 2. Principe de reproduction utilisé par un capteur radar.

▶ sont élevées par rapport à la longueur d'onde utilisée, plus la résolution angulaire est fine. Ainsi, si l'on désire représenter des objets au sol distants d'un mètre comme des points distincts sur une image, le pouvoir de résolution du capteur radar, c'est-à-dire sa sensibilité géométrique, doit être d'un mètre au moins. Il faudrait, pour y parvenir, disposer d'une antenne longue d'environ 15 kilomètres si la longueur d'onde utilisée était de quelques centimètres.

La longueur effective de l'antenne n'étant que de 5 mètres, on recourt à une astuce technique pour obtenir le même effet. Le principe de la synthèse d'ouverture consiste à remplacer l'enregistrement instantané d'une grande antenne par un nombre élevé d'enregistrements

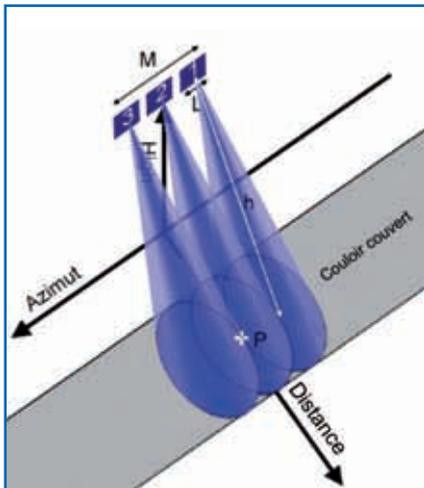


Figure 3. Radar à synthèse d'ouverture (RSO).

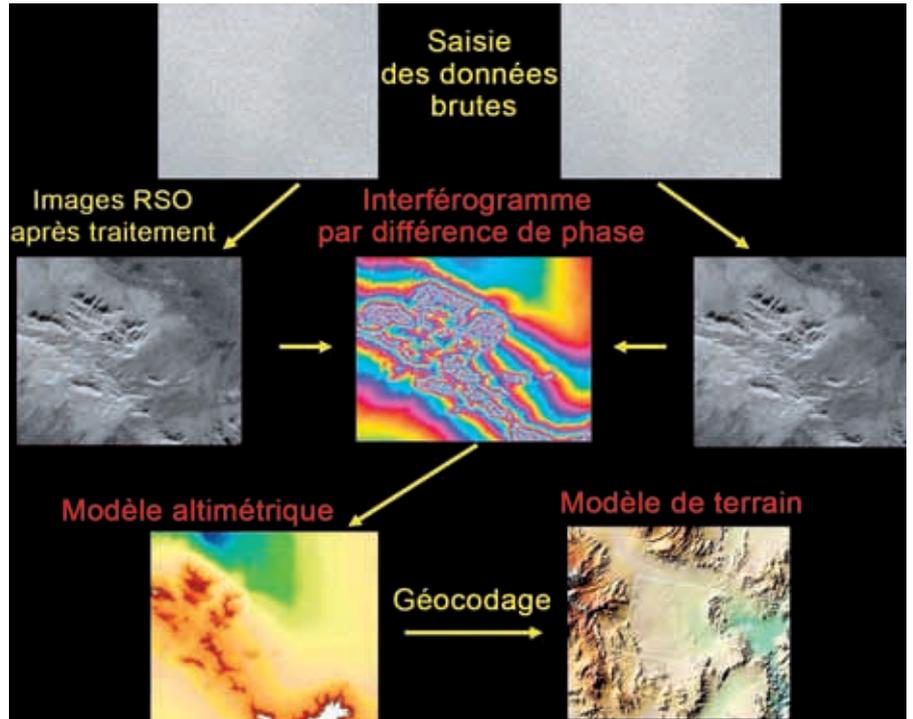


Figure 4. Obtention d'un modèle de terrain à partir d'un interférogramme.

recueillis par une petite antenne mobile. Ce faisant, chacun des objets de la zone cible est donc atteint par des ondes émises sous des angles qui varient au gré du déplacement de l'antenne de sorte que leurs échos sont enregistrés en conséquence (figure 3).

Si la trajectoire de l'antenne réelle est connue avec une précision suffisante, l'ouverture d'une grande antenne peut être synthétisée à partir de l'intensité et de la position en phase de l'écho radar reçu, si bien qu'une résolution locale élevée peut être obtenue dans

la direction du déplacement de l'antenne. Si l'on exploite la différence de phase entre deux enregistrements radar saisis depuis des positions légèrement différentes, il est possible d'en déduire ce que l'on appelle des interférogrammes (mesures de phases relatives), à partir desquels des modèles altimétriques ou des modèles tridimensionnels du terrain (MNT), géoréférencés de façon appropriée, peuvent à leur tour être générés (figure 4).

De tels modèles de terrain furent d'abord obtenus sur la base d'enre-

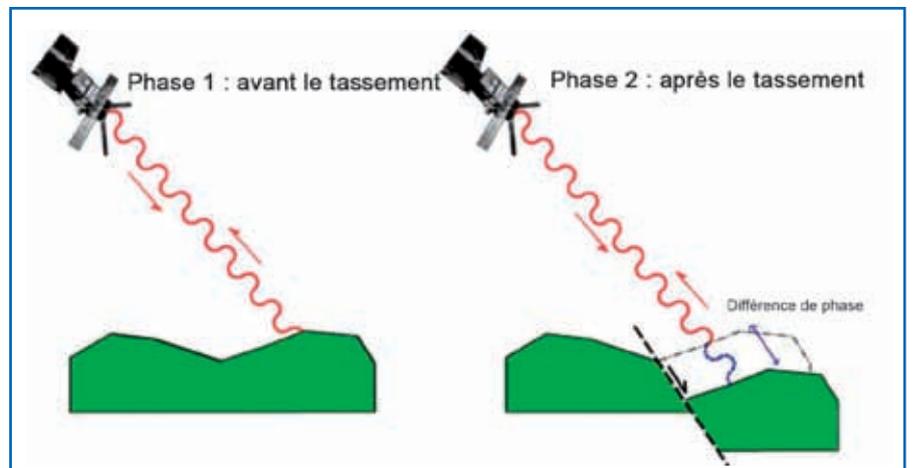


Figure 5. Interférométrie RSO différentielle - Comparaison d'images réalisées à des intervalles de temps très éloignés.



gistements décalés dans le temps, provenant des deux satellites ERS-1 et ERS-2, dont les orbites avaient été choisies de telle façon qu'ils survolent les mêmes portions de la surface terrestre. Après l'arrêt d'ERS-1, l'ESA a lancé le satellite environnemental le plus complexe conçu jusqu'alors, Envisat, mis en orbite le 1<sup>er</sup> mars 2002. Les perfectionnements apportés à son système RSO ont permis une hausse spectaculaire de la précision avec laquelle le terrain pouvait être cartographié. Si les deux images RSO interférométriques ne sont pas simultanées mais décalées d'une durée pouvant aller d'une journée à plusieurs années, des interférogrammes peuvent par ailleurs s'en déduire dans des conditions favorables, lorsque la décorrélation temporelle est faible. Ces interférogrammes reflètent non seulement la topographie, mais également l'ensemble des modifications d'importance survenues entre les deux dates, qu'il s'agisse des conditions de propagation des signaux dans l'ionosphère et la troposphère ou de mouvements de la surface terrestre et des objets qu'elle porte (figure 5). L'utilisation de plus de deux images RSO permet de séparer les mouvements et l'influence de la topographie. Ces méthodes dites d'interférométrie différentielle servent à surveiller l'écoulement de glaciers, une activité volcanique, des déformations dues à des secousses sismiques ou des glissements de terrain, cas de l'exemple décrit ici, à savoir la construction du tunnel du Katzenberg.

## Le projet

La ligne de chemin de fer reliant Karlsruhe à Bâle, une liaison d'importance nationale et internationale pour le transport de personnes et de marchandises, constitue un axe essentiel du réseau ferré européen. Le passage à quatre voies de cette ligne dite de la vallée du Rhin présente également un intérêt particulier dans l'optique des nouvelles lignes ferroviaires à travers les Alpes (NLFA) actuellement en construction en Suisse puisqu'elle en constitue le prolongement nord. Les tronçons nord

entre Rastatt sud et Offenburg sont déjà en service tandis que les procédures d'approbation des plans viennent à peine d'être lancées pour les tronçons sud entre Offenburg et Bâle, exception faite de la portion Schliengen-Eimeldingen pour laquelle les plans ont été approuvés dès la fin 2002. Cette zone comprend l'ouvrage le plus important de la ligne, le tunnel du Katzenberg long de 9,4 kilomètres. Des portails nord situés à Bad Bellingen, l'ouvrage, qui comporte deux galeries à voie unique, traverse les collines du "Markgräfler Land" en ligne droite pour déboucher au sud sur le territoire de la commune d'Efringen-Kirchen (figure 6). Les deux galeries principales, forées pour l'essentiel par des tunneliers, donc par des méthodes minières, sont reliées entre elles par des galeries transversales tous les 500 mètres. Le chantier a débuté au portail sud en novembre 2003 et le percement des deux galeries s'est achevé en octobre 2007.

## La mission confiée

Une zone résidentielle située à Bad Bellingen posait un problème spécifique dans l'optique du percement du



Figure 6. Le tunnel du Katzenberg (rouge) et la ligne existante de la vallée du Rhin (bleu).

tunnel du Katzenberg du fait de son classement comme secteur présentant un fort risque de glissement de terrain par les géologues compétents. Foré à une profondeur moyenne de 25 mètres dans cette zone, le tunnel générerait des risques sur l'ampleur desquels les divers experts mandatés ne sont pas parvenus à s'accorder. Outre la saisie classique de données géotechniques par des inclinomètres, des détecteurs de glissements et leur accompagnement par un levé terrestre, des informations concernant des tassements ou des glissements antérieurs devaient également être recueillies et évaluées. Les topographes se sont pour cela tournés vers l'interférométrie RSO précédemment décrite, une méthode qui a très probablement été utilisée sous cette forme pour la toute première fois par la Deutsche Bahn AG dans le cadre d'un projet concret.

## La solution

Dans le cas qui nous occupe, des données des satellites ERS 1, ERS 2 et Envisat ont été utilisées. En temps normal, une même zone est enregistrée une fois par mois au moins, de sorte qu'une analyse rétrospective des mouvements de surface est possible. Les satellites cités fournissent des données saisies sans interruption depuis de nombreuses années. En conséquence, des effets géophysiques très lents peuvent être détectés sur la surface terrestre et les causes d'affaissements passés inaperçus jusqu'alors peuvent encore être décelées des années plus tard. Les images radar reproduisent la surface terrestre indépendamment de la couverture nuageuse et de l'heure d'enregistrement, si bien que les informations qu'elles fournissent sont toujours utilisables dans leur intégralité.

Un total de 59 images radar à haute résolution prises entre 1995 et 2006 et couvrant le périmètre du tunnel du Katzenberg a été acquis auprès de l'ESA puis exploité. L'utilisation d'un nombre d'images aussi élevé a permis d'éliminer très largement les influences atmosphériques perturbatrices les plus problématiques par l'analyse de séries



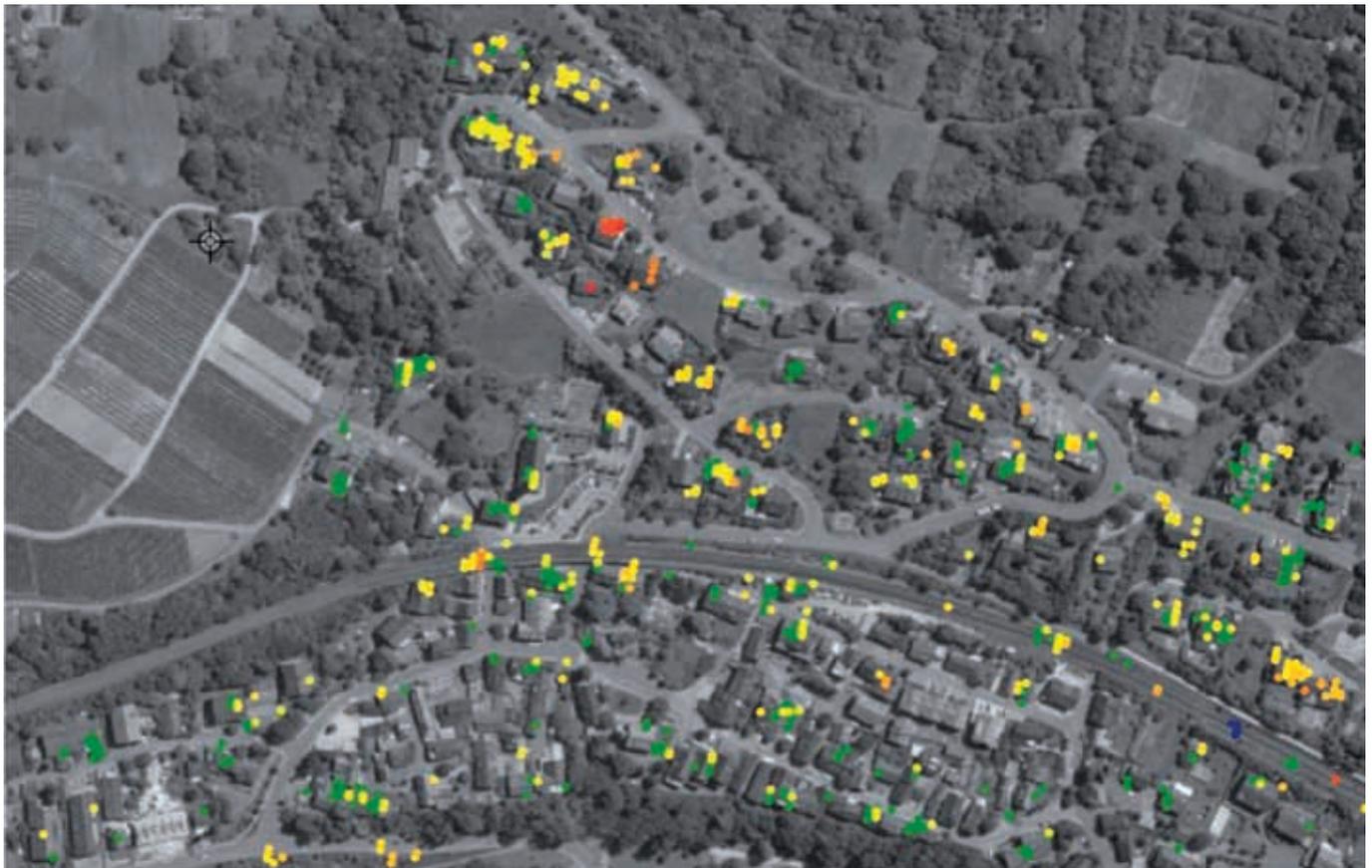


Figure 7. Interférogramme de Bad Bellingen avec diffuseurs permanents.

temporelles. Cette méthode suppose toutefois que la microstructure des objets ne se soit pas modifiée durant la période d'observation considérée, les valeurs de phase étant sinon décorrélées et ne portant plus aucune information. Prenons un exemple : si un champ est labouré ou si la croissance de la végétation est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du radar, la zone concernée présente un tout autre visage pour le RSO et ne peut plus faire l'objet d'une comparaison interférométrique avec l'état antérieur. Plus l'intervalle de temps entre deux enregistrements radar est élevé, plus il devient difficile d'en déduire des différences de phases interprétables. C'est pourquoi la méthode dite du diffuseur permanent (*Permanent Scatterer Method*) a été mise en œuvre pour exploiter des mesures interférométriques de mouvements du sol réalisées sur des séries temporelles aussi longues que possible. Le problème de cohérence posé par l'exploitation interférométrique est ainsi contourné, puisque ce sont les mouvements de

ces diffuseurs permanents, identifiables par des méthodes statistiques, qui sont mesurés.

Dans le secteur de Bad Bellingen qui nous intéresse, près de 1300 points de mesure de ce type (des bâtiments, des toits ou encore des pylônes réfléchissant le signal radar avec une intensité suffisante sur tous les enregistrements RSO, cf. figure 7) ont été déterminés, de sorte que la zone critique située à proximité du tracé du tunnel a pu être couverte à près de 90 %. Le résultat

obtenu a été présenté sur des cartes de tassements et des profils de points isolés. Un tassement global de 4,2 cm (valeur maximale) a été mis en évidence pour les bâtiments concernés sur la période de dix ans retenue, un tassement de 1,0 à 2,5 mm/an ayant été constaté pour la majorité d'entre eux (figure 8).

Ces résultats concordaient parfaitement avec les quelques données ponctuelles livrées par les mesures géotechniques. La faible ampleur de ces déformations

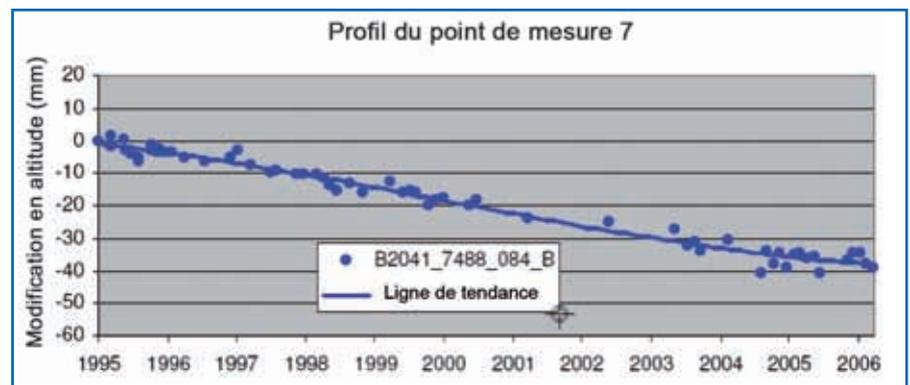


Figure 8. Exploitation d'un point isolé sur une période de dix ans.

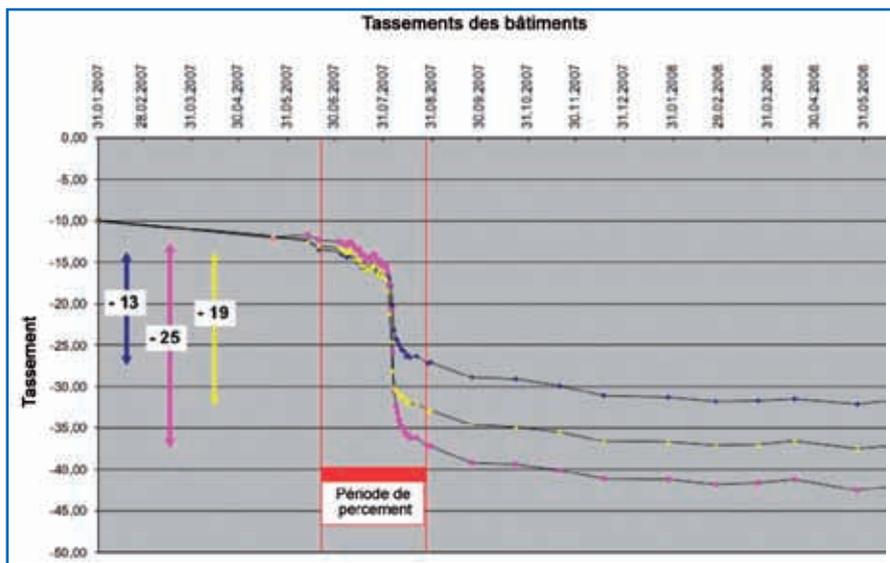


Figure 9. Diagramme des tassements – Le rythme de déformation avant et après le percement est le même.

est venue étayer la décision prise par l'entreprise de ne prévoir aucune mesure de consolidation du versant, mais de conduire le percement du coteau de Bad Bellingen par le tunnelier sur la base des observations effectuées. Un système de géomonitorage composé de six tachéomètres automatisés et d'autres capteurs géotechniques a été mis en place dans cette perspective. Il permet la saisie automatique à intervalles d'une demi-heure puis l'exploitation dans la foulée de toutes les données de déformation, durant le percement des galeries par les tunneliers et au terme de celui-ci (cf. *Der Eisenbahningenieur* 12/2008).

Les mesures ont été maintenues jusqu'à ce que les tassements inhérents aux travaux se soient amenuisés (figure 9). Pour l'Office fédéral des chemins de fer (EBA, Eisenbahn-Bundesamt), autorité de surveillance compétente en la matière, il importait avant tout d'établir la preuve que les déformations permanentes du coteau de Bad Bellingen avaient retrouvé le rythme qui était le leur avant la construction du tunnel. A cette fin, les résultats des recherches portant sur un passé récent, conduites par interférométrie RSO, ont été comparés aux données issues du géomonitorage. Huit mois après l'achèvement du tunnel du Katzenberg, l'EBA a donné son aval au retrait des tachéomètres et par suite, à l'arrêt des mesures géodésiques.

### En résumé

L'avantage de la méthode réside dans la surveillance d'ensemble de zones de déformation très vastes. Les images satellite utilisées couvrent chacune une étendue d'environ 100 x 100 km. Une appréciation qualitative des déformations constatées est toujours possible et sert à optimiser le programme de mesures géodésiques conventionnel afin de mettre en place un dispositif bien ciblé ou de réduire l'ampleur de celui envisagé pour les mesures terrestres. La rentabilité en comparaison de méthodes traditionnelles dépend en premier lieu des dimensions du territoire à surveiller et des dispositifs de mesure mis en œuvre en son absence. Le potentiel d'économies le plus intéressant concerne assurément les zones de déformation très étendues.

Dans le cas des chemins de fer, il serait envisageable de surveiller à l'avenir les déformations du corps de voie des lignes à grande vitesse. Avec l'entrée en service des satellites TerraSAR-X (en 2007), à la résolution géométrique élevée (1 x 1 m), et TanDEM-X, un autre satellite de même conception lancé en juin 2010, des données encore plus précises sont désormais à disposition, pour une saisie encore plus fine des mouvements du sol et de leur incidence sur les bâtiments et les infrastructures qu'il supporte. ●

### Contact

**Klaus HERRMANN**  
ingénieur diplômé - DB ProjektBau GmbH  
klaus.herrmann@deutschebahn.com

### Bibliographie

- DB ProjektBau GmbH : "Aus- und Neubaustrecke Karlsruhe – Basel"
- Penn S.** Der Katzenbergtunnel auf der Ausbau und Neubaustrecke Karlsruhe – Basel.
- Bammler R., Adam N., Hinz S., Eineder M.** "SAR-Interferometrie für geodätische Anwendungen"
- Portail ESA** (European Space Agency) "Lokale Nachrichten Deutschland".
- AMEC Earth and Environmental GmbH, rapport de projet : "Satellitengestützte Messung von Bewegungen der Erdoberfläche im Zusammenhang mit dem Neubau der Bahntrasse Karlsruhe – Basel".

### ABSTRACT

Gathering evidence from space

*There has been a lasting shift in the range of tasks performed by land surveyors over the last 20 years. The rapid development of new technologies calls for geodesists that are flexible and open to innovations. While the use of global navigation satellite systems (GNSS) or laser scanning has only just recently become an established part of standard surveying practice, an astounding new way of using remote sensing satellite data for purposes of gathering evidence is now emerging on the geodesists' horizon. The article looks at evidence gathering for an at-risk residential area in connection with the construction of the Katzenberg tunnel on the Deutsche Bahn railway line from Karlsruhe to Basel. Based on satellite data from the ESA (European Space Agency), it describes the deformation behaviour of the hillside at Bad Bellingen prior to being undercut by the tunnel boring machines (TBMs) and the scientific method used to gather data, known as radar interferometry.*