

# Un siècle de contributions de la géodésie à la sécurité des barrages en Suisse

Il y a tout juste un siècle, des spécialistes se lancèrent dans la surveillance géodésique des barrages en Suisse, afin d'assurer, à titre préventif, la sécurité des infrastructures et surtout des populations vivant en aval. Un groupe de travail de la Société pour l'histoire de la géodésie en Suisse (SHGS) s'est penché sur la genèse et le développement de ces mesures de surveillance. Il a rédigé un rapport très fouillé, disponible sur le portail Internet de la Société à l'adresse [www.gggs.ch](http://www.gggs.ch), et enrichi par une bibliographie très fournie. La présente version abrégée décrit l'arrière-plan historique de la mensuration des barrages en Suisse, retrace brièvement l'évolution des méthodes et des instruments de cette surveillance géodésique et évoque enfin les technologies modernes avant d'esquisser quelques perspectives d'avenir.

*Cent'anni fa in Svizzera, gli specialisti iniziavano la sorveglianza geodetica delle dighe con lo scopo di proteggere preventivamente la popolazione e le infrastrutture vulnerabili situate a valle. Un gruppo di lavoro della Società per la Storia della Geodesia in Svizzera (SSGS/GGGS in tedesco) presenta in un rapporto, disponibile sul sito internet [www.gggs.ch](http://www.gggs.ch), insieme a una bibliografia completa, le origini e lo sviluppo di queste misure di sorveglianza. Il seguente riassunto descrive il contesto storico della misurazione delle dighe in Svizzera, fornisce una panoramica sullo sviluppo metodologico e strumentale della misurazione geodetica e illustra le tecnologie moderne e i possibili sviluppi.*

A. Wiget, B. Sievers, R. Huser, U. Federer

### Missions et objectifs

Selon les directives élaborées par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) en sa qualité d'autorité fédérale compétente en la matière en Suisse, avec le concours d'organisations spécialisées, dont le Comité suisse des barrages (CSB), les mesures géodésiques font partie intégrante de la surveillance de tels ouvrages. Associées à d'autres moyens de mesure des déplacements, elles contribuent à :

- l'évaluation du comportement du barrage dans le cadre du suivi courant des sollicitations et de l'état de l'ouvrage d'accumulation;
- l'appréciation rapide en cas de circonstances exceptionnelles ou suite à un événement extraordinaire;
- la clarification des causes d'anomalies détectées par les autres instruments de mesure.

### Mesures géodésiques de déformation sur les barrages, de 1921 à 1945

Les Entreprises électriques fribourgeoises construisirent le barrage de *Montsalvens* sur la Jogne, au-dessus de Broc (FR), entre 1919 et 1921. Il s'agissait du premier barrage-voûte à double courbure (horizontale et verticale) en Europe et du haut de ses 55 m, du premier barrage à dépasser la hauteur de 30 m en Suisse. Si l'on se contentait auparavant, pour des ouvrages de moindre envergure, de surveiller le milieu du couronnement du barrage au moyen d'alignements, on désirait cette fois-ci, vu l'ampleur de la construction, saisir les déformations de l'ouvrage en un certain nombre de points à sa surface. C'était une première. La précision et la fiabilité des alignements étaient par ailleurs restreintes par des phénomènes de réfraction et par l'absence de contrôle des piliers d'observation. L'ingénieur H. Zölly,

chef de la Géodésie au sein du Service topographique fédéral (S+T, aujourd'hui swisstopo), proposa donc de recourir aux méthodes trigonométriques de la mensuration nationale. Les cibles (chevilles) fixées sur la face externe du barrage furent ainsi mesurées depuis deux piliers situés en dehors du périmètre de l'ouvrage, au moyen d'intersections de directions répétées (fig. 1). Les premières mesures eurent lieu en deux étapes: avant la mise en eau, entre le 4 et le 7 janvier 1921, puis avec la hauteur d'eau maximale, du 28 novembre au 1<sup>er</sup> décembre 1921.

La méthode trigonométrique fut à nouveau utilisée en juillet 1922, sur le barrage-voûte de *Pfaffensprung* (UR) des Chemins de fer fédéraux suisses CFF, lors de son remplissage (Abb. 1 – version allemande). Pour permettre un suivi au plus près des mouvements des parois, aussi bien lors de la mise en eau que lors de la vidange de la retenue, deux observateurs mesuraient simultanément les chevilles qui y étaient fixées depuis deux piliers et leur position était déterminée par une intersection de directions.

Les accidents survenus sur des barrages à l'étranger troublèrent de larges franges de la population, inquiètes de la sécurité de tels ouvrages. La construction de retenues de plus en plus hautes conduisit par ailleurs les autorités et les exploitants de ces ouvrages à faire procéder à des mesures géodésiques de déformation pour contrôler leur comportement élastique. C'est ainsi que la société AG Kraftwerk Wägital mandata le S+T au début des années 1920, en tant que «service officiel neutre», pour qu'il contrôle les déformations des barrages de *Rempfen* (SZ) et de *Schräh* (SZ, Abb. 2; barrage-poids le plus haut du monde jusqu'en 1930 avec ses 111 m), au moyen de mesures trigonométriques et de nivellement.

### Méthodes de mesure trigonométriques appliquées aux barrages

Les ingénieurs du S+T adaptèrent les méthodes trigonométriques à l'auscultation des barrages en y intégrant des mesures de directions et d'angles (triangulation), des intersections et des relève-

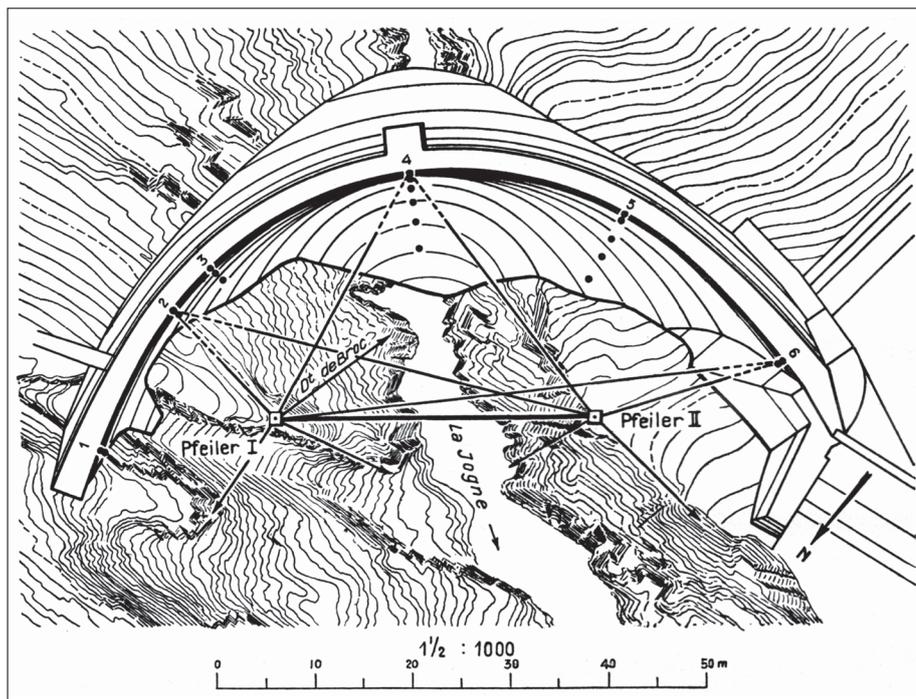


Fig. 1: plan du réseau des premières mesures géodésiques de déformation réalisées en 1921 sur le barrage de «Montsalvens» (Lang 1929).

ments ainsi que des nivellements de précision, sur la base de l'expérience acquise dans le cadre de la mensuration nationale. Le S+T participa, par des conseils ou par des mesures, à la construction de la quasi-totalité des barrages d'une hauteur de retenue supérieure à 20 m érigés en Suisse entre 1920 et 1940, à savoir les ouvrages des CFF de *Piora* (Ritom TI), *Barberine* (VS, fig. 2) et *Les Marécottes* (VS), *l'Illsee* (VS) de la société Illsee-Turtmannwerke, la centrale hydroélectrique de *Wettingen* (AG) et les barrages de *Seeuferegg*, *Gelmer* et *Spitalamm* (BE) de l'entreprise Kraftwerke Oberhasli AG. Le dernier nommé fut du reste le premier ouvrage dont les déformations furent suivies dès le stade de l'exécution des travaux. Comme bon nombre des barrages précités, ceux de *Garichte* (GL) de la société Kraftwerke Sernf-Niedererbach AG et d'*In den Schlagen* au Sihlsee (SZ) de la société Etzelwerk AG furent surveillés de leur construction à 2020 par le S+T/swisstopo au moyen de mesures géodésiques de déformation. La méthode géodésique fut constamment perfectionnée par les ingénieurs du S+T, tant en ce qui concerne l'établisse-

ment du réseau que sa matérialisation ou le parc d'instruments. Outre des améliorations apportées à ces derniers, donc aux théodolites de précision, aux niveaux et aux mires en Invar associées, des développements spécifiques furent aussi entrepris pour les applications de haute précision de géodésie d'ingénieur, en matière de centrage forcé et de cibles ou de voyants. Le S+T mena ici ses propres investigations, relatives par exemple à l'épaisseur optimale des fils de la lunette ou à la présentation des cibles et des chevilles ainsi qu'à leur fixation sur la paroi du barrage ou dans la roche. Il col-



Fig. 2: observation avec un théodolite Hildebrand à un axe, réseau de «Barberine» (Lang 1929).

labora étroitement avec les fabricants d'instruments, notamment avec les entreprises Max Hildebrand GmbH, Freiberg en Saxe, Kern & Co. AG à Aarau et Wild Heerbrugg AG. La société Haag-Streit AG, ateliers de mécanique de précision à Berne, fabriqua des chevilles et des cibles spéciales pour les travaux sur les barrages, conformément aux indications du S+T. Certaines d'entre elles constituèrent des pièces uniques, réalisées pour des distances données.

La géodésie permit de déterminer les déformations dans l'espace des ouvrages dès leur mise en eau, ce qui intéressait tout particulièrement leurs constructeurs. De manière générale, les barrages présentaient des déformations supérieures, à cette occasion, aux prévisions de la théorie à l'époque et elles ne se résorbaient que partiellement lorsque le niveau d'eau baissait. Les déformations de nombreux ouvrages furent ensuite examinées au gré des remplissages et des vidanges successifs des retenues jusqu'à atteindre le niveau d'élasticité (quasiment) final. Ce n'est qu'à ce stade que les mesures périodiques de contrôle à long terme purent prendre place. Le grand avantage de la surveillance géodésique, c'est que ses méthodes, de l'établissement du réseau jusqu'à l'exploitation des données en passant par les instruments, la signalisation et l'exécution des mesures, peuvent être adaptées avec une certaine souplesse à la situation rencontrée, qu'il s'agisse du type de barrage concerné ou des conditions locales. Les méthodes géodésiques permettent en outre de saisir d'éventuels mouvements du socle rocheux et des alentours du barrage.

#### Documentation et échange d'expériences

Dans son article intitulé «Trigonometrische Beobachtung der elastischen Deformationen der Staumauer am Pfaffensprung des Kraftwerkes Amsteg der SBB» (*Observation trigonométrique des déformations élastiques du barrage de Pfaffensprung, usine hydroélectrique d'Amsteg des CFF*), le S+T rendit compte des mesures réalisées, des expériences acquises et des ré-

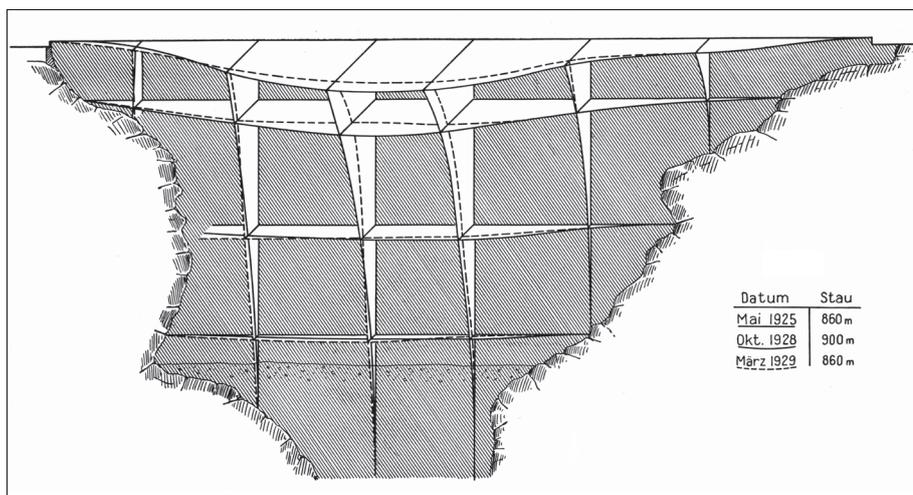


Fig. 3: vue en perspective des déformations du barrage de «Schräh» avec l'hypothèse d'une paroi verticale plane lors de sa mise en eau en mai 1925 (Lang 1929).

sultats obtenus. L'article fut publié en 1923 dans la Revue technique suisse des mensurations et améliorations foncières (aujourd'hui Géomatique Suisse) et dans la Revue polytechnique suisse (aujourd'hui TEC21). C'est de manière encore plus détaillée et avec un grand souci des aspects pratiques que l'ingénieur W. Lang décrit la méthode et le dispositif des mesures trigonométriques de déformation, la matérialisation des piliers et des chevilles, l'instrumentation ainsi que l'exploitation et la discussion des résultats des observations dans l'ouvrage publié en 1929 par le S+T intitulé «Deformationsmessungen an Staumauern nach den Methoden der Geodäsie» (*Mesures de déformation de barrages utilisant les méthodes de la géodésie*, Lang 1929). Il exposait aussi avec soin la méthode d'analyse des points fixes et des éventuels mouvements des alentours du barrage et documentait les déformations et les déplacements par des représentations très parlantes (Abb. 3/fig. 3).

L'ouvrage suscita un vif intérêt dans les domaines du génie civil et de la géologie et fut cité dans des revues spécialisées. Également saluées dans les pays voisins et en Amérique du Nord, les publications du S+T furent même imitées pour partie. Sur recommandation de l'Elektrobank de Zurich (qui devint Elektrowatt AG par la suite), il fut du reste fait appel à des ingé-

nieurs du S+T en Espagne entre 1929 et 1937, afin qu'ils dispensent des conseils, procèdent à des mesures géodésiques de déformation sur trois barrages et les exploitent. A partir des années 1930, il fut aussi possible d'échanger des connaissances et des expériences lors des congrès de la Commission internationale des grands barrages (CIGB) ou lors des journées d'étude organisées par la Commis-

sion suisse des barrages fondée en 1930, puis étendue en 1948 pour devenir le Comité national suisse des grands barrages (CNSGB) rebaptisé en Comité suisse des barrages (CSB) en 1988.

Le groupe de travail Surveillance des barrages du CSB élabora quant à lui des recommandations en faveur du recours aux mesures géodésiques de déformation pour les ouvrages d'accumulation. Elles fournissent des informations de base complètes en matière d'exigences envers les concepts et les dispositifs de mesure, d'exécution et d'exploitation des mesures géodésiques, d'interprétation et de documentation des résultats des mesures, archivage compris. Les rapports sont consultables sur le site Internet [www.swissdams.ch](http://www.swissdams.ch), au même titre que d'autres informations.

## Les années fastes, de 1945 à 1980

Après la Seconde Guerre mondiale, notamment entre 1955 et 1969, la construction de barrages connut une période faste en Suisse, due au boom de l'hydroélectricité et marquée par quelques réalisations

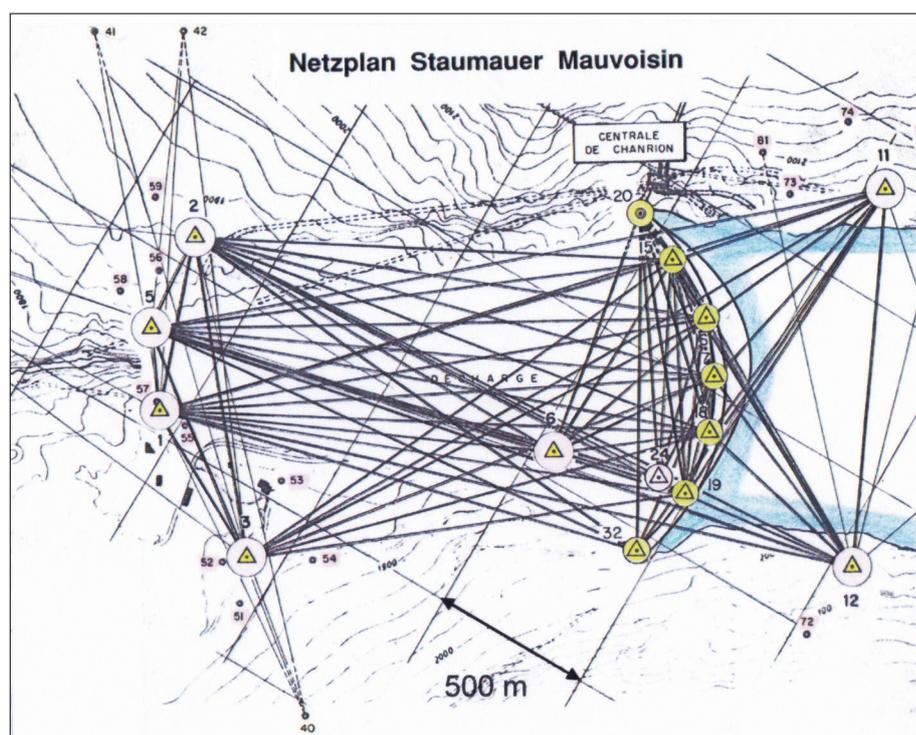


Fig. 4: plan du réseau du barrage de «Mauvoisin» (2005) (© Pöyry Suisse SA).

audacieuses. Du fait de la qualité généralement bonne de la roche dans les Alpes, on construisit essentiellement des barrages-voûtes ou des barrages-poids voûtes dans ces années-là, comme l'ample barrage-voûte de *Rossens* (FR) sur la Sarine, achevé en 1948. A titre d'exemples on citera aussi le barrage de *Mauvoisin* (VS, fig. 4), plus grand barrage-voûte au monde lors de sa mise en service en 1957, et le barrage-poids de la *Grande Dixence* (VS), achevé en 1961, qui resta le plus élevé du genre dans le monde jusqu'en 1980. Les premières grandes centrales de pompage-turbinage entrèrent en service dans les années 1970, éventuellement après transformation, cas par exemple de *Robiei-Naret/Cavagnoli* (Officine Idroelettrica della Maggia SA), *Mapragg-Gigerwald* (Kraftwerke Sarganserland AG) ou *Grimselfsee-Oberaarsee* (Kraftwerke Oberhasli AG).

## Poursuite du développement des méthodes de mesure et d'exploitation

A cette époque, les méthodes de surveillance des barrages et, de manière plus générale, des grands ouvrages tels que les ponts et les tunnels faisaient l'objet d'études scientifiques et de développements complémentaires, menés au sein de diverses écoles polytechniques en Suisse et à l'étranger; il en allait de même des méthodes géodésiques, étudiées en Suisse aux Instituts de géodésie et de photogrammétrie (IGP) des Ecoles polytechniques fédérales, à Zurich (EPFZ) et à Lausanne (EPUL/EPFL).

En 1947, F. Kobold, ingénieur en activité depuis 1932 au sein du S+T où il participa à des mesures de déformations sur des barrages, fut nommé professeur de géodésie et de topographie à l'EPF Zurich. C'est donc fort de son expérience en la matière et de son attachement à cette thématique qu'il arriva à l'IGP. Le professeur W. K. Bachmann entreprit quant à lui de poursuivre le développement des méthodes et des instruments à l'EPUL/EPFL pour les mesures géodésiques de déformation. Et pour garantir le lien avec la pratique, l'Institut de photogrammétrie

et de géodésie de l'EPFL réalisa de telles mesures sur le barrage du *Châtelot* à partir de 1952 ainsi que sur le barrage de *Mauvoisin* à partir de 1954.

Les deux instituts et les professeurs à leur tête collaborèrent à nouveau étroitement avec les fabricants suisses d'instruments géodésiques, Kern & Co. AG Aarau et Wild Heerbrugg AG. A titre d'exemple de développement complémentaire réalisé à cette époque, on citera ici les améliorations apportées aux dispositifs de centrage (utilisation de sphères, de plaques de base sur les piliers) permettant une mise en station de l'instrument avec une précision de quelques dixièmes de millimètres (Abb. 4/5). Les centrages forcés influaient fortement sur la précision, aussi bien pour les cheminements polygonaux que pour leur rattachement à la triangulation. Dans les années 1970, les sociétés suisses Wild et Kern poursuivirent le développement de leurs théodolites de précision mécaniques, en améliorant leur précision de mesure ainsi que leur confort d'utilisation (grâce, par exemple, à une meilleure optique de la lunette et à la lecture diamétrale du cercle avec un micromètre).

Si l'on s'intéressait tant aux méthodes de mesure ainsi perfectionnées, c'est surtout parce que les nouveaux barrages étaient plus grands, requérant des visées plus longues (portées de 500 m voire davantage). Du reste, la surveillance ultérieure était prise en compte de plus en plus tôt, dès le stade de la conception des nouveaux ouvrages, et intégrée dans les projets. Les concepts de surveillance des barrages existants et à venir furent étendus, les méthodes d'observation géodésiques furent améliorées et adaptées à l'ampleur des ouvrages. Outre les méthodes de la mensuration nationale, d'autres techniques de mensuration, des procédés géophysiques ainsi que des instruments propres à la géotechnique et à la mécanique des roches furent combinés à la géodésie, principalement à l'intérieur des barrages. Des alignements par fil et des cheminements de précision furent ainsi mesurés dans les galeries de contrôle, les points de référence des pendules y étant

rattachés, soit par la mesure directe des fils à plomb, soit via des points de contrôle très proches des dispositifs de suspension ou de lecture de ces équipements.

Les nouvelles méthodes de mesure de distances revêtaient également de l'intérêt pour les cheminements polygonaux. A partir des années 1950, leurs côtés étaient mesurés à l'aide de rubans ou de fils d'Invar (Abb. 6), à l'aide desquels un écart-type de 0,07 mm pouvait être atteint dans les galeries de contrôle des ouvrages. Des instruments servant à mesurer très précisément des modifications de distances au moyen de fils d'Invar furent développés à l'ETHZ et au CERN (Distometer ISETH et Distinvar).

A partir des années 1970, les réseaux géodésiques furent étendus et renforcés par des mesures électroniques des distances (MED). Avec le Mékomètre ME3000 Kern (fig. 5), elles atteignaient une précision de niveau submillimétrique, compatible avec une utilisation pour les mesures de déformation de haute précision. Les mesures de distances permirent d'étendre les réseaux en amont et en aval du barrage, sans charge de travail excessive, avec des points de référence et de contrôle supplémentaires (Abb. 7). La

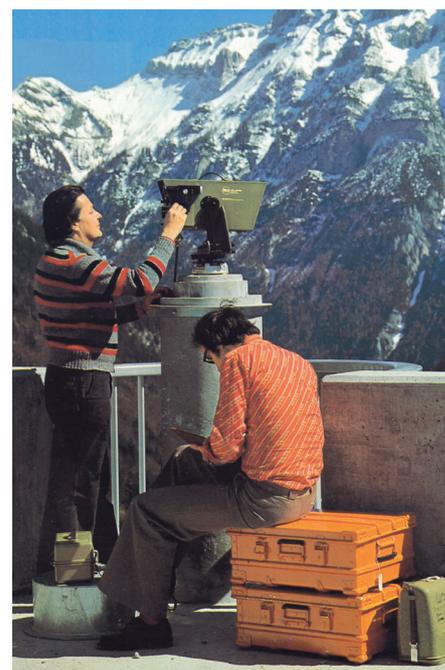


Fig. 5: Mékomètre ME3000 Kern (Keller 1977).

MED permettait par ailleurs un gain de temps notable et donc un surcroît d'efficacité particulièrement bienvenu lors de l'exécution des mesures. Car outre la complexité des concepts de mesure et la grande expérience requise, le temps considérable nécessaire à l'exécution des travaux constituait un inconvénient majeur par rapport à la plupart des autres méthodes de surveillance des barrages. Depuis le milieu des années 1960, de gros progrès avaient aussi été accomplis dans les domaines des techniques de calcul et du traitement électronique des données. Le calcul de compensation selon la méthode des moindres carrés constituait un préalable indispensable, tant pour l'optimisation et l'exploitation efficace des réseaux géodésiques modernes que pour des analyses et des interprétations géométriques pertinentes des déformations ou pour la livraison d'indications correctes en matière de précision et de fiabilité des résultats fournis. Les nouveaux moyens informatiques permirent enfin d'obtenir de meilleures représentations graphiques des déformations et de leur signification ou tout au moins de les établir bien plus simplement.

## Diffusion des connaissances

Désireux de dépasser le cadre de ses propres filières de formation pour initier d'autres cercles d'utilisateurs aux nouvelles méthodes de mesure de distances et plus tard à la mensuration d'ingénieur dans son ensemble, l'IGP de l'ETHZ se mit à organiser périodiquement des cours, conjointement avec d'autres universités techniques de l'espace germanophone, portant sur la mesure de distances en géodésie et ultérieurement rebaptisés «Ingenieurvermessungskurse (IVK)» (*cours de mensuration d'ingénieur*). Les interventions lors de congrès et les articles régulièrement publiés dans des revues fournissaient d'autres occasions de présenter les derniers développements en date concernant la surveillance des barrages et les enseignements tirés en cette matière.

Les entreprises d'ingénierie privées firent par ailleurs appel aux professeurs et aux collaborateurs des instituts des écoles

polytechniques afin qu'ils leur prodiguent des conseils ou qu'ils participent directement aux mesures de déformations. Ainsi, il n'y a rien de surprenant à ce que les bureaux de mensuration créés par d'anciens collaborateurs de ces instituts à partir des années 1960, donc à l'âge d'or de la construction des barrages en Suisse, se soient vu attribuer des mandats de mesure aux côtés du S+T à tous les stades des projets (relevés initiaux, construction, surveillance) sur des barrages tant en Suisse qu'à l'étranger. Le fait que des entreprises privées aient elles aussi réalisé des mesures géodésiques de déformation était du reste inévitable, vu le nombre croissant d'objets à surveiller.

## Le temps des rénovations et des extensions, de 1980 à 2021

Le rythme de construction des installations hydroélectriques dans les Alpes connut un net ralentissement dès le début de la période. Exception faite des récentes centrales de pompage-turbinage, ce sont surtout des réaménagements (par exemple pour minimiser les risques sismiques), des

rénovations ou des rehaussements de couronnements qui furent entrepris. Il n'en demeure pas moins que les réseaux géodésiques de surveillance existants devaient être entretenus, rénovés et en partie étendus. D'abord parce qu'il arrive parfois que des points de référence et de contrôle aient subi des dommages ou aient totalement disparu, ensuite parce que certaines visées ne sont plus possibles, principalement du fait de nouvelles constructions, et enfin parce que de nouveaux enseignements concernant la stabilité des points de référence utilisés jusqu'alors («points fixes») peuvent conduire à des vérifications voire à un complément du dispositif de mesure. Signalons en outre que des modifications, des améliorations et des extensions des concepts de surveillance peuvent résulter de l'utilisation d'instruments plus modernes, d'où des précisions potentiellement accrues, un gain de rapidité et d'efficacité lors de l'exécution des mesures ou l'apparition de nouvelles possibilités de détermination de déformations sur l'ouvrage et à sa proximité.

En Suisse, la plupart des barrages ont désormais atteint un état de déformation élastique consolidé, principalement influencé par les modifications de la tem-



Fig. 6: antenne GPS Trimble 5700/Zephyr (2008) sur le barrage du «Châtelot» (© swisstopo).

pérature et du niveau d'eau de la retenue. Certains ouvrages sont toutefois soumis à de très faibles déplacements, tassements ou soulèvements. C'est pourquoi le concept de surveillance doit également viser à créer un lien (absolu) avec des zones géologiquement stables en plus de permettre de quantifier les déformations élastiques (relatives) imputables aux différentes forces et influences externes qui s'exercent. En conséquence, il peut être localement nécessaire d'étendre les réseaux géodésiques de déformation, au moyen notamment de nivellements de précision, de mesures de distances très précises et de mesures GNSS. Les mouvements à craindre étant généralement très faibles, la précision et l'exactitude doivent être maximales.

La combinaison optimale (dans le temps et dans l'espace) du réseau géodésique «externe» avec le système de mesure «interne», lequel fait essentiellement intervenir des méthodes et des instruments non géodésiques (comme des pendules, des inclinomètres, des jointmètres, des extensomètres, etc.), contribue fortement à améliorer la qualité de la surveillance et de l'interprétation. Ainsi, les mesures «internes» de haute précision, relatives et fréquemment répétées, peuvent être mises en relation avec les observations géodésiques exécutées plus rarement, afin de déterminer des déplacements absolus. Il va de soi que d'autres mesures (températures, niveau d'eau, eaux d'infiltration) doivent y être combinées et incluses dans l'analyse. Les installations de mesure géophysiques et géotechniques (micromètres ou déformètres de forage, extensomètres de forage, etc.) doivent être rattachées aux réseaux géodésiques. La multiplicité déjà évoquée pour l'époque précédente (1945-1980) de méthodes géodésiques, géophysiques et géotechniques, mises en œuvre et exploitées «côte à côte» a évolué vers une réelle pensée systémique dans les concepts de surveillance modernes, puisqu'elles sont désormais combinées directement entre elles au moyen de points de mesure identiques et que les résultats sont analysés globalement.

### Méthodes et concepts actuels en matière de mensuration de barrages

Aujourd'hui encore, les méthodes «classiques» constituent l'épine dorsale des mesures géodésiques de déformations des barrages. A partir des années 1980, les développements intervenus dans les domaines de l'électronique et de la construction d'instruments ont contribué à accroître fortement la précision de telles mesures. Depuis 1986, le Mékomètre ME5000 Kern (Abb. 8), qui compte toujours parmi les distancemètres les plus précis qui soient, permet ainsi de mesurer de courtes distances (à l'air libre ou dans le corps du barrage) avec une précision submillimétrique et si des paramètres météo représentatifs sont saisis avec soin, une précision millimétrique peut également être atteinte sur quelques kilomètres en extérieur, sur des réseaux étendus. Depuis quelques années, des distancemètres d'une précision semblable équipent les tachéomètres et les stations totales. En outre, les instruments des dernières générations permettent de travailler plus vite et avec un confort de mesure accru en s'appuyant sur des méthodes plus rapides, sur la motorisation et sur la visée automatique des réflecteurs, ce dont la précision profite en retour.

C'est en 1988 que swisstopo effectua les premières mesures GPS, donc assistées par satellites, en Suisse sur des ouvrages d'accumulation (fig. 6). Comme au début des années 1920 avec les méthodes de la triangulation nationale, ces développements entretenaient un lien étroit avec les innovations intervenues dans la mensuration nationale. Grâce aux mesures GPS puis GNSS plus tard, la restriction majeure en vigueur jusqu'alors, à savoir que la visibilité directe devait être garantie entre les points, put être levée. Les réseaux de référence purent du coup être étendus en y incluant des points fixes plus éloignés, situés dans des zones géologiquement stables et échappant totalement à l'influence du barrage. Les mesures GNSS effectuées sur site permettent par ailleurs de contrôler l'échelle des distancemètres mis en œuvre. Car une échelle «absolue»

doit être garantie si l'on veut établir un cadre de référence extérieur de haute précision, par exemple pour évaluer de façon fiable l'éventuel resserrement de la vallée. La détermination des déformations élastiques (à court terme) au début des réseaux trigonométriques ne nécessitait pas de disposer d'un tel cadre. En effet, les mesures de déplacements différentielles se fondaient alors totalement sur des intersections, l'échelle du réseau jouant donc un rôle mineur.

Bien évidemment, la numérisation des instruments et les progrès accomplis au niveau de l'exploitation des données par voie informatique furent aussi porteurs d'améliorations considérables en ces années-là. Les réseaux géodésiques purent dès lors faire l'objet d'une compensation rigoureuse «en bloc», incluant plusieurs époques. Cela permit une évaluation à la fois meilleure et plus fiable des résultats, la qualité de la documentation et de la représentation graphique des résultats de l'analyse des déformations s'en trouvant du reste accrue. On recourait (et on recourt toujours) à différents produits logiciels en mensuration d'ingénieur qui se distinguent les uns des autres par les modèles mathématique sous-jacents (compensation séparée en planimétrie et en altimétrie ou approche en 3D, par exemple), le mode de combinaison des mesures trigonométriques et GNSS dans la compensation ou la possibilité d'inclure ou non plusieurs époques de mesure dans le calcul.

Avec les instruments et les outils logiciels actuels, la surveillance de barrages en continu devient également envisageable. Toutefois, la surveillance géodésique totalement automatique et continue reste l'exception et non la règle, alors que l'automatisation (pour la lecture automatique de pendules, par exemple) est courante au cœur des ouvrages. Avec des équipements GNSS cependant, elle serait relativement simple à mettre en œuvre et peu onéreuse (cf. géomonitoring).

### Activités d'entreprises suisses sur des barrages à l'étranger

Si durant cette troisième époque (à partir de 1980 environ), les barrages existants

ont surtout été rénovés et parfois rehaussés en Suisse, les réseaux de surveillance géodésique associés étant étendus tel que décrit précédemment, les connaissances et l'expérience des entreprises et des ingénieurs suisses étaient très prisées à l'étranger où de grands barrages voyaient le jour ou étaient renforcés. Entretien de bonnes relations avec des acteurs suisses de poids dans les secteurs de l'ingénierie et des prestations de services alors impliqués dans la construction de centrales hydroélectriques et de barrages (et qui le sont toujours du reste), les bureaux de mensuration et les géodésiens suisses purent faire profiter ces grands chantiers et la surveillance consécutive des ouvrages de leur longue expérience et de toute l'étendue de leur savoir-faire. Un récapitulatif des activités déployées à l'étranger figure sur le site Internet de la SHGS, en annexe du rapport principal.

## Méthodes modernes

Depuis le tournant du millénaire, de nouvelles méthodes sont mises en œuvre en complément de celles précédemment décrites. Il s'agit notamment du géomonitoring, des systèmes de mesure à fibre optique, du balayage laser terrestre ou de l'interférométrie radar terrestre ou satellitaire.

### Géomonitoring

Deux événements ou enseignements liés à la construction de tunnels poussèrent la société AlpTransit Gotthard SA (ATG) en 1998 à envisager un géomonitoring dans la zone des ouvrages de l'entreprise Kraftwerke Vorderrhein AG: il s'agissait d'une part des dommages subis par le barrage de Zeuzier en 1978, à la suite des travaux d'excavation de la galerie de sondage pour le tunnel de Rawil, et d'autre part des tassements atteignant jusqu'à 12 cm, constatés lors du nivellement fédéral de swisstopo réalisé le long de la route du col du Saint-Gothard et imputables au percement du tunnel routier du Saint-Gothard dans les années 1970, notamment à l'effet de drainage qu'il a entraîné.

Ainsi, les mesures étendues «épisodiques» réalisées conformément à l'ordonnance sur les ouvrages d'accumulation furent complétées par des dispositifs de mesure géodésiques et géotechniques spéciaux et automatisés servant à surveiller les profils en travers des vallées à proximité des barrages de *Curnera*, *Nalps* et *Santa-Maria* (fig. 7).

La surveillance mise en place avant et pendant le creusement visait à identifier le plus tôt possible les éventuelles déformations du terrain causées par la construction du tunnel de base du Saint-Gothard et donc les effets des travaux souterrains sur les trois barrages de façon à disposer de suffisamment de temps pour y remédier le cas échéant (Abb. 9).

### Systèmes de mesure à fibres optiques

Les modifications rapides du niveau des retenues sollicitent fortement les barrages des centrales de pompage-turbinage. Pour surveiller la modification de leur forme, on y incorpore donc des fibres optiques avec des capteurs de mesure intégrés. Ces derniers sont par exemple logés dans les joints entre les blocs et permettent de détecter des changements

dans la longueur des fibres optiques avec une précision de quelques microns.

### Balayage laser terrestre

Le scanner mesure des points à la surface du barrage, en trois dimensions et sans contact, suivant une grille géométrique librement définissable (pour chaque point: direction horizontale et verticale, distance inclinée, intensité, évtl. valeurs chromatiques RGB) (Abb. 10). Pour l'heure, la précision et la correction de la mesure rapide de grandes quantités de points (jusqu'à un million de points par seconde) restent encore inférieures à celles de la détermination multiple de points classique, fortement redondante et très chronophage. Le géoréférencement et la modélisation des nuages de points sont des défis de taille à relever. Si cette méthode est pleine d'avenir, elle restera un complément des méthodes classiques pendant encore longtemps.

### Interférométrie radar terrestre

Lorsque le risque potentiel est très élevé, l'interférométrie radar terrestre à synthèse d'ouverture (*ground-based Interferometric Synthetic Aperture Radar, GB-InSAR*) (fig. 8a) peut permettre d'assurer une surveillance continue de tout le périmètre d'un ouvrage. La portée peut atteindre jusqu'à 4 km depuis le capteur, la surface couverte peut dépasser 5 km<sup>2</sup> et des mouvements inférieurs au millimètre peuvent être détectés, mais uniquement dans l'axe du faisceau radar (*Line-of-Sight LOS*) (fig. 8b). Si plusieurs capteurs de type GB-InSAR sont mis en place sur des stations différentes, des déplacements en 3D peuvent être déterminés. La méthode n'a été utilisée pour l'instant qu'à titre d'essai à proximité des barrages suisses.

### Interférométrie radar satellitaire InSAR

La surface de vallées entières voire de pays entiers peut être surveillée en continu par interférométrie radar satellitaire à synthèse d'ouverture (*Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR*). La périodicité résulte de la zone couverte à chaque passage du satellite. En Suisse, les tasse-

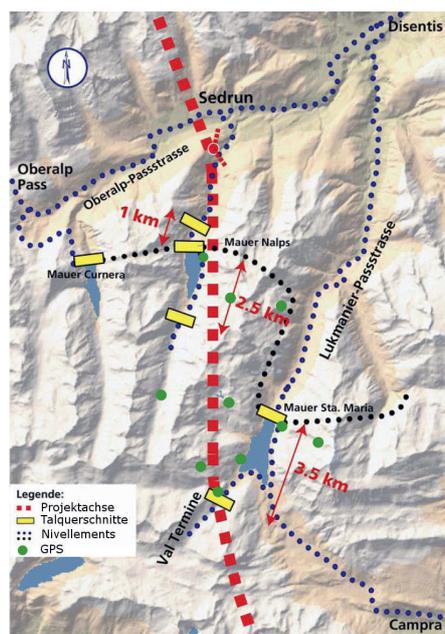


Fig. 7: périmètre de surveillance et méthodes de mesure du «lot 349» pour le tunnel de base du Saint-Gothard (© BSF swissphoto).

ments de zones d'extraction de sel, les glissements de terrain, les glaciers rocheux et les zones gelées en permanence sont surveillées ainsi. Dans l'axe du faisceau radar (*LOS*), la précision des taux de déplacement moyens est inférieure à 1 mm/an par interférométrie radar différentielle (*D-InSAR*). Elle est inférieure à 4 mm/an pour des mesures isolées.

## Autres méthodes

- inclinomètres électroniques pour une auscultation permanente des ouvrages
- capteurs géotechniques numériques pour mesurer des fissures inférieures au millimètre (extensomètre, fissuromètre, etc.)
- radar détectant les chutes de pierres par tout temps, même dans l'obscurité, et déclenchant l'alerte en quelques secondes
- caméra de déformation: elle analyse automatiquement des prises de vues séquentielles à haute résolution et utilise des méthodes de traitement d'images avancées pour détecter des déformations sur des versants instables, des parois rocheuses ou des glaciers avec une précision de quelques centimètres
- capteurs de mouvements, surtout des capteurs piézoélectriques ou des microsystèmes électromécaniques (*Micro-Electro-Mechanical-Systems, MEMS*)
- mesures limnimétriques numériques.

## Perspectives

Vu d'aujourd'hui, voilà ce que l'avenir peut nous apporter:

- une interconnexion et une intégration accrues de capteurs géodésiques, géotechniques et autres (météorologiques, centrales inertielles, limnimètres, etc.)
- le passage de mesures périodiques à des séries temporelles continues sur une sélection de stations de mesure permanentes, installées de manière stable
- l'intégration des réseaux géodésiques de surveillance des barrages par GNSS dans le cadre de référence «absolu», stable à long terme et bien surveillé de la mensuration nationale

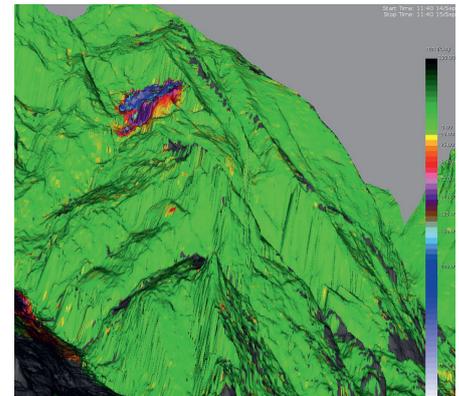


Fig. 8: interféromètre radar terrestre et l'exploitation des mouvements au Piz Cengalo, Bondo (© Geopraevent AG).

- des aides à l'exploitation et à l'analyse dont les algorithmes ont continué à être développés, autrement dit des méthodes de compensation plus complexes, des analyses en temps quasi-réel de séries temporelles et de contraintes en 3D, la déduction de tendances, des services cloud, l'intelligence artificielle, l'apprentissage profond (*Deep Learning*)
- le recours à de nouvelles technologies issues du domaine de l'Internet des objets (*Internet of Things*) pour l'interconnexion et le pilotage à distance de systèmes multicapteurs autonomes (communication *machine-machine* via la 5G, IPv6)
- des systèmes de positionnement terrestres avec des *pseudolites* (émetteurs locaux, donc «pseudo-satellites»), analogues aux systèmes d'augmentation au sol (*Ground Based Augmentation Systems, GBAS*) dans le secteur aéronautique
- des technologies provenant des méthodes de navigation en intérieur (*Indoor Navigation*)
- l'intégration de la *réalité augmentée* et de la *réalité virtuelle* pour simuler et prédire des états futurs d'objets.

## Le bilan

Les mesures de déformation de haute précision, fiables dans la durée constituent un champ d'application de la géodésie d'ingénieur à la fois passionnant, complexe et riche de très fortes exigences. La surveillance géodésique des ouvrages d'accumulation restera surtout

au cœur du concept de sécurité des barrages parce qu'elle fournit des résultats «absolus».

## Bibliographie et documents

Sont disponibles sur le site Internet de la SHGS à l'adresse <https://www.gggs.ch>:

- le rapport principal du groupe de travail: il développe en détail le contenu présenté ici sous une forme abrégée, contient la bibliographie et les indications de copyright portant sur les photos, cartes et autres illustrations et décrit enfin les barrages suisses ainsi que les activités des bureaux de géomètres suisses à l'étranger dans des annexes
- une bibliographie complète des publications suisses consacrées aux mensurations de barrages
- de nombreuses publications au format PDF/A ainsi que des illustrations supplémentaires.

Adrian Wiget

Sonnenweg 6, 5507 Mellingen

[adrian.wiget@bluewin.ch](mailto:adrian.wiget@bluewin.ch)

Beat Sievers

Bahnhofstrasse 11, 3454 Sumiswald

[sievers-frey@bluewin.ch](mailto:sievers-frey@bluewin.ch)

René Huser

Meisenweg 9, 8600 Dübendorf

[rene.huser@glattnet.ch](mailto:rene.huser@glattnet.ch)

Urs Federer

Oelbergweg 5, 5234 Villigen

[urs.federer-kehl@greenmail.ch](mailto:urs.federer-kehl@greenmail.ch)

Version française:

Olivier Reis, F-57200 Sarreguemines