



**Schweizerisches Talsperrenkomitee**  
**Comité suisse des barrages**  
**Comitato svizzero delle dighe**  
**Swiss Committee on Dams**



## **LA GÉODÉSIE POUR LA SURVEILLANCE DES OUVRAGES D'ACCUMULATION**

Recommandations du Comité suisse des barrages (CSB)  
en faveur du recours aux mesures géodésiques de déformation  
pour les ouvrages d'accumulation





## Table des matières

Préambule.....	1
1. Introduction .....	3
1.1 Concept de sécurité et surveillance .....	3
1.2 Les mesures géodésiques parties intégrantes de la surveillance .....	4
1.2.1 Evaluation des sollicitations, de l'état et du comportement de l'ouvrage .....	4
1.2.2 Evaluation rapide de l'état et du comportement de l'ouvrage en cas d'évènement exceptionnel.....	5
1.2.3 Soutien de la recherche des causes lorsque des anomalies surviennent .....	6
1.3 Autres domaines d'intervention de la géodésie .....	6
1.4 Collaboration entre géodésie et génie civil .....	6
1.5 Réseaux de mesures réguliers et étendus.....	7
2. Exigences requises envers les concepts de mesures et les mesures géodésiques.....	11
2.1 Généralités.....	11
2.2 Précision et fréquence des mesures.....	14
2.3 Relations avec d'autres systèmes de mesure.....	15
2.4 Comportements de déplacement et de déformation des digues et de leur sous-sol .....	17
2.5 Comportements de déplacement et de déformation des barrages en béton et de leur sous-sol .....	18
2.6 Surveillance de parties de terrain critiques .....	18
3. Réalisation et exploitation de mesures géodésiques .....	21
3.1 Installation de mesures et exécution des mesures .....	21
3.1.1 Le projet.....	21
3.1.2 Analyse préliminaire concernant la planification et l'optimisation du dispositif de mesures	22
3.1.3 Construction et installation du système de mesures .....	22
3.1.4 Préparation et exécution des mesures .....	23
3.2 Exploitation des mesures par le géodésien .....	23
3.2.1 Compensation libre des mesures d'une époque.....	24
3.2.2 Comparaison sur plusieurs époques et analyse des déformations .....	24
3.3 Documentation et archivage (rapport technique) .....	25
3.3.1 Contenu et forme du rapport technique (y. c. annexes et documentation) .....	25
3.3.2 Représentation des résultats.....	25
4. Le rôle de l'exploitant .....	27
4.1 Maintenance des installations de mesure géodésiques .....	28
4.2 Mise en soumission de mesures géodésiques .....	29
5. Exigences requises du géodésien et du bureau responsable des mesures.....	31
5.1 Généralités.....	31
5.2 Formation et expérience.....	31
5.3 Exigences requises de la part du bureau responsable des mensurations.....	32
5.3.1 Capacité d'un engagement à long terme pour une installation déterminée .....	32
5.3.2 Expériences pour la mise en place d'installations de mesures géodésiques pour les barrages	33
5.3.3 Instruments disponibles.....	33
5.3.4 Programmes de calcul spéciaux disponibles .....	34



5.3.5	Certification du bureau et des personnes exécutantes .....	34
5.3.6	Garantie de personnel qualifié et d'instruments en quantité suffisante en cas de crise	34
	Annexes .....	37
A1.	Réalisation et exploitation de mesures géodésiques .....	37
A1.1.	Dispositif (installation) de mesure et exécution des mesures n.....	37
A1.1.1.	Le projet .....	37
A1.1.2.	Pré-analyse visant à optimiser le dispositif de mesure conçu .....	39
A1.1.3.	Construction et installation du dispositif de mesure .....	40
A1.1.4.	Préparation et exécution des mesures .....	41
A1.2.	Exploitation des mesures par le géodésien .....	42
A1.2.1.	Contrôles de terrain, préparation des données et traitement préalable.....	42
A1.2.2.	Compensation libre des mesures d'une époque .....	43
A1.2.3.	Comparaison sur plusieurs époques et analyse des déformations .....	44
A1.3.	Documentation et archivage (rapport technique) .....	46
A1.3.1.	Tâche assignée au rapport technique .....	46
A1.3.2.	Contenu et forme des rapports techniques (pièces jointes et documentations incluses)47	
A1.3.3.	Représentation des résultats de mesure .....	48
A2.	Modèle de cahier des charges.....	51
A3.	Définition des principales notions employées .....	66
A4.	Exemples .....	73



## Préambule

La géodésie fait depuis longtemps partie intégrante de la surveillance des ouvrages d'accumulation, et, pour les petites installations, elle peut même constituer le seul système de mesure pour déterminer les changements en situation et en altitude. La géodésie représente une particularité au niveau de la surveillance régulière, dans la mesure où elle n'est réalisée la plupart du temps ni par le personnel de l'installation, ni par les ingénieurs civils responsables des ouvrages d'accumulation, mais par des spécialistes (géodésiens), ce qui est notamment aussi valable pour la planification et la mise en œuvre du réseau de mesure géodésique. L'étroite collaboration entre les géodésiens et les ingénieurs civils revêt une grande importance, car ces derniers ont pour tâche d'indiquer de quelles valeurs de mesure ils doivent disposer. Les résultats des mesures doivent également être analysés dans la perspective de l'appréciation du comportement de l'ouvrage par les ingénieurs civils. En principe, le géodésien détermine la situation et l'altitude de certains points précis. La tâche de l'ingénieur civil consiste ensuite à analyser les modifications de ces valeurs pour préciser s'il s'agit d'un déplacement ou d'une déformation et quelles en sont les conséquences pour l'ouvrage d'accumulation. C'est pourquoi ce document ne sera consacré qu'aux changements en situation et en altitude en rapport avec la géodésie.

Les géodésiens disposent aujourd'hui d'un large éventail d'instruments. Par conséquent, il est plus difficile d'employer l'outil le mieux adapté. L'ingénieur civil n'est pas toujours conscient des possibilités et des limites de la géodésie.

L'élaboration des cahiers des charges correspondants requiert en outre de définir ce qui permet au géodésien de bien comprendre les attentes de l'ingénieur civil et à celui-ci de bien comprendre les exigences de la géodésie.

Un sous-groupe géodésie a été créé au sein du groupe de travail sur l'observation des barrages du CSB pour se charger de cette problématique. Le mandat suivant lui a été attribué:

<b>Objectif:</b>	Elaboration d'un document intitulé «La géodésie pour la surveillance des ouvrages d'accumulation»
<b>Ce document doit:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• aider les exploitants d'installation à choisir leur géodésien, en formulant les exigences dans le contexte global des mesures géodésiques sous forme de descriptions et de cahiers des charges</li><li>• aider les géodésiens à choisir les instruments de mesure et les procédures, en indiquant les objectifs et les exigences en matière de mesures géodésiques</li><li>• décrire lui-même les exigences envers le réseau de mesure, les équipements techniques, l'exploitation, l'établissement de rapports et les géo-données</li></ul>

Le groupe de travail pour l'observation des barrages du Comité suisse des barrages (CSB) recommande que la géodésie de précision devienne une partie intégrante des expertises quinquennales et que ces mesures géodésiques ne soient réalisées que par des spécialistes qualifiés disposant de la formation et de l'expérience correspondante ainsi que des instruments requis à cet effet.



### Membres du sous-groupe géodésie:

Paul-Henri Cattin	Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD), Yverdon
Georges Darbre (président)	Office fédéral de l'énergie, Ittigen
Carl-Arthur Eder (jusqu'à 2008; secrétaire)	Office fédéral de l'énergie, Ittigen
Jean-Claude Kolly*	Groupe E SA, Fribourg
Marcel Lutz*	AXPO, Baden
Felix Walser*	Schneider Ingenieure AG, Coire
Adrian Wiget*	Office fédéral de topographie (swisstopo), Wabern

Les personnes marquées d'un astérisque (\*) sont les auteurs principaux du document. Nous remercions Kurt Egger, de Coire, pour sa relecture critique d'une version précédente de ce document et pour ses précieux conseils sur sa structure.

### Remarques

Le CSB a déjà publié deux rapports qui conservent toute leur validité et qui devraient être consultés au besoin.

«Geodätische und photogrammetrische Deformationsmessung für die Überwachung der Stauanlagen – Mesures de déformation géodésiques et photogrammétriques pour la surveillance des barrages – The Geodetic and Photogrammetric Deformation Measurements of Dams», Comité suisse des barrages, 1993/1997

«Dispositif d'auscultation des barrages: Concept, fiabilité et redondance», Comité suisse des barrages, 2005

Les contenus de ces deux rapports ne sont pas reproduits ici. Ils contiennent des références bibliographiques supplémentaires.

En outre, le présent rapport ne définit aucune exigence quantitative en matière de précision ou autres. Ces exigences doivent être déterminées, avec les spécialistes, pour chaque installation et en considérant l'état de la science et de la technique s'y rapportant.



## 1. Introduction

<b>Objectif</b>	Positionnement des mesures géodésiques en planimétrie et en altimétrie dans la surveillance de la sécurité des ouvrages d'accumulation
<b>Mots-clés</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mesures géodésiques comme partie intégrante de la surveillance des ouvrages d'accumulation</li><li>• Définition des vecteurs recherchés de déplacement et de déformation ainsi que des exigences de précision et de la fréquence des mesures par l'ingénieur</li><li>• Planification d'un réseau géodésique par les géodésiens</li><li>• Accord entre les ingénieurs et les géodésiens</li><li>• Réalisation et exploitation des mesures géodésiques par les géodésiens</li><li>• Intégration par l'ingénieur des mesures géodésiques de déplacement et de déformation dans l'ensemble du processus d'évaluation du comportement de l'ouvrage</li></ul>

### 1.1 Concept de sécurité et surveillance

Le concept suisse de sécurité des ouvrages d'accumulation repose sur trois piliers: la sécurité structurale, la surveillance et l'entretien ainsi que le plan en cas d'urgence (Figure 1-1). La surveillance et l'entretien revêtent un intérêt particulier dans le contexte de l'intégration de la géodésie. Ils doivent garantir que l'état et le comportement d'un ouvrage d'accumulation et de son sous-sol sont en tout temps satisfaisants.

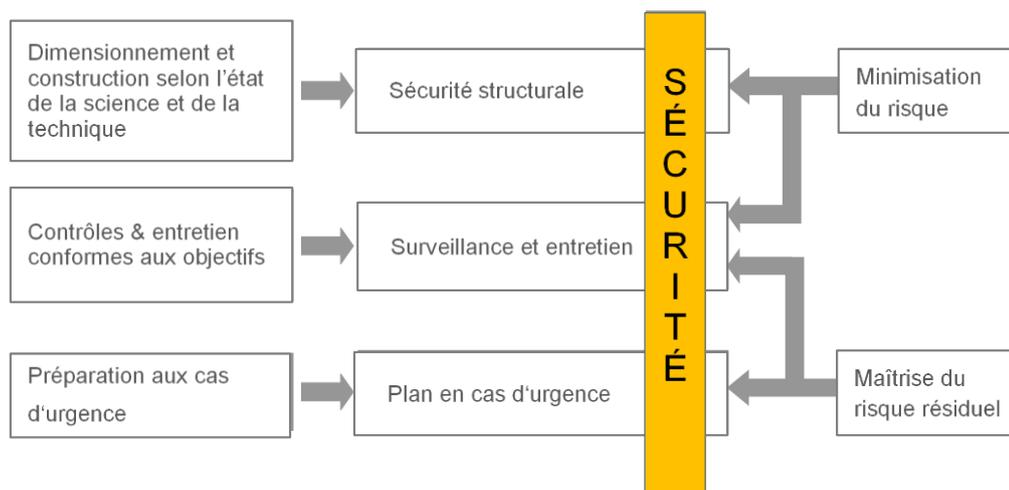


Figure 1-1 : Concept de sécurité des ouvrages d'accumulation en Suisse

La surveillance permet de constater clairement et rapidement des anomalies au niveau du comportement, des dommages ou des états exceptionnels. Ainsi les mesures nécessaires peuvent être prises à temps afin de pouvoir éviter un éventuel danger imminent. L'entretien permet de prévenir les lacunes d'exploitation et les dommages constatés sont réparés au moyen de travaux de remise en état, de rénovation et de transformation. Les objectifs de la surveillance peuvent être formulés ainsi:

- évaluer en continu les sollicitations, l'état et le comportement de l'ouvrage;
- évaluer rapidement l'état et le comportement de l'ouvrage en cas d'évènement extraordinaire;
- soutenir la recherche des causes lorsque des anomalies surviennent.

## 1.2 Les mesures géodésiques parties intégrantes de la surveillance

Les mesures géodésiques font partie intégrante de la surveillance. Elles sont employées seules ou en relation avec d'autres techniques de mesure pour réaliser les trois objectifs de la surveillance, à savoir:

- Evaluer en continu les sollicitations, l'état et le comportement de l'ouvrage;
- Evaluer rapidement l'état et le comportement de l'ouvrage en cas d'évènement extraordinaire;
- Soutenir la recherche des causes lorsque des anomalies surviennent.

### 1.2.1 Evaluation des sollicitations, de l'état et du comportement de l'ouvrage

Le concept d'ouvrage d'accumulation englobe aussi bien le barrage y compris ses fondations que le lac de retenue avec ses rives et toutes les parties du terrain qui peuvent avoir une influence sur le barrage ou sur le lac. Sont évaluées l'ampleur et les modifications des sollicitations (dépôts de sédiments et d'alluvions, températures, processus chimiques, hauteur de l'eau, précipitations, accélérations en cas de séisme, etc.), l'état (apparition de zones de glissement, sources, effritements, eau suintante, fissures, etc.), le comportement (déplacements et déformations du barrage, des fondations rocheuses, des parties du terrain, sous-pressions, pressions interstitielles, infiltrations, etc.) et le fonctionnement des organes de sécurité (essai des parties mobiles des organes de décharge). L'évaluation est en général réalisée par une exploitation et une analyse des résultats de mesure, des contrôles visuels et des essais. Les fréquences d'exécution correspondantes sont différentes et dépendent des objectifs concrets et des conditions locales. Elles peuvent s'étendre d'une fréquence quotidienne (saisie des principaux indicateurs de comportement) à plusieurs années.

La géodésie peut être utilisée comme unique instrument pour déterminer les changements en situation et en altitude de points définis d'un ouvrage d'accumulation, ce qui est typique pour les petits ouvrages. Dans ces cas, les exigences en termes d'exactitude, de fiabilité et de fréquence des mesures sont particulièrement élevées. La géodésie peut aussi servir de système complémentaire de mesure des déplacements et des déformations, afin d'établir une redondance partielle avec un autre système de mesure (par exemple: pendules), de suivre les mouvements réciproques des appuis ou de saisir également les mouvements verticaux d'un barrage. Pour de telles applications, les exigences d'exactitude se fondent sur l'ampleur des changements en situation et en altitude et sur les conditions des autres systèmes de mesures existants. La fréquence des mesures doit être adaptée à la vitesse des processus observés. En substance, pour inscrire les mesures géodésiques à large échelle, il s'agit de procéder dans des zones stables sans influence de la géologie ou dans l'environnement plus large d'un barrage (voir point 1.4). Un avantage essentiel de la géodésie par rapport aux mesures avec des instruments dans le corps du barrage (pendules, inclinomètres, joints mètres, etc.) réside dans l'obtention de déplacements absolus. Ainsi, les déplacements du barrage par rapport à son environnement peuvent être constatés, ce qui est particulièrement important lorsque des mouvements apparaissent dans les fondations, lesquels seraient restés inaperçus sinon.

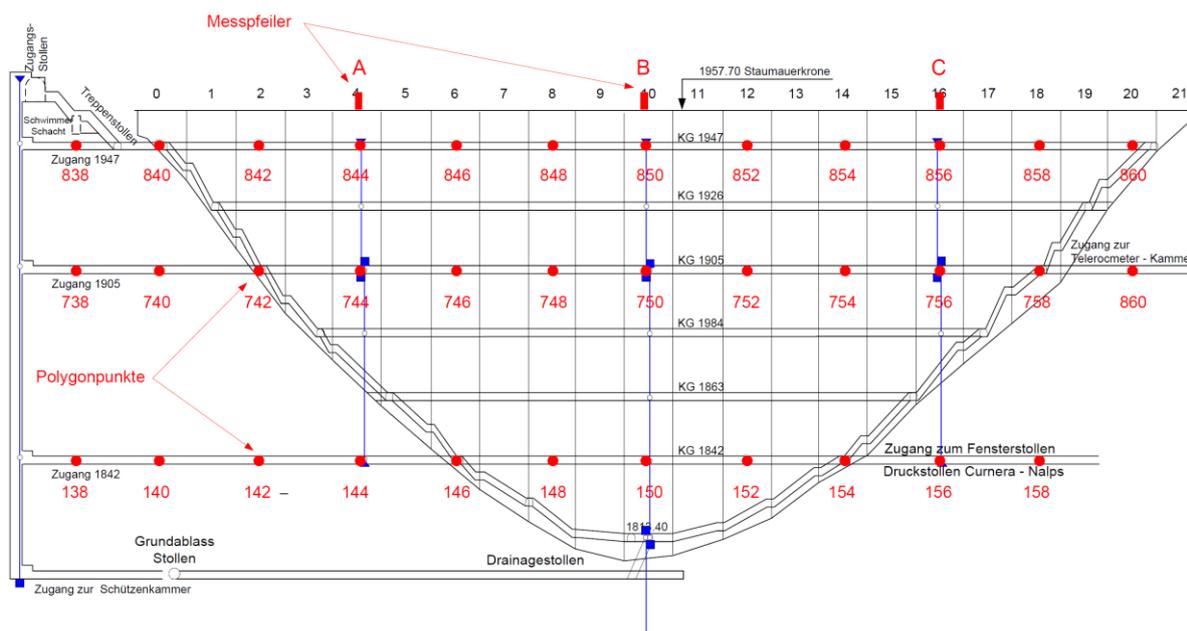


Figure 1-2 : Points de triangulation et de polygonation en relation avec les pendules

### 1.2.2 Evaluation rapide de l'état et du comportement de l'ouvrage en cas d'évènement exceptionnel

En cas d'évènement exceptionnel ou en cas d'urgence, il est primordial d'obtenir rapidement des informations fiables sur l'état et le comportement de l'ouvrage. Dans un tel cas, la précision peut être plus faiblement pondérée. Il s'agit de garder à l'esprit que qu'en situation d'urgence, l'accès aux points de mesure est souvent limité ou en partie impossible (mauvais temps, chute de pierres, avalanche, neige, danger d'éboulement, etc.). La partie correspondante du dispositif de mesure (y compris le réseau de mesures géodésiques) doit donc être dimensionné de sorte que les mesures nécessaires puissent être en tout temps réalisées au moindre coût.



Figure 1-3 : Mesures effectuées en hiver sur l'ouvrage d'accumulation de Nalps

### 1.2.3 Soutien de la recherche des causes lorsque des anomalies surviennent

Si une anomalie de comportement est constatée, les données de mesure sont nécessaires aussi bien pour la recherche des causes que pour l'évaluation courante de la situation, et ce dans un bien plus large mesure que pour l'identification de l'anomalie. Les concepts de mesures doivent tenir compte de cet état de fait.

### 1.3 Autres domaines d'intervention de la géodésie

Selon les circonstances, la géodésie peut ou doit intervenir dans d'autres domaines. A titre d'exemple, il convient d'évoquer en particulier les mesures géodésiques réalisées en lien avec les travaux de percement du tunnel de base du Gotthard. Leur objectif est d'identifier les influences potentielles sur les trois ouvrages d'accumulation de Nalps, Curnera et Santa Maria situés sur l'axe du tunnel. Le concept de mesure et sa mise en œuvre sont en partie complexes en fonction de l'importance, également politique, des possibles conséquences. Ils comportent un mélange défini de nivellements de précision, de mesures tachymétriques automatisées de directions et de distances, de mesures de précision de distances et de mesures GNSS par satellite.

Ces domaines d'interventions spécifiques ne seront pas développés dans le présent document.

### 1.4 Collaboration entre géodésie et génie civil

En cas d'intervention de la géodésie, il est toujours judicieux de combiner les avis de l'ingénieur civil responsable du barrage et du géodésien.

Du point de vue de l'ingénieur civil, les objectifs suivants sont prioritaires:

- quelle sont les informations dont on doit disposer;



- avec quelle précision;
- sous quelle forme et représentation;
- à quelle fréquence.

Du point de vue du géodésien, la priorité est accordée à la mise en œuvre conforme aux objectifs:

- à quoi le réseau de mesures doit-il ressembler et quelle doit être son étendue;
- quels sont les instruments adaptés et lesquels doivent être utilisés;
- quelle doit être la précision des mesures;
- quelles évaluations doivent être effectuées;
- comment documenter et interpréter les résultats.

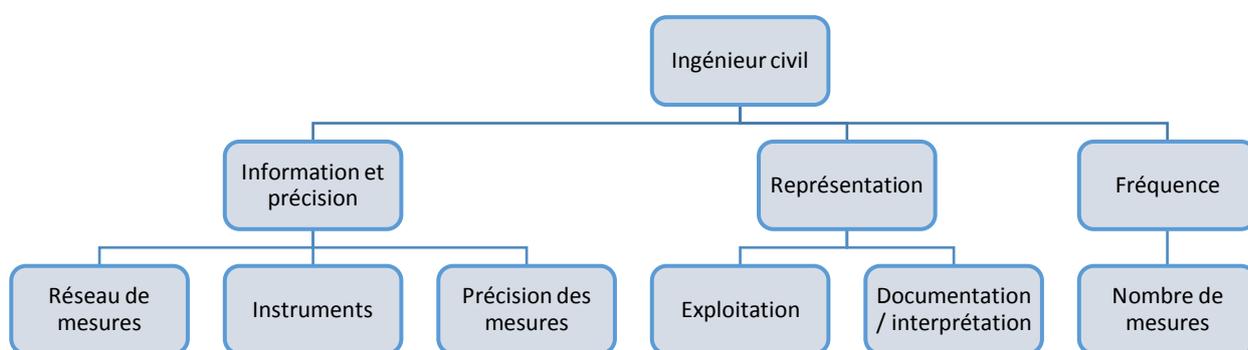


Figure 1-4 : Points de vue de l'ingénieur civil

Les différents points de vue sont couplés les uns aux autres et un échange précoce entre l'ingénieur civil et le géodésien doit avoir lieu, de même qu'un ajustement continu sur la base des résultats obtenus, dans le cadre par exemple des contrôles annuels ou quinquennaux.

Ces différents aspects sont traités en détail dans les chapitres suivants. Le chapitre 2 précise les tâches de l'ingénieur civil et le chapitre 3 celles du géodésien. Le rôle de l'exploitant est décrit dans le chapitre 4. Le chapitre 5 résume les exigences requises de la part du géodésien et du bureau responsable des mesures évoquées dans les chapitres précédents. En annexe, un modèle de cahier des charges relatif aux mesures géodésiques dans lequel les indications mentionnées doivent être adaptées aux différents besoins est indiqué.

## 1.5 Réseaux de mesures réguliers et étendus

Dans les chapitres suivants, les réseaux de mesure se distinguent en réseaux réguliers et en réseaux étendus. Les réseaux réguliers couvrent les alentours immédiats de l'ouvrage d'accumulation et permettent d'effectuer toutes les tâches de surveillance locale. Les réseaux étendus concernent un périmètre plus important et servent à inscrire les réseaux réguliers dans un cadre élargi.



Figure 1-5 : Piliers de mesure du réseau étendu du barrage de Santa Maria

En règle générale, il est suffisant d'établir un réseau régulier, sauf

- si un déplacement des points fixes du réseau régulier s'est produit ou pourrait se produire avec une probabilité plus élevée (par exemple en relation avec des travaux souterrains)
- si des irrégularités sont apparues dans les mesures ou des résultats inexplicables ont été obtenus (par exemple lors de la mise en relation entre des mesures géodésiques et des mesures de pendules ou lorsqu'il n'est pas possible de distinguer si un point fixe monte ou un autre descend)
- si une concentration du risque se présente ou que plusieurs réservoirs sont situés à proximité les uns des autres et qu'il est possible de connecter les différents réseaux réguliers avec un coût raisonnable.

Les exigences en matière de précision d'un réseau étendu sont parfois différentes de celles d'un réseau régulier. Un réseau étendu doit toutefois aussi être régulièrement contrôlé par des mesures et l'exploitation des données doit être vérifiée (au moins tous les 10 ans).



Figure 1-6 : Réseau étendu; dispositif de mesures géodésiques permanent  
(niveau de surveillance 3, ouvrage d'accumulation de Nalps)





## 2. Exigences requises envers les concepts de mesures et les mesures géodésiques

<b>Objectif</b>	Dispositif de mesure correspondant de manière optimale aux besoins de l'ingénieur civil en rapport avec les parties de l'ouvrage à surveiller
<b>Mots-clés</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Définition des parties de l'ouvrage à surveiller (barrage, fondations, versants ou parties critiques du terrain)</li> <li>• Indications sur les vecteurs de déplacement et de déformation attendus en termes de direction, de dimensions et de vitesses de déformation</li> <li>• Connexions avec d'autres systèmes de mesure (systèmes de mesure internes, extensomètres, inclinomètres, etc.)</li> <li>• Définition des exigences de précision et de fréquence des mesures</li> <li>• Disponibilité nécessaire du dispositif de mesure (été, hiver)</li> </ul>

### 2.1 Généralités

Pour les ouvrages d'accumulation existants, le projet relatif aux mesures géodésiques est contemporain de la construction de l'ouvrage. En raison de travaux de rénovation, de la destruction ou du déplacement de certains points ou encore de l'amélioration des connaissances du comportement par l'expérience acquise dans l'exploitation ou par l'évolution des techniques de mesure, il est possible qu'au cours du temps, d'importantes modifications doivent être effectuées sur le dispositif de mesures.

Le concept de surveillance de l'ouvrage d'accumulation, dont font partie les mesures géodésiques, fait régulièrement l'objet d'un examen par les experts compétents. Pour les grands ouvrages d'accumulation, cet examen des équipements et des programmes de mesure est réalisé lors du contrôle quinquennal. Les résultats sont consignés dans l'expertise réalisée par les experts. Les exploitants mettent en œuvre le concept dans la pratique en collaboration avec ingénieur civil expérimenté et le géodésien mandaté.

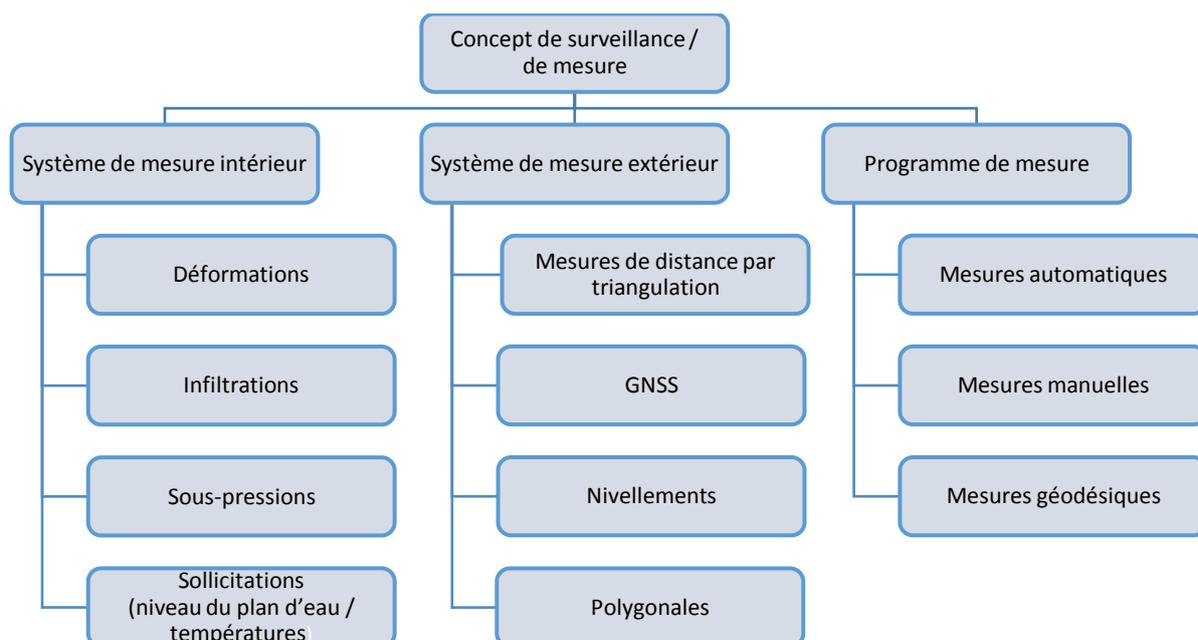


Figure 2-1 : Concept de surveillance / de mesure

Grâce à la géodésie, la situation et la hauteur de points de contrôle (points-objets) doivent être déterminées par rapport à un système de coordonnées prédéfini (cadre de référence géodésique) qui est représenté par les points de référence ou les points fixes. La géodésie est dès lors adaptée pour surveiller les comportements de déplacement et de déformation de constructions ou de parties de terrain. Les systèmes de mesure développés en une, deux ou trois dimensions sont capables de mesurer les changements absolus en situation et en altitude. Par ailleurs, les systèmes de mesures intérieurs, tels que les points de référence des pendules ou les alignements par fil, doivent être contrôlés en ce qui concerne les mêmes systèmes de coordonnées. Les mesures géodésiques sont même souvent indispensables lorsque les équipements de mesure mécaniques ne peuvent pas être installés ou uniquement en occasionnant des coûts disproportionnés, par exemple dans les cas de barrages en remblai ou en béton qui ne disposent pas de galeries de contrôle et de puits.

Les mesures géodésiques ont toutefois le désavantage qu'une précision acceptable ne peut être atteinte qu'en effectuant d'importantes dépenses. Afin de pouvoir réduire les coûts, les exigences envers le système et le procédé de mesure doivent être adaptées à la réalité locale et aux conditions définies par l'ingénieur civil. Le cas échéant, des mesures automatisées doivent être envisagées.



Figure 2-2 : Nivellement de précision à large échelle



Les éléments suivants sont nécessaires afin de déterminer les changements en situation et en altitude de points de mesure définis d'un ouvrage d'accumulation:

- ❑ le système de mesure intérieur, composé de plusieurs équipements de mesure tels que pendules, polygonales, nivellements dans les galeries de contrôle et d'éventuels alignements par fil;
- ❑ la mensuration trigonométrique (extérieure) et les nivellements, par lesquels, outre les changements relatifs en situation et en altitude, est aussi déterminé leur rapport à leur environnement. L'ouvrage d'accumulation est situé dans l'axe du réseau qui se déploie sur la face amont et les versants. Un nombre optimal de points de référence (points fixes) stables et bien répartis est déployé sur le terrain. Les points d'observation et de contrôle sont installés sur le couronnement et en partie aussi sur la face aval de l'ouvrage d'accumulation et dans les galeries de contrôle;
- ❑ le réseau est déployé de manière judicieuse en cas d'évènement exceptionnel. L'idée consiste à étendre le réseau de mesures de l'ouvrage d'accumulation grâce aux stations GNSS afin que la détermination de déplacements absolus soit assurée en cas de déformations exceptionnelles dans le sous-sol ou dans la vallée;
- ❑ les points de liaison entre les réseaux extérieurs et intérieurs de mesures de l'ouvrage d'accumulation.

La surveillance d'un ouvrage d'accumulation nécessite qu'une disponibilité et une stabilité élevées du réseau de mesure soient garanties. Cela permet d'obtenir la continuité des mesures nécessaire à la surveillance à long terme. La mesure de référence (mesure initiale) devrait être le plus possible conservée afin de simplifier l'interprétation. Le programme de mesure joue également un rôle important. Comme les mesures géodésiques sont chères, elles ne sont en général effectuées qu'une fois par an, voire même qu'une fois tous les cinq ans. Il convient également de signaler que les mesures sont toujours effectuées au même moment de l'année avec environ le même niveau du plan d'eau (cf. point 2.2). De cette manière sont éliminées les influences des variations de température et de niveau du plan d'eau au fil des saisons. Si possible, il s'agit de veiller à ce que le moment pour effectuer les mesures soit choisi de sorte que tous les points de mesure soient accessibles. S'il est nécessaire de procéder à des mesures en hiver, le réseau de mesures doit être aménagé de manière à ce que les points de mesure soient accessibles en cas de neige. Pour atteindre une précision plus élevée, si nécessaire, les éventuels points de mesure inaccessibles peuvent être équipés de réflecteurs fixes pour la mesure des angles et la mesure électronique des distances.



Figure 2-3 : Tachymètre motorisé d'un dispositif de mesure automatique

En cas de parties de terrain critiques ou de surveillance intensives de l'ouvrage, des mesures partiellement permanentes et automatiques sont introduites. Il est alors important que les appareils de mesure et les dispositifs de visée soient protégés des chutes de pierres, des avalanches, des influences perturbatrices de l'environnement et des dommages causés par des personnes. Le concept de mesure est choisi de manière à ce que les erreurs systématiques, telles que celles dues à la température ou à l'humidité, restent faibles. Il s'agit de prendre en compte ces influences extérieures au maximum lors de l'exploitation et de les supprimer.

Le réseau de mesures devrait être, dans la mesure du possible, connecté au système de mesure interne (pendules, alignements, polygonales), notamment par une mesure directe des déplacements des points d'ancrage des pendules ou des points fixes des alignements par fil. Avant de construire ou de développer un réseau de mesures, la collaboration entre l'ingénieur civil, le géologue et le géodésien revêt une grande importance:

- ingénieur civil: exigences envers le système de mesures, définition de l'époque de référence
- géologue: définition et évaluation des points fixes
- géodésien: planification du concept de mesures géodésiques et du réseau de mesures

## 2.2 Précision et fréquence des mesures

La définition des exigences de précision et de fréquence des mesures est en premier lieu la tâche de l'ingénieur civil responsable et des éventuels experts. Les déplacements et les déformations de l'ensemble de l'ouvrage d'accumulation doivent pouvoir être surveillés notamment en lien avec l'utilisation de la géodésie dans la surveillance courante (soit aussi le sous-sol et les rives, éventuellement des zones plus éloignées qui représentent un risque comme des parties de glacier). Il s'agit de pouvoir contrôler si les points considérés comme



fixes pour la surveillance des ouvrages d'accumulation le sont dans les faits (par exemple les points de référence des pendules).

La précision des mesures géodésiques est choisie de manière à ce que les résultats des mesures atteignent la pertinence nécessaire pour une évaluation de l'ouvrage d'accumulation par l'ingénieur. Ainsi, les mesures suivantes devraient en principe être réalisées dans les conditions les plus similaires possibles, ce qui signifie:

- avec le «même» niveau du plan d'eau et
- avec des conditions de température similaires (même saison).

Ceci présuppose que:

- que d'autres types de mesures de déformation sont aussi réalisées avec des conditions de niveau du plan d'eau et de température semblables (par exemple mesures de pendules);
- qu'un lien existe entre la géodésie et ces autres types de mesures.

Il est sinon recommandé d'effectuer des mesures géodésiques additionnelles dans d'autres situations d'exploitation (niveau du plan d'eau et températures).

### 2.3 Relations avec d'autres systèmes de mesure

Comme évoqué au chapitre 2.1, le système de mesure interne devrait, dans la mesure du possible, être intégré au réseau de mesures géodésiques. De cette manière, il devient possible de comparer les déformations acquises par les pendules, les extensomètres, etc. par rapport aux déplacements globaux dans le terrain.

Il convient de tenir compte des aspects suivants lors de telles comparaisons:

- La précision des appareils est différente : elle varie de 1 mm ou mieux pour la géodésie à 0,1 mm pour les pendules. Il s'agit aussi de tenir compte des différences de précision lorsque les mesures géodésiques réduites sont comparées aux mesures complètes.
- En général, le système de mesure interne fournit des déplacements relatifs alors que la géodésie mesure des déplacements absolus.
- En cas d'intégration insuffisante dans le sous-sol, des différences considérables peuvent apparaître entre les systèmes de mesure interne et externe (géodésie).
- Il s'agit de veiller à ce qu'en cas de résultats à comparer, la date de la mesure de référence corresponde.

Afin de pouvoir comparer les mesures géodésiques les unes aux autres et interpréter leurs résultats, l'ingénieur civil tiendra compte du niveau de retenue correspondant et des températures mesurées. Il incombe également à l'ingénieur civil d'analyser et de documenter les résultats des mesures complètes.

Tous les documents relatifs au comportement de l'ouvrage d'accumulation sont archivés dans le dossier de l'ouvrage d'accumulation et peuvent être rassemblés dans une monographie.

Les exemples suivants illustrent les combinaisons de différents systèmes de mesure:

### a) Géodésie / pendules

Afin de pouvoir mesurer si possible des déplacements absolus avec des pendules dans les barrages en béton, il est important que les pendules inversés soient intégrés suffisamment en profondeur dans les fondations.

Pour obtenir une bonne connexion entre pendules et géodésie, les points de contrôle doivent être placés le plus près possible des points de mesure des pendules (plaques et points d'ancrage). Il n'est pas absolument nécessaire de calibrer le fil du pendule lui-même car les déformations entre le point de contrôle et le point de mesure du pendule sont souvent négligeables.

Pour les grands barrages en béton, au minimum un point dans la galerie de contrôle est relié au réseau extérieur, à partir duquel les points de référence du pendule peuvent être calibrés au moyen d'une polygonale.

La direction de la plaque du pendule peut s'écarter de la direction de l'axe de l'ouvrage d'accumulation. Des calculs de correction sont éventuellement nécessaires pour assurer une précision suffisante.



Figure 2-4 : Calibrage du fil du pendule

### b) Géodésie / micromètres de forage

Les mesures dans des tubes de micromètre de forage doivent être reliées avec précision aux mesures géodésiques. A cette fin, un repère de mesure géodésique est installé exactement à la verticale du centre de de l'anneau de mesure supérieur du micromètre au moyen d'instruments spéciaux et de pendules optiques, et sa position et son altitude est déterminée dans le réseau géodésique. Des démarches particulières sont avant tout nécessaires lorsque le tube du micromètre de forage n'a pas été bétonné jusqu'à l'arête supérieure ou lorsque le repère de mesure supérieur est situé relativement en profondeur.



### **c) Nivellements / fils ou rubans d'invar**

La connexion du nivellement avec le couronnement dans une galerie de contrôle peut être réalisée au moyen de fils ou de rubans d'invar étalonnés, qui sont fixés dans un puits. Avant la mesure, le fil ou le ruban d'invar est lesté avec un poids défini qui est également utilisé pour son calibrage. La connexion au nivellement est réalisée par des boulons fixes qui sont déplacés à côté de la fixation supérieure du fil ou du ruban et à côté de leurs repères de mesure inférieurs.

Le fil d'invar peut être remplacé en utilisant des tubes de quartz superposés dans un tube de protection en métal. Enfin, il est également possible de procéder à des mesures verticales de précision des distances.

## **2.4 Comportements de déplacement et de déformation des digues et de leur sous-sol**

Les mesures géodésiques jouent un rôle important pour les digues, car en général, aucune mesure redondante comme des pendules ou des alignements par fil n'est disponible.

En ce qui concerne les digues, la surveillance porte avant tout sur le comportement de tassement du corps du barrage et du sous-sol. Pour ce faire, il convient de mesurer les déplacements sur le couronnement, sur les talus et dans le sous-sol. Les tassements sur le couronnement et les talus sont idéalement enregistrés avec un nivellement, alors que les tassements du sous-sol sont mesurés au moyen de repères de tassement vertical, dont les hauteurs de référence peuvent aussi être contrôlées avec un nivellement.

Les mesures de position horizontales, nécessaires par exemple pour le contrôle de la stabilité des talus, peuvent être réalisées au moyen de triangulations, de mesures électroniques des distances et éventuellement par des mesures GNSS.



Figure 2-5 : Mesure GNSS en combinaison avec des mesures de précision des distances

## 2.5 Comportements de déplacement et de déformation des barrages en béton et de leur sous-sol

Pour les barrages en béton, les résultats du réseau de mesures interne peuvent être contrôlés par des mesures géodésiques. Par ailleurs, ces déformations et déplacements « intérieurs » sont obtenus dans les alentours du barrage, la plupart du temps en réalisant des mesures de triangulation avec des mesures électroniques de distances. Sont importantes non seulement les déformations globales sur le couronnement, mais aussi celles intervenant à différents niveaux, par exemple à la hauteur des stations de mesure par pendule. Pour ce faire, on mesure des polygonales dans les galeries de contrôle ou des points sur le versant aval. Pour mesurer les modifications d'altitude, des nivellements sont réalisés sur le couronnement et dans les galeries de contrôle.

Un contrôle des points fixes du système de mesure interne (par exemple pieds de perpendiculaires) est important. La stabilité de tels points de référence des alignements ou des pendules doit être contrôlée par les mesures géodésiques.

## 2.6 Surveillance de parties de terrain critiques

La surveillance des glissements de terrain porte sur l'ampleur, la direction et la vitesse du déplacement de parties de terrain caractéristiques. Comme les déplacements atteignent souvent plusieurs centimètres, le plus grand défi réside en règle générale non pas dans une précision particulièrement élevée, mais dans la faisabilité des mesures. Parfois les points de mesure sont difficiles d'accès et peu de points fixes adaptés sont disponibles. Malgré cela, les mesures doivent pouvoir être réalisées facilement et rapidement, sans que l'équipe en charge des mesures soit exposée à des dangers inadmissibles. C'est pourquoi les points doivent être marqués de manière à ce qu'ils soient facilement repérables dans le terrain. L'utilisation de mesures GNSS simplifiées, telle que les méthodes *rapid-static* ou *real time kinematic* (RTK),

peuvent s'avérer très efficaces selon les circonstances. L'utilisation de dispositifs de mesure permanents, de balayage laser ou de mesures radar (LIDAR, INSAR) peut éventuellement aussi se révéler judicieuse. Une possibilité supplémentaire réside dans le recours à la photogrammétrie. Pour augmenter la précision des mesures, plusieurs points de calage doivent toutefois être calibrés par géodésie.

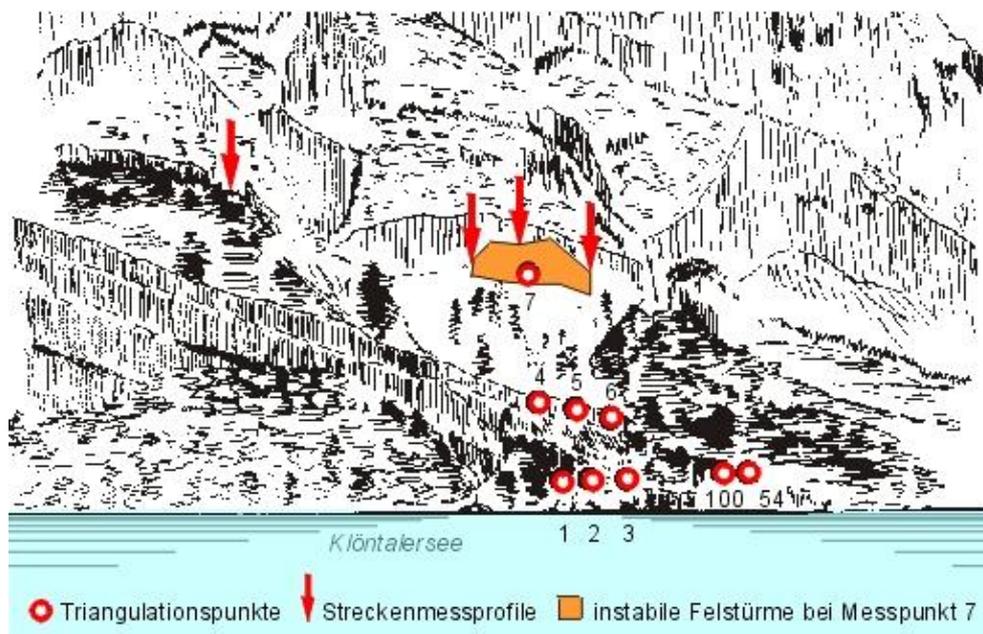


Figure 2-6 : Bärentritt, mesure de la rive opposée et mesures relatives au moyen de fils invar et de distomètres (profil de mesure d'une section)





### 3. Réalisation et exploitation de mesures géodésiques

<b>Objectif:</b>	Obtention de résultats optimaux concernant la précision, la fiabilité et la rentabilité en ce qui concerne les mesures géodésiques
<b>Déroulement:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Planification de l'installation de mesures optimale</li><li>• Mise en place de l'installation de mesures selon les circonstances données</li><li>• Saisie efficace des mesures en fonction de la qualité exigée</li><li>• Compensation des mesures et calcul d'éventuelles déformations</li><li>• Documentation des mesures et des résultats</li></ul>

La réalisation irréprochable d'une mesure de déformation géodésique exige un maniement correct des procédures de mesure et des instruments ainsi que le respect de certaines règles. Cette partie a pour but d'éclairer et de résumer brièvement des aspects intéressants pour les exploitants, les experts et les autorités de surveillance. Les raisons et les détails concernant ces commentaires généraux et des mots-clefs peuvent être trouvés dans l'annexe A1.

#### 3.1 Installation de mesures et exécution des mesures

L'installation de mesures géodésique doit être adaptée au barrage concerné et à son environnement. Elle doit respecter les objectifs fixés par le mandant, l'ingénieur civil et l'autorité de surveillance. Les étapes de planification suivantes peuvent être distinguées :

1. Le projet
2. L'analyse préliminaire concernant la planification et l'optimisation du dispositif de mesures géodésiques
3. La construction et l'installation de mesure
4. La préparation et l'exécution des mesures

##### 3.1.1 Le projet

<b>Objectif:</b>	Planification de l'installation de mesures optimale
<b>Procédure:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Choix des points de mesures (points de contrôle ou points de l'ouvrage) pour la surveillance des déplacements en situation et en altitude</li><li>• Détermination des exigences concernant la précision</li><li>• Choix du système de référence géodésique et cadre de référence ainsi que des points de base</li><li>• Définition du plan du réseau des méthodes de mesures et des instruments</li><li>• Définition du programme des mesures et du cycle des mesures (y. c. mesures réduites et scénarios d'urgence) ainsi que d'éventuelles mesures automatiques</li></ul>

En règle générale, les installations de mesures étant prévues pour une longue durée de vie, leur disposition à long terme a une importance déterminante. Des adaptations nécessaires durant la période d'utilisation peuvent provoquer des inhomogénéités indésirables dans les séries de mesures.

### 3.1.2 Analyse préliminaire concernant la planification et l'optimisation du dispositif de mesures

<b>Objectif:</b>	Pour une installation de mesure optimisée en vue des résultats attendus et du temps nécessaire
<b>Procédure:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Étude de différentes variantes de dispositifs de mesures et instruments de mesures</li><li>• Étude et justification de la précision et de la fiabilité des résultats (coordonnées, altitudes, déplacements) attendus</li><li>• Examen des conséquences de défaillances</li><li>• Discussion concernant les exigences et les résultats avec le mandant et les experts</li></ul>

Les aides intégrées dans de bons programmes de compensation pour le calcul de la précision à atteindre et de la fiabilité en fonction de la configuration du réseau projeté permettent une évaluation de l'installation de mesures projetée avant sa réalisation. Ceci permet l'obtention de renseignements concernant certains manques ou indiquent les possibilités d'optimisation possibles.

### 3.1.3 Construction et installation du système de mesures

<b>Objectif:</b>	Matérialisation stable et à long terme de l'installation de mesures
<b>Procédure:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Exécution soigneuse des piliers de mesures, des points de référence et des points de contrôle</li><li>• Construction et installation des mesures de sécurité nécessaires</li><li>• Logistique et dispositifs de protection des systèmes de mesures automatiques</li></ul>

L'installation de mesures géodésique est généralement installée par l'exploitant du barrage. Ceci exige une étroite et intensive collaboration entre l'exploitant et le géodésien.



Figure 3-1 : Pilier de mesure à double manteau

### 3.1.4 Préparation et exécution des mesures

<b>Objectif:</b>	Saisie efficace des mesures prévues, ce avec la qualité nécessaire
<b>Procédure:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mise à disposition et contrôle des instruments</li><li>• Préparation de l'installation de mesures</li><li>• Planification du déroulement des mesures</li><li>• Saisie des changements en situation et en altitude durant les mesures avec observation simultanée d'autres systèmes de mesures</li><li>• Sauvegarde quotidienne des données et contrôle au moyen d'exploitations des mesures préalables</li></ul>

Il faut rechercher une réalisation rapide des mesures en tenant compte des conditions existantes (température, niveau de l'eau, etc.) afin d'éviter des influences d'erreurs systématiques dues à leurs variations possibles. Il est également important de mesurer en même temps les autres dispositifs de mesures (fil à plomb, rocmètre, etc.). Ceux-ci sont observés par l'exploitant du barrage, spécialement si ces dispositifs sont liés aux points de mesures.



Figure 3-2 : Nivellement de précision sur le couronnement du barrage

### 3.2 Exploitation des mesures par le géodésien

Dans la pratique, l'exploitation des mesures géodésiques peut être structurée en 3 phases:

1. Contrôle des mesures effectuées au moyen d'un traitement spécifique des mesures brutes selon les procédés de mesures (directions, angles verticaux, distances, nivellement, GNSS)
2. Compensation de toutes les mesures d'une époque pour le calcul de la géométrie actuelle (coordonnées)

### 3. Option : Compensation générale sur plusieurs époques et analyse des déformations

Le but de cette exploitation est la détermination d'éventuels changements en situation et en altitude avec la précision correspondante. Pour une description des précisions habituelles en géodésie, nous vous prions de vous référer à l'article de K. Egger "Les erreurs moyennes en géodésie" <sup>1</sup> comme base d'interprétation de déplacement.

Deux méthodes de compensation de mesures géodésiques se sont imposées durant ces dernières années en Suisse :

#### 3.2.1 Compensation libre des mesures d'une époque

<b>Objectif:</b>	Choix des points fixes et contrôle de qualité indépendant des influences extérieures (en admettant que la position des points fixes soit inchangée en situation et en altitude)
<b>Procédure:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Compensation de toutes les mesures de l'époque actuelle en tenant compte des relations fonctionnelles et des propriétés stochastiques</li><li>• Appréciation des corrections des mesures résultant de la compensation ainsi que de la précision justifiée</li><li>• Exécution de tests statistiques</li><li>• Signalisation ou pondération réduite de mesures avec une précision réduite ou avec des écarts inexplicables</li></ul>

La compensation ne traite que des mesures effectuées actuellement. La détermination de changements en situation et en altitude des points de mesures s'effectue par comparaison avec la situation et l'altitude de l'époque de référence.

#### 3.2.2 Comparaison sur plusieurs époques et analyse des déformations

<b>Objectif:</b>	Coordonnées et altitudes ajustées sur des points fixes, respectivement leur modification avec justification de précision et fiabilité pour tous les points de contrôle
<b>Procédure:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Compensation libre de toutes les anciennes époques de mesure, détermination optimale des coordonnées de tous les points</li><li>• Appréciation de l'hypothèse des points fixes et choix judicieux de ceux-ci dans le système de référence (analyse des points fixes)</li><li>• Comparaison sur plusieurs époques de mesure</li><li>• par superposition des réseaux compensés librement par époque de mesure à l'aide d'une transformation Helmert sur les points fixes choisis</li><li>• par une compensation globale (compensation multi-époques) de toutes les époques de mesure sur les points fixes choisis</li><li>• Calcul des coordonnées et altitudes spécifiques des points de contrôle pour l'époque donnée ainsi que leur précision et leur fiabilité avec prise en compte de l'emplacement, respectivement, de la précision des points fixes</li></ul>

Ici la compensation des mesures actuelles s'effectue toujours simultanément avec des mesures précédentes. L'avantage par rapport à une restriction sur une seule époque est la compensation de toutes les observations à partir de la mesure zéro en un seul bloc. Ce faisant, il est possible de justifier des différences de coordonnées ou respectivement des déplacements de points sur la durée avec des indicateurs statistiques corrects (erreur

<sup>1</sup> voir "wasser, energie, luft - eau, énergie, air" 94. Jahrgang, 2002, Heft 11/12



moyenne relative entre époques de mesure) et de juger leur signifiante. Toutes les mesures anciennes sont en outre disponibles sous un nouveau format de données et peuvent être facilement archivées. L'inconvénient est que les coordonnées et altitudes des compensations précédentes peuvent changer de manière minime. Ceci peut être cependant évité en fixant les anciennes coordonnées de référence des points fixes, pour autant qu'elles soient contrôlées et qu'aucun déplacement significatif ne soit décelé.

### 3.3 Documentation et archivage (rapport technique)

Le rapport technique sur une mesure géodésique de déformation poursuit essentiellement deux buts:

- ❑ Il décrit les travaux géodésiques réalisés. Le rapport doit également documenter l'état de l'installation de mesure et la méthode d'exploitation.
- ❑ Il fournit les bases techniques de mensuration et les résultats pour l'appréciation de l'état et du comportement de l'ouvrage.

#### 3.3.1 Contenu et forme du rapport technique (y. c. annexes et documentation)

<b>Objectif:</b>	Rapport détaillé sur les mesures géodésiques et les calculs y compris leurs résultats
<b>Contenu:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Introduction et mandat</li><li>• État de l'installation de mesure</li><li>• Description des mesures</li><li>• Exploitation</li><li>• Description et appréciation géodésique des résultats (différences de coordonnées et d'altitudes) et leur précision du point de vue du géodésien</li><li>• Résumé et conclusions</li><li>• Notes annexées, annexes (tableaux, plans, éventuellement extraits de l'exploitation)</li></ul>

Il faut s'assurer que la documentation (rapport technique) contient toutes les informations utiles sur la mesure géodésique effectuée.

#### 3.3.2 Représentation des résultats

<b>Objectif:</b>	Description claire des résultats pour l'interprétation
<b>Contenu:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Plan de l'installation de mesures, plans des réseaux</li><li>• Plans des changements de situation et d'altitudes</li><li>• Description et éventuellement tableaux, plans techniques et photos</li></ul>

Le rapport technique doit contenir tous les résultats sous forme graphique et numérique clairs.





## 4. Le rôle de l'exploitant

<b>Objectif :</b>	Répartition claire des missions entre l'exploitant, l'ingénieur civil, les experts
<b>Mots-clé :</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Etablissement d'un règlement de surveillance du barrage par l'exploitant</li><li>• Appel d'offre et adjudication des mesures géodésiques</li></ul>

Pour la plupart des usines électriques, le personnel local s'occupant de la surveillance de l'ouvrage de retenue est subordonné à l'exploitant de la centrale. Il s'occupe de l'établissement du budget, l'attribution de mandats et de commandes ainsi que de la gestion de la maintenance et du renouvellement des installations.

L'exploitant doit avoir une représentation claire sur:

- L'objectif des mesures géodésiques
- Les techniques de mesure utilisées
- Les tâches de son personnel, aussi bien pour les campagnes de mesure que pour la maintenance
- Les coûts de l'ensemble de la mesure.

Pour simplifier les relations entre l'exploitant, l'ingénieur civil, les experts et le géomètre qui a été mandaté pour effectuer ces mesures géodésiques, la loi exige de l'exploitant l'établissement d'un règlement pour l'exploitation et la surveillance de l'ouvrage d'accumulation<sup>2</sup> aussi bien en période normale qu'en cas d'évènements extraordinaires. Ce dernier doit être approuvé par l'OFEN.

En ce qui concerne les mesures géodésiques, ce règlement doit contenir les renseignements suivants :

- L'organisation des mesures géodésiques: l'administration du mandat
- Le genre et l'étendue des mesures (exigences, mesures complètes ou réduites)
- Fréquence et saison des mesures
- Préparation de la campagne de mesure
- Tâches du personnel local
- Entretien de l'installation de mesure
- Prescriptions d'exploitation pendant la mesure : niveau du lac, variations maximales du niveau du lac
- Mesures (autres que géodésiques) supplémentaires concomitantes (p. ex. mesures des pendules, de fissures, et diverses mesures de températures)
- Remise des résultats et archivage

Le règlement peut se limiter à la description de l'ensemble des tâches et n'a pas pour objectif de contenir l'explication de points de détail.

L'exploitant fournit les exigences requises pour les mesures et pour le réseau de mesure. Il fixe les exactitudes nécessaires à atteindre, sur la base du mode, de la grandeur et de l'importance de l'ouvrage à surveiller. Plus l'exactitude exigée sera élevée, plus des prétentions de haute qualité devront être choisies. Le réseau de mesure et l'instrumentation

---

<sup>2</sup> Ordonnance pour la sécurité des ouvrages d'accumulation (OSOA) du 7. décembre 1998, art. 9.2

utilisée doivent être choisis par le géomètre, de telle façon qu'il puisse remplir les exigences d'exactitude.

#### 4.1 Maintenance des installations de mesure géodésiques

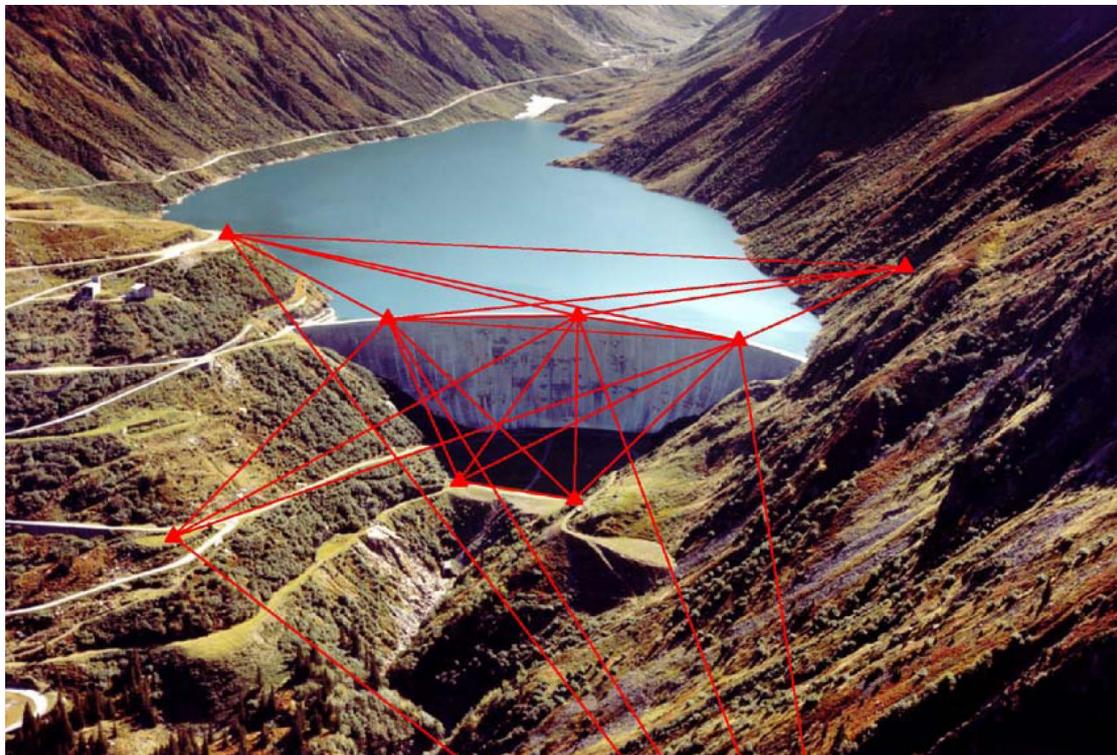


Figure 4-1 : Exemple d'un réseau de mesure géodésique

Le bon état de l'installation de mesure est une hypothèse absolue pour l'atteinte de l'exactitude requise des changements en plan et en altitudes, recherchée pour les mesures géodésiques. L'exploitant est en règle générale responsable de l'entretien des points de référence et de contrôle. Il doit veiller à ce que les points soient bien visibles (végétation) et si possible atteignables. Ils doivent être visibles sans empêchement, depuis tous les points de stationnement prévus dans le plan de réseau. L'état des points fixes est à examiner régulièrement. Le contrôle de leur stabilité est à vérifier dans le cadre des mesures géodésiques.

Les recommandations de maintenance permettent d'assurer un réseau de bonne qualité pendant une longue période :

- Plan des points existants et des lignes de visée nécessaires à disposition du personnel local.
- Signalisation et désignation des points de référence et de contrôle sur place.
- Coupe régulière de la végétation sur les lignes de visée.
- Exécution assurant une stabilité et durabilité des piliers de mesure et des points. Une protection des piliers de mesure contre la chaleur permet d'éviter les déformations dues à l'ensoleillement.
- Protection des dispositifs de centrage des piliers de mesure et des points par un graissage régulier des boulons et des taraudages et aussi par le montage de capots de protection.



- ❑ Accès sûr à tous les piliers de mesure.

Il est important d'avertir suffisamment tôt le géomètre en cas de démontage d'un point de référence ou de contrôle, afin qu'il puisse, si nécessaire, mesurer un nouveau point de référence avant de supprimer l'ancien.

L'exploitant est informé que la surveillance de son ouvrage d'accumulation doit être garantie en tout temps. C'est pourquoi des bureaux d'ingénieurs géomètres avec une longue expérience dans les travaux d'ingénieurs arpenteurs de précision et avec des activités régulières dans le domaine de la géodésie doivent être pris en considération. Si malgré tout, un changement du géomètre ou aussi du système de mesure est nécessaire, les interprétations des mesures doivent pouvoir être en tout temps compréhensibles. La garantie de pouvoir disposer des données brutes et des données de mesures vérifiées (p. ex. prise en compte des valeurs de calibrage), d'une description claire des paramètres utilisés et des méthodes d'interprétation ainsi que la documentation des séries de mesure sont particulièrement importants. Ces données doivent être fournies à l'exploitant de l'ouvrage d'accumulation en même temps que le rapport de mesure.

## 4.2 Mise en soumission de mesures géodésiques

Pour la mise en soumission de mesures géodésiques, l'exploitant doit prendre en considération les points suivants :

- ❑ Les bureaux qui exécutent déjà la surveillance d'autres ouvrages d'accumulation ou qui s'occupent de la mise en place de réseau de mesure géodésique et de surveillance de précision sont en général bien qualifiés pour exécuter des mesures pour les ouvrages d'accumulation avec la précision exigée.
- ❑ Exiger les curriculum vitae des personnes clé et des autres spécialistes du bureau de géomètres ainsi qu'une liste de références
- ❑ Exiger une liste de l'instrumentation dont le bureau dispose.
- ❑ Exiger des indications sur les programmes de compensation et les programmes spéciaux (p. ex. pour les transformations GNSS) dont le bureau dispose.
- ❑ Demander des indications sur la qualité de mesure attendue en planimétrie et en altitude.

Le changement du géomètre, respectivement du bureau de géomètres mandatés signifie toujours une rupture dans la continuité de la série de mesures effectuées jusqu'ici. Il en résulte le plus souvent une perte de précision et une interprétation des résultats plus difficile. En principe, le même géomètre doit être gardé pour plusieurs mesures. Un changement ne doit entrer en considération qu'en cas de nécessité.

Un exemple de mise en soumission se trouve à l'annexe A2.





## 5. Exigences requises du géodésien et du bureau responsable des mesures

<b>Objectif:</b>	Conditions essentielles afin que le géodésien puisse résoudre la tâche qui lui est imposée
<b>Mots-clefs:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Connaissances techniques spécifiques solides et expérience concernant les exigences particulières concernant la surveillance géodésique de barrages</li><li>• Connaissances des relations entre les différents systèmes de mesures d'un barrage</li><li>• Aptitude à assurer durant des années, et si possible sur des dizaines d'années, la continuité de la série de mesures</li><li>• Instrumentation à la hauteur (Hard- et Software)</li><li>• Capacité suffisante du bureau de mensurations techniques</li></ul>

### 5.1 Généralités

Dans les mensurations géodésiques, en particulier dans le domaine de surveillance de grands barrages, il s'agit de mesures de très haute précision et fiabilité. Des connaissances approfondies des principes de la mensuration sont nécessaires, non seulement pour la saisie des données sur le terrain (les mesures proprement dites), mais également dans l'exploitation des mesures. Particulièrement en présence de réseaux étendus et de réseaux géodésiques combinés (géodésie conventionnelle combinée avec d'autres méthodes de mesure telles GNSS, laser scanning, etc.), des connaissances accrues de la géodésie et de la mensuration technique sont nécessaires.

La géodésie de surveillance de barrages peut être considérée dans très peu de cas comme un exercice de mensuration. À part des connaissances des aspects géologiques et géotechniques, la connaissance et la compréhension statique du comportement possible d'un barrage sont nécessaires. Ainsi il est possible au géodésien de remettre en cause d'une manière critique ses propres résultats et démontrer à l'exploitant, respectivement à ses experts et ingénieurs, les points faibles et les insuffisances de ses mesures. Pour ces raisons, il est important que le géodésien soit capable d'une collaboration interdisciplinaire avec l'exploitant et les experts du barrage, avec les autorités de surveillance, les ingénieurs civils, les géologues et qu'il parle avec eux un « langage commun ». Il faut rechercher une longue expérience et une continuité personnelle dans la prise en charge d'une installation de mesure géodésique.

### 5.2 Formation et expérience

L'installation, les mesures et l'exploitation d'une installation de mesures géodésiques nécessitent de solides connaissances de spécialiste des méthodes géodésiques, des instruments ainsi que des connaissances de leurs avantages et de leurs limites. Pour ces raisons au moins, le directeur de projet d'une mesure géodésique doit satisfaire à des exigences supérieures concernant sa formation (EPF, HES).

Des connaissances concernant les concepts et les procédures relatives à la sécurité des barrages ainsi que sur de possibles scénarios de déformation et de danger sont requises de la part du géodésien. Seule la compréhension sur le comportement d'un barrage et du terrain environnant permet une mise en place optimale de l'installation de mesures par le géodésien et de vérifier la plausibilité des changements en situation et en altitude, suite aux mesures. Elle lui permet également de tirer des conclusions sur d'éventuelles erreurs dans les calculs et de déceler une éventuelle instabilité des points fixes utilisés.

La saisie de mesures géodésiques de haute précision exige d'avantage que la simple utilisation des instruments de précision. Ainsi, par exemple, la prétendue simple saisie de paramètres météorologiques peut devenir un problème et provoquer, lors de l'exploitation, des réductions de distances erronées. Par conséquent, une grande expérience des mesures de déformation est indispensable et celle-ci permet de réagir correctement à des conditions changeantes (par exemple les conditions météorologiques) et aux événements spéciaux durant la campagne de mesures en vue d'obtenir les meilleures mesures possibles.

Souvent, des mesures de fil à plomb ou des mesures de référence et de comparaisons géotechniques (extensomètres, installations de mesure TRIVEC, etc.) doivent être intégrées dans les mesures de déformation d'un barrage. Ceci conditionne la compréhension sur les particularités de ces méthodes de mesures et de leur exploitation.



Figure 5-1 : Mesures de jointmètre en combinaison avec mesure géodésique

### 5.3 Exigences requises de la part du bureau responsable des mensurations

Ce n'est pas au seul géodésien que sont imposées des exigences élevées afin de fournir des services compétents dans le domaine des mesures de déformation précises. Ceci est également valable pour le bureau de mensuration technique mandaté. Il doit apporter la preuve que les critères cités au chapitre 5.2 sont remplis tout au moins au point de vue du personnel.

Des critères supplémentaires importants que doit remplir un bureau de mensuration technique mandaté sont traités dans les paragraphes suivants.

#### 5.3.1 Capacité d'un engagement à long terme pour une installation déterminée

Les mesures de déformation géodésiques d'un barrage se déroulent, même si par étapes, sur plusieurs années, voir dizaines d'années. Afin d'assurer la continuité des séries de mesures, les perspectives futures économiques qui assurent la survie du bureau à long terme ne sont pas négligeables. Pour réunir les conditions techniques, rendre possible des mesures de déformation géodésiques précises, de gros investissements dans les instruments de mesures



et leurs accessoires ainsi que dans les logiciels d'exploitation et surtout dans le Know-How et la formation des collaborateurs doivent être effectués.

### **5.3.2 Expériences pour la mise en place d'installations de mesures géodésiques pour les barrages**

Des connaissances spéciales et l'expérience correspondante sont nécessaires afin de projeter et d'installer des installations de mesures géodésiques qui satisfassent aux exigences spéciales pour la surveillance de barrages. Le géodésien doit disposer des connaissances spéciales et de la prévoyance pour concevoir dès le départ d'une manière optimale l'installation de mesure en vue d'une durée aussi longue que possible. Cependant, des extensions futures, d'éventuelles améliorations ou l'intégration de nouvelles méthodes de mesures doivent être possibles dans des cas justifiés. Le géodésien doit connaître toutes les caractéristiques, les avantages et les inconvénients des procédures et instruments existants ou à intégrer nouvellement afin de réaliser un concept de mesure effectif, efficient et de respectivement de l'étendre.

### **5.3.3 Instruments disponibles**

Les conditions ne sont de loin pas remplies avec le seul achat d'une station totale de haute précision avec ATR (reconnaissance automatique de la cible) pour réaliser des mesures de déformations précises de barrages. Non seulement des instruments appropriés (Théodolites, distance mètres de haute précision, autres instruments spéciaux tels que GNSS) mais également des accessoires en nombre suffisant et répondant aux exigences spéciales doivent être à disposition. Ainsi la présence de mires de nivellement calibrées, de cibles et réflecteurs en nombre suffisant est indispensable. En complément, il faut disposer d'instruments pour maîtriser efficacement et sûrement des tâches spéciales plutôt rares comme "Lotungen", report d'altitudes avec mesures de distances verticales. L'ensemble des instruments y. c. les accessoires doivent être constamment entretenus et contrôlés. La calibration avec justification correspondante fait partie de l'entretien.



Figure 5-2 : Réflecteurs de précision

### 5.3.4 Programmes de calcul spéciaux disponibles

Les logiciels disponibles dans chaque bureau de mensuration pour la résolution de problèmes de mensuration (ou mensuration officielle) sont insuffisants pour leur emploi dans les mesures de déformation de précision. Dans ce cas, il faut utiliser des programmes de prétraitement et des programmes de compensation dont les possibilités d'une modélisation fonctionnelle et stochastique du réseau géodésique sont conformes aux exigences de précision. Ces programmes doivent être utilisés par un personnel formé et expérimenté.

### 5.3.5 Certification du bureau et des personnes exécutantes

Actuellement, une certification n'est pas exigée, mais devrait être envisagée. Cette dernière pourrait toutefois valoir comme confirmation de la garantie de qualité et de fiabilité pour l'engagement du bureau de mensuration technique. Il faudrait en outre définir quelles instances peuvent établir des certificats.

Dans tous les cas, la formation et l'expérience du géodésien engagé doit pouvoir être justifiée par le bureau. La justification des contrôles et calibrages périodiques des instruments de mesures doit être apportée sur demande.

### 5.3.6 Garantie de personnel qualifié et d'instruments en quantité suffisante en cas de crise

Il est sans aucun doute avantageux si le bureau chargé de mesures géodésiques dispose à l'interne de personnel qualifié en suffisance ainsi que des instruments décrits y. c. d'instruments de réserve et de leurs accessoires. Souvent et en cas de nécessité, un seul bureau n'est pas à même de mettre à disposition suffisamment de personnel qualifié et d'instruments. Ceci particulièrement quand, suite à un événement naturel (par ex. tremblement de terre), les barrages de toute une région doivent être contrôlés dans un court laps de temps. Pour cette raison, une collaboration dans le cadre d'une communauté d'ingénieur ou avec des



bureaux partenaires est souhaitée. Ainsi il est possible en cas d'évènements d'avoir recours à des ressources plus grandes.





## Annexes

### A1. Réalisation et exploitation de mesures géodésiques <sup>3</sup>

#### A1.1. Dispositif (installation) de mesure et exécution des mesures n

##### A1.1.1. Le projet

<b>Objectif:</b>	Conception du dispositif de mesure optimal
<b>Procédure:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Choix des points de mesure (points de contrôle ou points-objets / de l'ouvrage) pour la surveillance des déplacements et des déformations en planimétrie et en altimétrie</li><li>• Choix du système et du cadre de référence géodésique ainsi que des points fixes</li><li>• Détermination des exigences de précision</li><li>• Définition du plan du réseau, des méthodes de mesure et des instruments</li><li>• Définition du programme et du cycle de mesure (y. c. les mesures réduites et les scénarios d'urgence) ainsi que d'éventuelles mesures automatiques</li></ul>

Le genre, la localisation et le nombre des points de référence et des points fixes sont définis au stade du projet de dispositif de mesure géodésique. Ce dernier prescrit les **points de contrôle** (points-objets) à surveiller sur l'ouvrage de retenue et à l'intérieur de celui-ci ainsi que les modalités de cette opération (ampleur de la surveillance en planimétrie et/ou en altimétrie, précision et points de référence par rapport auxquels elle est réalisée). Le dispositif de mesure doit être conçu par le géodésien, en étroite collaboration avec l'ingénieur civil responsable et le géologue. Il doit permettre l'intégration optimale d'évolutions à venir des techniques de mesure, pour autant qu'elles soient prévisibles. Si la méthode des mesures de déformation géodésiques est extrêmement souple et peut généralement être adaptée aisément à une nouvelle donnée par des extensions ou des modifications, il n'en demeure pas moins qu'un dispositif de mesure stable et la conservation des mêmes instruments revêtent une grande importance pour l'analyse des déformations. La continuité au niveau du géodésien en charge des travaux est elle aussi essentielle. Il est en effet judicieux que la même personne exécute les mesures durant plusieurs campagnes et transmette le cas échéant son expérience à un éventuel successeur.

Il est primordial que les points de référence ou les points fixes soient sélectionnés avec le plus grand soin, à la fois pour la qualité à long terme de l'analyse des déformations et pour la détermination de déplacements «absolus» dans le cadre de référence retenu. Les points de référence doivent être situés en dehors de la zone d'influence de l'ouvrage de retenue, de préférence en amont et en aval de celui-ci. Des points de contrôle doivent être répartis sur les deux versants de la vallée, afin que des déplacements relatifs de ces derniers – supposés stables – puissent également être décelés.

Les **points de référence** doivent généralement être choisis à proximité de l'ouvrage de retenue, parce que la visibilité d'une station à une autre est indispensable pour réaliser les mesures de déformation terrestres. Toutefois, si les points ainsi choisis sont situés dans la zone d'influence de l'ouvrage de retenue, ils devront être complétés par des points de

<sup>3</sup> Les principes et les règles énoncés au chapitre 3 sont repris dans la présente annexe pour y être décrits plus en détail. Cette annexe comprend par ailleurs certains passages révisés et réactualisés tirés d'une publication du groupe de travail Observation des barrages, figurant dans le numéro 9/1993 du mensuel «wasser, energie, luft – eau, énergie, air» sous le titre «Mesures de déformation géodésiques et photogrammétriques pour la surveillance des ouvrages de retenue».

référence supplémentaires, plus éloignés, définis dans des zones géologiquement stables. Les méthodes de mesure par satellites (GNSS) peuvent se révéler très utiles voire indispensables dans ce cadre. La stabilité de tous les points de référence doit quant à elle être vérifiée sans cesse. Il convient enfin de veiller, lors de l'exploitation des mesures et notamment du positionnement du réseau, à ce que les points de référence (points fixes) n'introduisent aucune contrainte erronée de nature à altérer l'échelle et l'orientation du réseau de surveillance.

Il n'y a aucune limite supérieure au nombre de points de référence. Il faut s'attendre à ce que des points soient détruits ou se révèlent instables a posteriori, même s'ils ont été sélectionnés et matérialisés avec soin, soit en raison d'événements naturels (avalanches, inondations, glissements de terrain), soit du fait de mesures prises après leur définition (aménagement, constructions, etc.). La stabilité des points de référence, qui se présentent sous la forme de piliers, doit pouvoir être contrôlée par des mesures sur des repérages excentriques judicieusement choisis (stabilité garantie). Il est souhaitable que les points de référence soient accessibles tout au long de l'année. Cela peut aussi être indispensable si le concept d'urgence retenu l'exige (accès par tout temps, même en plein hiver).

Le projet intègre également des indications relatives à la **précision** à atteindre au niveau de la détermination des modifications en planimétrie et en altimétrie, compte tenu des méthodes de mesure mises en œuvre et des instruments utilisés. Les précisions exigées exercent une influence sur la construction et le repérage des points de contrôle et de référence, sur la structure du réseau établi, sur l'ampleur des mesures ainsi que sur les instruments à employer et donc sur le coût (récurrent) des mesures de déformation.

Le plan du réseau, les **méthodes de mesure** et les **instruments** mis en œuvre sont définis dans le projet. Dans le cas de mesures de déformation terrestres classiques, des mesures trigonométriques de directions, d'angles verticaux et de distances sont effectuées à l'aide de théodolites, de tachéomètres ou de stations totales, voire à l'aide de distancemètres spéciaux de haute précision (appareils à infrarouge ou à laser). Elles sont complétées par des nivellements de précision et des polygonaux (cheminements polygonométriques). A l'intérieur des barrages, des distances peuvent être mesurées au moyen de fils ou de rubans d'invar.

C'est notamment pour déterminer la position des points de référence, des piliers des stations importantes et le cas échéant de points de contrôle sur le couronnement du barrage par rapport à des points de référence (très) éloignés, établis dans des zones géologiquement stables, que des récepteurs GNSS géodésiques bifréquence sont utilisés aujourd'hui en association avec des antennes calibrées. A cela s'ajoute un grand nombre d'équipements (auxiliaires) supplémentaires tels que des lunettes nadiro-zénithales (descente de points), des mires de nivellement en invar, des cibles, des réflecteurs, des adaptateurs, etc. Les instruments servant aux mesures de déformation sur un barrage de grande dimension peuvent être aussi nombreux que spécifiques et les équipements auxiliaires ne sont pas tous des articles standards. Le développement de nouveaux instruments et de nouvelles méthodes susceptibles de présenter de l'intérêt pour des mesures de déformation se poursuit par ailleurs. On songe ici aux scanners laser ou aux instruments radar. L'intégration économiquement rentable de nouveaux instruments au sein de dispositifs de mesure déjà en place en tenant compte des exigences de précision et de continuité s'appliquant aux mesures de déformation constitue un aspect particulièrement exigeant de l'activité du géodésien.

Il est important de procéder à une mesure de référence extrêmement précise du dispositif de mesure complet. A l'issue de chaque répétition de ces mesures, les déplacements en planimétrie et les modifications d'altitude doivent pouvoir être déterminés avec une précision et une fiabilité suffisantes sur la base des différences enregistrées au niveau des points de contrôle (coordonnées et altitudes) par rapport aux mesures précédentes. Les informations nécessaires à l'ingénieur civil, aux experts et à l'exploitant de l'ouvrage concernant le



comportement de ce dernier (déplacement / déformation) et la stabilité de ses abords en sont déduites. Une attention particulière doit être portée au lien optimal, aussi direct que possible, devant exister entre les points de référence et les points de contrôle de l'ouvrage de retenue (ou de ses abords) d'une part et les instruments de mesure mis en place à l'intérieur du barrage d'autre part (exemples: pendules, extensomètres, etc.). Ce lien influe sur la redondance de l'ensemble du système de surveillance et donc sur sa fiabilité. Il faut veiller à une détermination suffisante (voire à une surdétermination) des points de référence / de contrôle.

Les **programmes** (mesures principales et intermédiaires) et les cycles **de mesure** devraient enfin être définis dans le projet, en accord avec l'ingénieur civil, les experts éventuels et l'exploitant. Il devrait aussi indiquer les mesures réduites envisageables. En cas notamment d'événements exceptionnels ou de situations d'urgence, un programme de mesure restreint ou une sélection de mesures isolées devrait permettre de disposer très vite de premiers résultats et d'enseignements concernant des déplacements ou des déformations possibles.

Il convient enfin de vérifier si des mesures géodésiques automatisées, au moyen par exemple de récepteurs GNSS ou de tachéomètres, peuvent constituer un complément judicieux au dispositif de mesure déjà en place. Les mesures automatisées peuvent notamment servir à la surveillance permanente et continue de secteurs critiques. Réalisables aussi souvent qu'il est nécessaire voire en continu, de même qu'à des heures différentes du jour ou de la nuit, les mesures automatiques peuvent permettre d'éliminer des erreurs systématiques ou de mieux comprendre des phénomènes évolutifs.

#### A1.1.2. Pré-analyse visant à optimiser le dispositif de mesure conçu

<b>Objectif:</b>	Optimiser le dispositif de mesure dans l'optique des résultats attendus et du temps à consacrer aux mesures
<b>Procédure:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Simulations réalisées en faisant varier la configuration et les instruments de mesure</li><li>• Etude et justification de la précision et de la fiabilité des résultats (coordonnées, altitudes, déplacements) attendus</li><li>• Examen des conséquences d'indisponibilités</li><li>• Discussion concernant les exigences et les résultats avec le mandant et les experts</li></ul>

Les premières exploitations des mesures de déformation d'un ouvrage de retenue sont réalisées dans le cadre de simulations, avant même que la moindre mesure ait été effectuée sur le terrain. Le **dispositif de mesure** optimal est conçu au bureau, en procédant à ce que l'on appelle une pré-analyse. Le calcul de compensation permet d'examiner la **précision et la fiabilité** des résultats au sein de simulations, dès lors que le dispositif de mesure projeté est défini et que la précision des instruments de mesure dont l'emploi est prévu est connue.

Des pré-analyses répétées permettent d'optimiser le dispositif de mesure, de façon que les exigences à respecter puissent être satisfaites avec un nombre minimal de mesures. Des **événements particuliers** ou des **indisponibilités** (points de référence inutilisables, glissements de terrain de grande ampleur, etc.) peuvent également être simulés et examinés. Les résultats fournis par de tels calculs a priori sont les ellipses d'erreur moyenne et les rectangles de fiabilité à attendre sur les points de contrôle dans les conditions prévues. Le géodésien peut ainsi concevoir avec grand soin un système de surveillance géodésique moderne, livrant par la suite des résultats satisfaisant aux exigences du mandant, des experts et des autorités de surveillance.

### A1.1.3. Construction et installation du dispositif de mesure

<b>Objectif:</b>	Matérialisation stable et à long terme du dispositif de mesure
<b>Procédure:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mise en place soignée des piliers de mesures, des points de référence et des points de contrôle</li><li>• Construction et installation des équipements de sécurité nécessaires</li><li>• Logistique et dispositifs de protection des systèmes de mesure automatisés</li></ul>

Les ouvrages de retenue disposent généralement d'une gamme complète d'équipements de mesure dont certains ont été mis en place dès la construction de l'ouvrage ou ont au moins été prévus dès ce stade. Il arrive parfois que des parties du dispositif de mesure aient déjà été utilisées dans le cadre de l'implantation et de la surveillance générale de l'ouvrage. La plus grande attention doit être portée à l'installation. Elle doit être soignée pour être durable. Il est recommandé que les dispositifs de centrage sur les piliers et les chevilles des points de contrôle soient mis en place par le géodésien lui-même ou le soient sous sa surveillance.

En règle générale, les points de référence à stationner sont matérialisés par des **piliers de mesure** massifs en béton, à double manteau / paroi et dotés d'un dispositif de centrage précis. Ils doivent être ancrés dans le sous-sol stable (rocher), afin d'être dépourvus de tout mouvement propre. D'autres options sont envisageables si les circonstances l'exigent, par exemple des consoles ou des piliers en acier (démontables). Deux repérages excentriques au moins (trois dans le cas idéal) sont à mettre en place localement pour garantir la position des points de référence. Ces repérages doivent être répartis au mieux sur le plan géométrique et fixés à proximité, dans la roche. Ils servent à déceler de faibles mouvements des piliers par rapport à leur environnement immédiat. En cas de destruction du pilier, ils aident à établir le lien avec le nouveau pilier construit.

Tous les endroits exposés (non seulement les piliers de mesure mais également les trajets pour les rejoindre) et notamment les passages dangereux doivent être sécurisés en prenant les **mesures de protection** qui s'imposent (pose de garde-corps, de cordes fixes ou de toits). L'accès doit être possible tout au long de l'année, par tout temps, sans courir aucun risque et sans avoir d'obstacle à franchir. Les lignes de visée doivent toutefois rester dégagées, au même titre que l'horizon si des mesures GNSS sont prévues sur le point considéré.

Les points de contrôle (points-objets / de l'ouvrage) doivent restituer le mouvement du sous-sol ou de l'ouvrage à contrôler en toutes circonstances. Ils peuvent prendre des formes très différentes suivant l'endroit où ils sont établis: chevilles dans la paroi aval, piliers sur le couronnement, chevilles dans le rocher des contreforts ou sur des points de visée éloignés, chevilles à dispositif d'insertion spécial pouvant être visées directement ou permettant le centrage mécanique ou optique de repères appropriés, réflecteurs montés à demeure ou amovibles (mise en place par centrage forcé), chevilles de nivellement horizontales ou verticales, etc. Un repérage adéquat et durable sera défini au cas par cas, en fonction des possibilités d'accès au site, de la géométrie du réseau, des méthodes de mesure et des instruments utilisés.

**Les systèmes de mesure automatisés** installés à demeure requièrent généralement la prise de mesures particulières. Des connexions à des réseaux (raccordement au réseau électrique ou installation solaire, liaison par câble ou par radio pour la transmission de données) sont nécessaires selon les techniques employées. Les capteurs et les composants des dispositifs de mesure automatique doivent en outre être protégés contre les intempéries et les perturbations de toutes sortes (par exemple au moyen d'abris pour les stations totales automatiques et de constructions légères protégeant les réflecteurs ou les antennes GNSS contre toute accumulation de neige).



#### A1.1.4. Préparation et exécution des mesures

<b>Objectif:</b>	Saisie efficace des mesures prévues au niveau de qualité requis
<b>Procédure:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Formation des personnes participant aux mesures</li><li>• Mise à disposition et contrôle des instruments</li><li>• Préparation du dispositif de mesure</li><li>• Planification du déroulement des mesures</li><li>• Evitement ou saisie de déformations de l'ouvrage de retenue durant les mesures; observation simultanée à l'aide d'autres systèmes de mesure</li><li>• Exécution rapide des mesures en tenant compte des conditions dans lesquelles elles sont réalisées et évitement ou réduction de l'influence des erreurs systématiques</li><li>• Sauvegarde quotidienne des données et contrôle au moyen d'exploitations préalables</li></ul>

La première condition à respecter pour assurer le succès des mesures de déformation, c'est de les confier à des **généralistes** (ingénieurs en géomatique) et à des opérateurs (cf. chapitre 5) **bien formés et aguerris**. Ils doivent comprendre les objectifs, les exigences à satisfaire et le concept sur lequel repose le plan de mesure et doivent parfaitement maîtriser les aspects techniques de même que les instruments mis en œuvre. Il est enfin indispensable que leur travail soit précis et soigné.

Les instruments prévus pour l'exécution des mesures doivent également se montrer à la hauteur des attentes placées en eux. Ils doivent donc être **en parfait état de marche**. Les capteurs et leurs composants doivent être calibrés et vérifiés périodiquement. Ainsi, les facteurs d'échelle des distancemètres et les constantes d'addition qui leur sont associées en combinaison avec les réflecteurs utilisés doivent par exemple être connus. Les décalages (absolus ou relatifs) des différents centres de phase des antennes GNSS doivent également être déterminés au préalable au moyen de mesures de calibration.

Le **dispositif de mesure** doit être préparé en vue des mesures de déformation. Il doit être garanti en temps voulu que toutes les visées prévues sur le plan du réseau soient réalisables (vue dégagée). Il est par ailleurs important que les cibles soient nettoyées avec soin et identifiées au besoin. Les dispositifs de sécurité et de protection requis doivent enfin être montés.

Le **déroulement concret des mesures** doit être planifié sur la base du concept de mesure et du plan du réseau. L'heure à laquelle les mesures sont réalisées doit également être prise en compte. Ainsi, un rayonnement solaire plus ou moins intense peut influencer sur les mesures classiques, tandis que la constellation des satellites peut jouer un rôle important dans le cas de mesures GNSS de courte durée. Des mesures nocturnes permettent de tirer profit des avantages que constituent des conditions météorologiques plus stables, une réfraction plus faible et une moindre activité ionosphérique (c'est important pour le GNSS). Les observations doivent par ailleurs respecter les critères de précision imposés. Les mesures réalisées par le passé (époques antérieures) doivent aussi être prises en compte, puisque les mesures de déformation doivent toujours être effectuées, pour autant que ce soit possible, selon le même concept et dans des conditions similaires (cela explique également pourquoi le remplacement du géodésien ne doit intervenir que dans des cas exceptionnels). Il est enfin recommandé, si toutefois c'est possible, de recourir aux mêmes instruments et de les mettre en station sur les mêmes piliers et les mêmes points de contrôle.

Les mesures elles-mêmes sont exécutées **avec soin et rapidement** dans le respect des règles éprouvées de la géodésie classique et de la géodésie par satellites. Elles sont conçues de telle manière que des erreurs éventuelles puissent être détectées sur place, sans délai, et

qu'il puisse y être remédié immédiatement. Les sollicitations auxquelles l'ouvrage de retenue est soumis (niveau de l'eau, température) variant en permanence, il n'est généralement pas possible de retrouver le même état à un stade ultérieur. En outre, les reprises de mesures signifient généralement une charge de travail très lourde.

Les sollicitations auxquelles l'ouvrage de retenue est soumis devraient rester aussi constantes que possibles pendant toute la durée des mesures, lesquelles peuvent s'étaler sur plusieurs jours. Des dispositions doivent ainsi être prises en concertation avec l'exploitant du barrage pour maintenir une cote constante. **L'état de déformation de l'ouvrage** pendant la mesure doit être saisi. Une lecture quotidienne de la position du pendule peut éventuellement être ordonnée à titre de contrôle et des mesures journalières voire continues d'autres données (niveau de l'eau, températures) peuvent se révéler judicieuses. La campagne de mesures géodésiques doit enfin être aussi brève que possible. Plusieurs équipes de mesure peuvent éventuellement travailler en parallèle pour garantir le respect de cette condition.

Il est par ailleurs opportun de saisir les valeurs indiquées par la totalité des **autres équipements de mesure** répartis sur le barrage, à l'intérieur de celui-ci et autour de lui durant la réalisation des mesures géodésiques de déformation pour obtenir une vue d'ensemble aussi complète que possible de l'état et du comportement de l'ouvrage de retenue à cette époque.

Toutes les influences susceptibles de produire des erreurs systématiques sont à éviter au maximum lors des mesures. Des valeurs supplémentaires doivent être saisies au besoin, permettant d'éliminer ou tout au moins de réduire les erreurs systématiques, soit aussitôt, soit au stade de l'exploitation des données. Les éléments suivants peuvent revêtir une grande importance, suivant le dispositif retenu pour les mesures: les hauteurs et les éventuelles excentricités des instruments, des cibles et des réflecteurs de même que la saisie des conditions atmosphériques (température, humidité de l'air et pression atmosphérique), en particulier pour la mesure électronique des distances.

Aujourd'hui, les données mesurées sont enregistrées dans des carnets de terrain électroniques ou directement dans les instruments eux-mêmes. La **sauvegarde quotidienne des données enregistrées** de même que leur contrôle formel et effectif (une exploitation préliminaire étant la meilleure option ici) peuvent se révéler décisifs à cet égard.

## A1.2. Exploitation des mesures par le géodésien

### A1.2.1. Contrôles de terrain, préparation des données et traitement préalable

<b>Objectif:</b>	Garantir que toutes les données nécessaires sont disponibles au niveau de qualité requis au terme de la campagne de mesure
<b>Procédure:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Saisie et contrôle électroniques des données de mesure originales sur le terrain</li><li>• Détection des erreurs grossières et des données manquantes</li><li>• Traitement préliminaire de mesures particulières (distances ou nivellements)</li><li>• Application des valeurs d'étalonnage et de calibration</li><li>• Modélisation et correction des erreurs systématiques</li><li>• Détermination de grandeurs stochastiques pour les mesures (a priori)</li></ul>

Aujourd'hui, la plupart des mesures géodésiques sont saisies par voie électronique, que ce soit par l'instrument lui-même ou via un carnet de terrain, et peuvent être combinées à des informations supplémentaires entrées manuellement. Ainsi, les mesures brutes peuvent être traitées dès leur saisie sur le terrain ou aussitôt après et être soumises à des **contrôles spécifiques** (formation de la moyenne, estimation de la variance, réductions). Cela permet notamment de déceler sans délai les **erreurs** grossières éventuellement commises



(confusions entre points, lectures erronées, erreurs dans la transmission des données) et de procéder sans attendre aux mesures de complément requises. Les moyennes des séries de directions sont ainsi calculées à la station, afin de vérifier si le niveau de qualité requis a été atteint. On peut enfin s'assurer dès ce stade que toutes les données à saisir l'ont effectivement été.

**Des mesures d'autres types** sont traitées et contrôlées durant les pauses les plus longues (à l'heure du déjeuner ou en soirée), en comparant par exemple les mesures aller et retour dans le cas du nivellement. Une exploitation de test avec un logiciel standard est aussi recommandée pour les mesures GNSS, après que les données de tous les récepteurs d'une session commune aient été transférées sur un ordinateur. Cela permet de s'assurer de la résolution des ambiguïtés de phase (définition de valeurs entières) vers tous les satellites, sur toutes les lignes de base. Ce traitement ou cette exploitation des mesures brutes sur site vise principalement à garantir que l'on dispose de toutes les mesures nécessaires au niveau de qualité requis à l'issue de la campagne menée, si bien qu'aucune reprise n'est à envisager. C'est particulièrement important lorsque des conditions extérieures (environnementales ou météorologiques) ou des dispositions à prendre par l'exploitant (telles que le maintien de la retenue à une cote constante) ne permettent pas de répéter les mesures ultérieurement ou ne le permettent que moyennant un surcroît de travail considérable. On peut enfin envisager des situations et des événements extrêmes où il est plus important de disposer rapidement de résultats fiables que d'une précision très élevée.

Les mesures originales (valeurs brutes) sont toutes enregistrées au retour au bureau. Ensuite, les contrôles de terrain tels que les compensations de séries ou les **corrections** atmosphériques et géométriques des mesures de distances sont tous répétés sur l'ordinateur de bureau, toutes les mesures auxiliaires (hauteurs des instruments, des cibles et des antennes, mesures météorologiques, etc.) et les **valeurs d'étalonnage / calibration** (constantes des instruments et des prismes, facteurs d'échelle et coefficients de dilatation, excentricités de phase des antennes, etc.) étant prises en compte. Le recours à un logiciel est recommandé pour l'exploitation définitive des mesures GNSS, l'outil utilisé devant proposer des possibilités étendues de modélisation et de **correction des erreurs systématiques**. Au terme de la mise au net des données et des exploitations spécifiques aux différents types de mesures, on dispose de valeurs contrôlées et largement exemptes d'erreurs grossières et systématiques pour les différents capteurs utilisés, ainsi que de valeurs estimées concernant leur **comportement stochastique** (fonctions de distribution, variances).

#### A1.2.2. Compensation libre des mesures d'une époque

<b>Objectif:</b>	Contrôle de la qualité indépendant du choix des points fixes et des influences extérieures
<b>Procédure:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Compensation de toutes les mesures de l'époque actuelle en tenant compte des relations fonctionnelles et des propriétés stochastiques</li><li>• Evaluation des résidus résultant de la compensation et des précisions fournies</li><li>• Exécution de tests statistiques</li><li>• Signalisation ou sous-pondération justifiée de mesures présentant une précision réduite ou des écarts inexplicables</li></ul>

Les mesures de déformation terrestres comprennent généralement un nombre considérable de mesures surabondantes qui se contrôlent mutuellement. Considérées globalement, les mesures effectuées présentent ainsi un haut degré de redondance. Au terme de la campagne et de la mise au net des mesures, les observations sont donc toutes intégrées dans une compensation combinée. Dans un premier temps, elle prend la forme d'une **compensation de réseau sans contrainte** (réseau libre) d'une époque de mesure, les propriétés stochastiques de toutes les grandeurs utilisées devant être prises en compte au même titre

que les informations concernant les relations fonctionnelles (liens géométriques, etc.), de façon à pouvoir se prononcer avec le plus de sûreté possible, malgré les influences perturbatrices de toutes sortes (incertitudes de mesure inévitables et autres causes d'erreurs aléatoires).

La compensation libre est la méthode adéquate pour vérifier l'intégralité des observations de l'époque actuelle, les résidus ainsi déterminés étant parfaitement indépendants des hypothèses sur les points fixes. Ces résidus suivent une distribution de probabilité connue (distribution normale avec espérance mathématique nulle) et un **test statistique** (test des erreurs résiduelles normées) permet de détecter d'éventuelles fautes grossières sur les observations (telles que des confusions entre points). La compensation libre permet aussi de **sous-pondérer des mesures** dont la précision est réduite. Il est cependant indispensable, lorsque l'on procède de la sorte, de bien analyser les causes des influences perturbatrices et d'étudier avec soin les conséquences des mesures prises sur les résultats obtenus.

D'ordinaire, la compensation des réseaux géodésiques s'effectue en deux étapes, d'abord la planimétrie et ensuite l'altimétrie (2D+1D). Cette séparation ne s'accompagne d'aucun inconvénient majeur tant que les observations concernant chacune des deux étapes sont clairement séparées (directions d'une part, angles verticaux et nivellement d'autre part). La compensation tridimensionnelle (3D) a cependant gagné en importance avec l'arrivée de mesures véritablement spatiales, à savoir les mesures de distances et plus encore les mesures GNSS. Les exigences posées aux modèles géométriques et physiques se sont accrues dans le même temps, songeons par exemple à celles concernant la modélisation correcte des influences du champ de la pesanteur (déviations de la verticale, cotes du géoïde). Toutefois, la question de savoir s'il vaut mieux procéder à une compensation de type 2D+1D ou 3D pour déterminer les déformations est d'importance secondaire, tant que les méthodes restent clairement séparées lorsque les différences sont formées.

### A1.2.3. Comparaison sur plusieurs époques et analyse des déformations

<b>Objectif:</b>	Coordonnées et altitudes (resp. leurs modifications) ajustées sur des points fixes, avec les meilleurs indicateurs de précision et de fiabilité possibles pour tous les points de contrôle
<b>Procédure:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Compensation libre de toutes les anciennes époques de mesure, détermination optimale des coordonnées de tous les points</li><li>• Evaluation de l'hypothèse des points fixes et choix judicieux de ceux-ci dans le système de référence retenu (analyse des points fixes)</li><li>• Comparaison sur plusieurs époques de mesure</li><li>• Calcul des coordonnées et des altitudes spécifiques des points de contrôle pour l'époque donnée ainsi que de leur précision et de leur fiabilité avec prise en compte du positionnement, resp. de la précision des points fixes</li><li>• Calcul des différences (coordonnées et altitudes), intervalles de confiance compris, et évaluation de leur signification à un niveau de confiance prédéfini</li></ul>

D'une manière générale, les mesures géodésiques de déformation ont pour but de saisir le comportement cinématique d'un ouvrage ou d'une portion de terrain au moyen de mesures «instantanées» réalisées à des époques différentes pour en déduire ses mouvements éventuels et les décrire sous une forme appropriée. Les questions entourant le comportement cinématique à étudier peuvent être variées. Les mouvements à relativement court terme (déformations réversibles) de l'ouvrage de retenue peuvent par exemple présenter de l'intérêt dans le cadre d'une variation du niveau de l'eau (à la hausse ou à la baisse) ou la stabilité à long terme de l'ouvrage doit être contrôlée à l'horizon de plusieurs décennies. Les questions posées influent également sur les conditions d'exécution des mesures. Toutes les conditions



susceptibles d'exercer une influence (comme le niveau de la retenue ou les températures) pendant la mesure d'un état donné devraient rester aussi constantes que possible. De même, les paramètres qui ne nous intéressent pas (par exemple les températures) devraient varier le moins possible lors de la comparaison directe d'états différents (comme des niveaux d'eau différents).

Lors de la comparaison des états à plusieurs époques, la première étape consiste à vérifier la stabilité des points fixes. L'évaluation des points de rattachement ou des points fixes est généralement formulée sous forme de test d'une hypothèse statistique (hypothèse des points fixes). L'**analyse des points fixes** vise à évaluer les modifications éventuelles en planimétrie et en altimétrie de points supposés stables du point de vue de la géologie et du génie civil. On cherche ici les points de référence dont les coordonnées ne subissent pas de déplacements (significatifs) au fil des époques (toutes de préférence) et qui peuvent donc être considérés comme étant parfaitement stables.

La comparaison sur **plusieurs époques de mesure** est réalisée:

- (a) par superposition des réseaux compensés librement par époque de mesure à l'aide d'une transformation de Helmert (similitude) sur les points fixes choisis ou
- (b) par une compensation globale (multi-époques) de toutes les époques de mesure, libre ajustée / contrainte sur les points fixes choisis.

L'analyse soignée des points fixes revêt de l'importance dans la mesure où les séries de mesures géodésiques servant à surveiller des ouvrages de retenue s'étendent généralement sur plusieurs années, voire plusieurs décennies. Sur des périodes aussi longues, il est légitime de supposer que les points fixes peuvent aussi être sujets à des mouvements dus par exemple à des processus géologiques et tectoniques. La méthode d'exploitation doit donc en tenir compte et fournir une image des déplacements aussi proche que possible de la réalité, même si le nombre de points fixes stables est réduit.

Outre l'évaluation de nature purement géodésique, des aspects d'ordre géotechnique et relevant du génie civil sont aussi à considérer dans le cadre de l'hypothèse des points fixes, sans toutefois anticiper sur l'interprétation effective qui est du ressort des seuls experts. L'analyse des points fixes revêt une importance décisive pour l'étude des déformations dans son ensemble et requiert une grande expérience de la part du géodésien qui la conduit.

L'étape suivante de l'analyse des déformations consiste en la **détermination précise des coordonnées** (planimétrie et altitudes) à chaque époque pour tous les points de contrôle durablement matérialisés sur l'ouvrage et sur le terrain (points-objets). Les coordonnées calculées des points de contrôle sont à considérer comme des indications relatives par rapport aux points fixes sélectionnés. Outre les coordonnées recherchées, la compensation fournit également un large éventail d'informations supplémentaires revêtant une grande importance pour l'analyse des déformations et l'évaluation de la qualité des mesures:

- la précision sous la forme d'écart-types empiriques (erreurs moyennes) et d'ellipses d'erreur moyenne: valeurs absolues par rapport aux points fixes, relatives entre les nouveaux points à la même époque ou à des époques différentes
- les rectangles de fiabilité
- l'estimation de la précision atteinte pour les différents types d'observations (estimation des composants de la variance).

La précision a posteriori de la détermination des points dépend non seulement de la qualité des instruments mis en œuvre et de la configuration du réseau, mais aussi du choix des points fixes et de leur stabilité.

L'analyse des déformations vise enfin à déterminer et à représenter les mouvements des points de contrôle et des points-objets, c.-à-d. les écarts en planimétrie et en altimétrie, calcul

de leur précision compris, sur une ou plusieurs périodes (différence entre deux époques). Il s'agit de vérifier ici si les écarts décelés sur les coordonnées ou les altitudes sont significatifs pour un **niveau de confiance donné** (par exemple 95% ou 99%) et sont donc à considérer comme des modifications réelles ou s'ils ne sont dus qu'à des imprécisions sur les observations. Les ellipses d'erreur relatives entre les déterminations des points de contrôle à deux époques de mesure différentes sont calculées à cette fin.

### A1.3. Documentation et archivage (rapport technique)

#### A1.3.1. Tâche assignée au rapport technique

<b>Objectif:</b>	Documentation des mesures exécutées et de leurs résultats
<b>Contenu:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Description complète des mesures réalisées (incluant les moyens mis en œuvre, les conditions de leur exécution, les méthodes d'exploitation, etc.) comme un élément constitutif de la surveillance à long terme</li><li>• Description, représentation et évaluation géodésique des résultats des mesures de déformation pour servir de base de travail aux experts</li></ul>

Le rapport technique relatif à une mesure de déformation géodésique poursuit deux objectifs principaux:

- Les travaux géodésiques exécutés doivent d'une part y être décrits en présentant les méthodes de mesure et d'exploitation retenues de manière **complète** et **aisément compréhensible (démarche logique facile à suivre)** dans la perspective des mesures futures. Le rapport doit comprendre des informations détaillées concernant l'état du dispositif de mesure, les moyens de mesure mis en œuvre et leurs caractéristiques respectives, les conditions d'exécution des mesures et les méthodes d'exploitation. C'est important parce que cela garantit non seulement la cohérence des séries de mesures successives, mais aussi celle des avis délivrés au terme de leur exécution au sujet des modifications touchant l'ouvrage de retenue ou ses abords. Public visé: ingénieur géomètre (géodésien).
- Il doit d'autre part fournir les résultats obtenus (via le recours aux techniques de mensuration) pour permettre d'**évaluer l'état et le comportement** de l'ouvrage. Le mandant ou l'ingénieur civil / l'expert compétent pour l'évaluation doit toujours être associé à la rédaction du rapport technique afin que ce dernier comporte toutes les informations requises sous la forme adéquate. Public visé: propriétaire de l'ouvrage, exploitant, experts (ingénieurs civil, géologues), autorité de surveillance.

En principe, les rapports techniques incluant l'ensemble des pièces jointes et des annexes doivent être conservés et archivés aussi bien par le propriétaire de l'ouvrage / son exploitant (mandant) que par le géodésien (mandataire). Des règles doivent aussi être fixées pour assurer la disponibilité à long terme (stockage, archivage) des mesures et des résultats sous forme numérique. Deux problèmes doivent être résolus ici: celui du stockage physique des données (supports sur lesquels les données sont enregistrées) et celui de la garantie de leur traitement à l'avenir (lisibilité des formats de données, pérennité des systèmes d'exploitation et des logiciels). L'état de l'ouvrage et ses modifications au fil du temps devraient pouvoir être suivis depuis sa mise en service, si bien que le retraitement a posteriori de mesures réalisées antérieurement pourrait revêtir un grand intérêt.



### A1.3.2. Contenu et forme des rapports techniques (pièces jointes et documentations incluses)

<b>Objectif:</b>	Rapport complet et compréhensible portant sur les mesures géodésiques et les résultats de l'analyse des déformations éventuelles
<b>Contenus:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Introduction et mandat</li><li>• Etat du dispositif de mesure</li><li>• Description des mesures</li><li>• Exploitation et analyse des déformations éventuelles</li><li>• Description et évaluation géodésique des résultats (différences ou déplacements en planimétrie et en altimétrie) et de leurs précisions respectives</li><li>• Résumé et conclusions</li><li>• Annexes, pièces jointes (tableaux, plans, évtl. extraits de l'exploitation)</li></ul>

Les chapitres suivants font partie du contenu recommandé du rapport technique:

- Introduction et mandat
  - Brève présentation du mandat (mandant, date et numéro du mandat)
  - Historique rapide du dispositif de mesure
  - Mesures exécutées jusqu'alors
- Dispositif de mesure
  - Pour de nouveaux ouvrages de retenue: description du dispositif et du concept de mesure, documentation des points de référence et de contrôle
  - Etat du dispositif de mesure (repérages manquants et insuffisants), dommages éventuellement subis, entretien
  - Travaux préparatifs
- Description des mesures de l'époque de mesure considérée
  - Direction, personnel, auxiliaires
  - Description des méthodes de mesure / des instruments et des accessoires utilisés (numéros des instruments et des mires compris), indication des précisions associées, dernière vérification des instruments, valeurs d'étalonnage et de calibration
  - Programme de mesure (déroulement des travaux) avec dates prévues pour la réalisation des mesures géodésiques et ampleur de ces dernières
  - Conditions d'exécution des mesures (conditions météorologiques, cotes de la retenue, température des parois, autres conditions environnementales importantes)
  - Autres mesures «non-géodésiques» utilisées pour l'exploitation (comme la position de pendules)
  - Spécificités de la mesure actuelle par rapport aux «mesures standard» (événements particuliers)
  - Expériences (importantes pour la mesure suivante)
- Exploitation et analyse des déformations éventuelles
  - Description des méthodes d'exploitation / de compensation et des logiciels employés
  - Systèmes et cadres de référence géodésiques (systèmes de coordonnées)

- Traitements préliminaires réalisés, comme l'exploitation de nivellements ou de mesures GNSS
  - Mises au net des données mesurées et valeurs d'étalonnage, de calibration et de correction apportées (renvois éventuels vers les annexes ou des pièces jointes)
  - Compensation de réseau libre par époque de mesure
  - Indications concernant les précisions et les domaines d'erreur / fiabilités a priori et a posteriori
  - Hypothèse / analyse des points fixes et choix des points fixes, hypothèses éventuellement prises en compte
  - Compensation (multi-époques) contrainte sur les points fixes ou compensation libre globale suivie d'un positionnement sur les points fixes (points de calage) au moyen d'une transformation de Helmert
  - Description des transformations éventuellement effectuées (système de coordonnées local, propre à l'ouvrage)
- Résultats
- Calcul des écarts en planimétrie et en altimétrie
  - Description et évaluation géodésique des résultats obtenus, incluant l'évaluation de la précision (au niveau de confiance retenu) et la discussion portant sur la signification des différences constatées en planimétrie et en altimétrie
  - A propos de la terminologie: on parle d'«écarts en planimétrie ou en altimétrie» lorsque les déplacements ou les déformations ne sont que présumés et que leur signification n'est pas encore avérée; on parle de «déplacements en planimétrie» et de «modifications d'altitude» lorsque leur signification est avérée
  - Description des pièces jointes et des annexes graphiques et numériques contenues dans le rapport
  - Mise en évidence des faiblesses ou des insuffisances de la mesure actuelle
  - Evocation de phénomènes particuliers (sans fournir d'interprétation -> du ressort des experts)
  - Indications concernant éventuellement la sauvegarde et l'archivage des données
- Résumé et conclusions
- Récapitulation des résultats principaux / des enseignements majeurs de la mesure
  - Points en suspens (concernant l'entretien du dispositif de mesure) et indications importantes pour la mesure et l'exploitation / analyse suivantes
  - Proposition d'une date pour la prochaine mesure

### A1.3.3. Représentation des résultats de mesure

<b>Objectif:</b>	Représentation claire des résultats en vue de leur interprétation
<b>Contenu:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Plan du dispositif de mesure, plans des réseaux</li><li>• Plans des déplacements en planimétrie et des modifications d'altitude</li><li>• Description et éventuellement tableaux, plans techniques et photos</li></ul>

Le rapport technique doit comprendre l'ensemble des résultats nécessaires à l'interprétation du comportement de l'ouvrage, présentés sous une forme graphique et numérique claire. Les tableaux d'une certaine ampleur (listes de coordonnées, différences de coordonnées, précisions, fiabilités, etc.) figurent généralement en annexe, les plans étant joints au rapport.



Les (différences de) coordonnées doivent être exprimées dans le système géodésique de référence d'ordre supérieur (système des coordonnées nationales) et éventuellement dans un système local pertinent (par exemple le long du barrage et perpendiculairement à lui), de manière à en faciliter l'interprétation.

Les fichiers de programmes longs de plusieurs pages ne doivent pas figurer dans le corps du rapport technique; ils doivent être repoussés en annexe, intégrés dans une pièce jointe ou remis sous forme numérique.

Par principe, tout résultat numérique (tel que des coordonnées, des déplacements) doit toujours se voir associer une indication de précision. Il est courant de la présenter sous la forme d'une erreur moyenne (une dimension, cas du nivellement par exemple), d'une ellipse d'erreur moyenne (deux dimensions) ou d'un ellipsoïde d'erreur (trois dimensions); au besoin, ces indications peuvent également être converties en précisions / zones de signification dans les directions des axes de coordonnées.

Les **représentations du dispositif de mesure** (plans du réseau, vues en plan, projections, coupes) doivent intégrer des informations topographiques d'arrière-plan utiles à leur bonne compréhension ainsi que l'ouvrage de retenue lui-même et les autres constructions importantes. Le réseau de coordonnées, la direction du nord, l'échelle et une barre d'échelle doivent aussi y figurer. Dans certains cas, des photos peuvent également fournir de précieuses informations concernant l'état du dispositif ou l'exécution des mesures. Les croquis techniques et les plans de détail peuvent en outre constituer des documents importants, notamment pour les nouveaux ouvrages de retenue.

L'échelle du plan et celle des cheminements de vecteurs figurés doivent être indiquées sur les **plans des déplacements en planimétrie et des modifications d'altitude**, au même titre que les barres d'échelle correspondantes et la grille des coordonnées locales. Un codage clair des couleurs doit être retenu pour les cheminements de vecteurs indiquant les modifications au fil des époques successives. D'ordinaire, les modifications en planimétrie et en altimétrie sont représentées en vraie grandeur sur les plans. L'idée sous-jacente est que les déplacements dont la taille est inférieure à la résolution graphique ne sont généralement pas significatifs. Une représentation à une échelle plus grande ( $x : 1$ , où  $x > 1$ ) incite par ailleurs à «surinterpréter» les modifications en planimétrie et en altimétrie: elles sont alors perçues comme étant plus importantes qu'elles ne le sont réellement. Une représentation à une échelle réduite peut donc se révéler judicieuse en cas de déplacements marqués en planimétrie et en altimétrie.

Les plans doivent présenter clairement les **domaines d'erreur des résultats** (coordonnées et altitudes, resp. différences calculées). Il est rarement judicieux de faire figurer les ellipses d'erreur associées à tous les points sur la représentation graphique, mieux vaut se limiter à un nombre réduit d'ellipses d'erreur «types». La lisibilité s'en trouve considérablement accrue.

Les représentations particulières des modifications de l'ouvrage ou de certaines portions de terrain spécifiques doivent toujours être générées en accord avec le mandant et/ou les experts. Elles peuvent se rapporter à des époques de mesure données ou couvrir l'intégralité de la période de surveillance (depuis la première mesure). Des graphiques spéciaux (suivi des déplacements au fil du temps) sont également envisageables.

Au besoin, les séries de mesures géodésiques peuvent être combinées avec des informations, des mesures ou des résultats non géodésiques au sein de tableaux et/ou de graphiques.





## A2. Modèle de cahier des charges

XXXXXXXXX XXXXXXXX SA

**Barrage XXXXXXXXX**

# Mesures de déformations géodésiques Appel d'offres (Exemple de cahier des charges)

## Mise en soumission des travaux de géodésiens

Le soumissionnaire .....

.....

.....

.....

.....

Le soumissionnaire déclare avoir pris connaissance des conditions ci-dessous et soumettre son offre en fonction de celles-ci.

Lieu et date:

le soumissionnaire:  
(Cachet et signature)

.....

.....



## A. Généralités

### A1. Mise en soumission

- a) Mandataire xxxxxxxxx xxxxxxxx SA  
Hauptstrasse 99  
9999 Ortlikon
- b) Mandat Mesures géodésiques de déformation  
du barrage XXXXXXXXXXXX
- c) Titre mesures géodésiques
- d) Procédure sur invitation
- e) Délais d'exécution Remise de l'offre : xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx  
Décision d'adjudication : xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx  
Exécution des mesures géodésiques à partir de xxxxxxxxxxxx
- f) Adresse de destination xxxxxxxxx xxxxxxxx SA  
Hauptstrasse 99  
9999 Ortlikon  
Tel. ++41 nn nnn nn nn  
Fax ++41 nn nnn nn nn

### A2. Délais

- a) Date limite de soumission dd. mm. yyyy (cachet de la poste faisant foi)
- b) Validité de l'offre 6 mois à partir du délai de remise
- c) Décision d'adjudication dd. mm. yyyy

### A3. Langue de l'offre

L'offre est à rédiger en langue française.



#### **A4. Visite**

Une visite du site peut être organisée en accord avec le mandataire.

#### **A5. Indications du soumissionnaire**

Elles sont à faire au chap. C « indications du soumissionnaire »

#### **A6. Communauté de mandataires**

La formation d'une communauté d'ingénieurs est autorisée.

#### **A7. Offres complémentaires**

Des offres complémentaires d'un soumissionnaire ne sont pas acceptées.

#### **A8. Questions au sujet de la mise en soumission**

Les questions au sujet de la mise en soumission peuvent être adressées par écrit jusqu'au dd. mm.yyyy. Les questions posées et leurs réponses seront communiquées à tous les soumissionnaires.

#### **A9. Etendue des travaux**

Les chapitres B et D donnent un aperçu des travaux à exécuter. Le mandataire se réserve le droit de diminuer ou d'augmenter l'étendue des travaux.

#### **A10. Règlementation SIA des honoraires**

Les dispositions de la règlementation SIA 103/2003 sont applicables aussi longtemps que les documents d'appels d'offres présentés ne le spécifient pas différemment.

#### **A11. Droit de contrôle du mandataire**

Le mandataire a en tout temps le droit de contrôler ou de faire examiner les travaux géodésiques et d'examiner les documents correspondants par exemple les protocoles de mesure ou d'exiger une copie de ceux-ci.



## A12. Droits et publications

Tous les droits au sujet des résultats des mesures géodésiques sont attribués au maître de l'ouvrage. Des publications doivent recevoir l'accord du maître de l'ouvrage.

## A13. Recours à des tiers

Les travaux qui ne peuvent pas être effectués par le soumissionnaire mais qui doivent être confiés à un sous-traitant doivent être expressément autorisés par le maître de l'ouvrage.

## A14. Utilisation des installations de mesure par des tiers

Le maître de l'ouvrage a en tout temps le droit de mandater des travaux de mesures géodésiques sur les installations de mesure.

## A15. Changements de personnel

Le chef de projet et son remplaçant ne peuvent être remplacés dans leur fonction par d'autres personnes qu'avec l'accord du maître de l'ouvrage.

## A16. Changements dans l'instrumentation

Le mandataire informe le maître de l'ouvrage sans délai des changements touchant l'instrumentation utilisée. Ces changements doivent recevoir l'approbation du maître de l'ouvrage.



---

## **B. Contenu et cadre du mandat**

### **B1. Indications générales pour le mandat**

.....

### **B2. Problématique**

.....

### **B3. Projet**

.....



## C. Exigences pour le soumissionnaire

### C1. Généralités sur les mesures géodésiques de déformations

Les mesures géodésiques de déformation représentent des travaux de géomètres spécifiques. Le haut degré de précision et de certitude imposent l'engagement d'une instrumentation adéquate et l'utilisation de méthodes de mesure particulières. La recherche à éviter toute erreur systématique représente une grande influence et nécessite un contrôle périodique de l'instrumentation.

Des mesures de déformations géodésiques sont à réaliser seulement avec des méthodes de mesure et des méthodes de calcul éprouvées et fiables. Elles ne doivent en aucun cas être effectuées avec des techniques expérimentales.

### C2. Indications du soumissionnaire

<b>Nom du soumissionnaire:</b>			
Année de fondation:			
Adresse:			
Téléphone et fax:	Tél.:	Fax:	
e-mail:			
Nombre total de collaborateurs: Nombre d'ingénieurs géomètres Formation des collaborateurs:	EPF/Uni :	HES:	Apprentissage:
Direction technique: Direction commerciale: Chef de projet:			
Assurance qualité:			
<b>Un organigramme de la structure de la société est à adjoindre aux documents de soumissions</b>			



### C3. Indications sur l'assurance responsabilité civile

Société d'assurance :

Montant de la couverture :

Franchise :

### C4. Travaux présentés en référence

<b>Objet de référence n° 1</b>	
Nom de l'objet :	
Maître de l'ouvrage / mandant :	
Tâche / fonction du soumissionnaire :	
Personnel clé : direction de projet responsabilité	
Durée de la réalisation :	
Des informations complémentaires peuvent être obtenues chez le mandant :	

<b>Objet de référence n° 2</b>	
Nom de l'objet :	
Maître de l'ouvrage / mandant :	
Tâche / fonction du soumissionnaire :	
Personnel clé : direction de projet responsabilité	
Durée de la réalisation :	
Des informations complémentaires peuvent être obtenues chez le mandant :	



## C5. Engagement du personnel prévu

### C5.1 Chef de projet

<b>Nom, prénom :</b>	
Année de naissance :	
Formation :	
Langues :	
Actif dans la profession depuis :	
Fonction dans l'entreprise :	
Dans l'entreprise depuis :	
Engagement durant les deux dernières années :	

#### Objets de référence personnels

##### Objet n° 1

Nom :	
Entreprise :	
Genre de mesures de déformation :	
Durée de l'exécution :	
Engagement / fonction :	

##### Objet n°2

Nom :	
Entreprise :	
Genre de mesures de déformation :	
Durée de l'exécution :	
Engagement / fonction :	



## C5.2 Remplaçant du chef de projet

<b>Nom, prénom :</b>	
Année de naissance :	
Formation :	
Langues :	
Actif dans la profession depuis :	
Fonction dans l'entreprise :	
Dans l'entreprise depuis :	
Engagement durant les deux dernières années :	

### Objets de référence personnels

#### Objet n° 1

Nom :	
Entreprise :	
Genre de mesures de déformation :	
Durée de l'exécution :	
Engagement / fonction :	

#### Objet n° 2

Nom :	
Entreprise :	
Genre de mesures de déformation :	
Durée de l'exécution :	
Engagement / fonction :	

## D. Mesures géodésiques et traitement

### D1. Périmètre des mesures

.....  
*Au cas où d'autres types de mesures que ceux décrits sous D2 – D4 sont faits, par ex. des mesures GNSS, ils doivent être décrits de manière suffisamment détaillée.*

### D2. Mesures d'angles

L'expérience de l'observateur décide qu'est-ce qui sera mesuré, quand, où et comment. L'objectif des mesures est d'atteindre avec un minimum d'observations une précision d'observation correspondant à ce qui a été défini et une fiabilité suffisante. La prise en considération des conditions locales et des particularités atmosphériques lors de la prise des angles en planimétrie et en altimétrie a une grande importance. Des mesures avec ATR (localisation automatique de prisme) ne sont tolérées qu'en cas de conditions connues.

La mise en place des cibles a également une importance déterminante sur la qualité de la mesure d'angle. Elle est déterminante pour la qualité de la précision sur cible.

Les précisions à atteindre s'élèvent à:

- erreur moyenne simple de la précision de centrage  $\pm 0.1$  mm pour le centrage au moyen d'un plomb optique (nadirlot)  $\pm 0.2 - 0.3$  mm (selon la hauteur)
- Erreur moyenne simple de direction  $< \pm 0.2$  mgon ( $< \pm 2$ cc)
- Erreur moyenne simple d'angle vertical (Satzmittel)  $< \pm 0.3$  mgon ( $< \pm 3$ cc)

Du soumissionnaire pour l'emploi de l'instrumentation :

Théodolite de précision	: Type :	Nombre :
	: Type :	Nombre :
Cibles:	: Type :	Nombre :
	: Type :	Nombre :

### D3. Mesures de distance

L'utilisation de réflecteurs de précision avec constante additionnelle connue (erreur moyenne simple  $\pm 0.1$  mm) est une condition. Toutes les distances sont à mesurer (si possible) aller-retour.

La modélisation correcte des conditions atmosphériques est déterminante pour les mesures de distances et pour atteindre la précision attendue. L'expérience de l'observateur et des conditions météorologiques dominantes déterminent le nombre de points de mesure de la température.



Les précisions à atteindre et à justifier s'élèvent :

- Pour l'erreur moyenne simple de la précision de centrage à  $\pm 0.1$  mm pour le centrage optique au moyen d'un plomb optique de précision à  $\pm 0.2 - 0.3$  mm (selon l'altitude)
- Pour l'erreur moyenne simple de la mesure de distance  $< \pm 0.15$  mm + 1 ppm

L'utilisation de l'instrumentation suivante est prévue par le soumissionnaire :

Tachéomètre:	: Type:	Nombre:
	: Type:	Nombre:
Réfecteurs:	: Type:	Nombre:
	: Type:	Nombre:

#### D4. Nivellements

Les nivellements et les changements d'altitudes qui en résultent livrent des informations importantes sur le comportement d'un ouvrage d'accumulation.

Une petite fiabilité et une faiblesse du nivellement proviennent d'erreurs systématiques. Il est donc particulièrement important pour un nivellement d'exclure si possible toutes les influences systématiques (instruments, mires, mise en place, points de changement, etc...).

Pour l'observation de nivellements, les règles reconnues de l'Office fédéral de Topographie peuvent être appliquées. D'autres méthodes de mesure sont également possibles mais avec le justificatif correspondant et une discussion préalable.

Les précisions à atteindre et à justifier s'élèvent :

- Pour l'erreur moyenne simple pour chaque mise en station de l'instrument  $< \pm 0.15$  mm

L'utilisation de l'instrumentation suivante est prévue par le soumissionnaire :

Appareils de nivellement:	: Type:	Nombre:
	: Type:	Nombre:
Fils d'invar:	: Type:	Nombre:
	: Type:	Nombre:
	: Type:	Nombre:

## D5. Examen des instruments

L'ingénieur doit pouvoir être assuré que les moyens de mesure géodésiques suffisent à atteindre les exigences de précisions demandées. Il est donc du devoir du fournisseur de vérifier la conformité des instruments de mesure géodésiques engagés

Le soumissionnaire doit décrire l'examen de ses instruments et de ses composants (p. ex. les mires en invar, les antennes GNSS) et si besoin apporter les preuves des vérifications effectuées.

## D6. Interprétation

L'interprétation des données mesurées passe par un réseau libre, sans contraintes avec par la suite un positionnement avec des points fixes vérifiés, par exemple au moyen d'une transformation d'Helmert. Les erreurs moyennes à posteriori sont à examiner. Le soumissionnaire a à disposition les options des logiciels d'interprétation engagés (voir les chap. 2-d et 3-d) pour le faire de manière détaillée.

L'utilisation des logiciels suivants est prévue par le soumissionnaire :

:

Compensation:	:	Type:	Fournisseur:
	:	Type:	Fournisseur:
Transformations	:	Type:	Fournisseur:
	:	Type:	Fournisseur:

## D7. Rapport technique

Le rapport technique donne des renseignements détaillés sur la mesure réalisée et sur ses résultats et peut être subdivisé en chapitres comme suit :

1. Généralités
2. Installation de mesure
3. Mesure réalisée
4. Interprétation
5. Résultats et évaluation géodésique

Le rapport est à livrer en XX exemplaires ainsi que sous forme digitale dans un délai de 3 mois après la réalisation des mesures.



## D8. Documents à livrer

- Documentation des valeurs de mesure brutes dans un format lisible après la fin des mesures par le spécialiste.
- documentation complète de l'interprétation dans un format lisible pour le spécialiste.

## D9. Archivage des données de mesure et des documents

Toutes les mesures brutes et les mesures corrigées ainsi que toutes les informations complémentaires utiles à l'interprétation, comme les documents mentionnés sous D8, doivent être sauvegardés et archivés par le mandataire sous forme digitale et/ou analogique à long terme, ce qui veut dire au moins pendant la durée du contrat. Les mesures brutes doivent être sauvegardées dans un logiciel et un système d'exploitation dans un format standard.



## E. Offre

### E1. Conditions générales valables

.....

### E2. Offre pour mesure et interprétation

Le Maître de l'ouvrage est intéressé par une exécution des travaux de haute qualité et en même temps par une offre économiquement avantageuse. La norme SIA 103/2003 „Règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs civils » est à considérer comme un document de base.

### E3. Offre forfaitaire

L'offre forfaitaire suivante comprend l'ensemble des prestations pour les mesures, les coûts de transport et les frais, ainsi que les frais d'utilisation des instruments et des logiciels, des reproductions, et des travaux supplémentaires à cause du mauvais temps.

Montant forfaitaire CHF sans TVA

### E4. Travaux supplémentaires

Des travaux imprévus ou supplémentaires ne sont autorisés qu'après une discussion préalable avec le maître de l'ouvrage. Ils seront rémunérés selon le temps effectif, mais au maximum selon les tarifs KBOB valables, réglés selon la liste ci-dessous :

A	Fr.	/ h.
B	Fr.	/ h.
B/C	Fr.	/ h.
C	Fr.	/ h.
C/D	Fr.	/ h.
D	Fr.	/ h.
D/E	Fr.	/ h.
E	Fr.	/ h.
F	Fr.	/ h.
G	Fr.	/ h.
Apprenti	Fr.	/ h.



### A3. Définition des principales notions employées

**A priori / a posteriori:** lorsqu'un système de mesure est évalué, notamment en termes de précision et de fiabilité, une distinction est introduite entre les valeurs théoriquement attendues **avant** la compensation (a priori) et celles effectivement obtenues **après** la compensation (a posteriori), une fois les mesures exécutées.

**AGNES:** réseau GNSS automatique suisse (Automatisches GNSS Netz Schweiz, état en 2009). Il se compose de 31 stations GNSS en fonctionnement permanent, uniformément réparties sur le territoire national. Les données de mesure fournies par ces stations sont exploitées toutes les heures par l'Office fédéral de topographie (swisstopo) et combinées quotidiennement avec celles d'environ 50 stations GNSS en Europe et dans le reste du monde. Elles servent également de stations de référence pour le service de positionnement suisse swipos.

**Calcul de compensation:** il permet d'estimer un ou plusieurs paramètres inconnus à l'aide d'un ensemble de données mesurées. La compensation vise à ce que le paramètre inconnu s'adapte «au mieux» en minimisant les petites contradictions qui apparaissent inévitablement. Elle fournit ainsi la valeur la plus probable pour l'inconnue à déterminer. En géodésie, le calcul de compensation livre aussi des indications concernant les précisions atteintes, en plus de l'estimation usuelle des coordonnées.

**Calibration:** détermination des erreurs systématiques d'un instrument.

**Compensation libre et contrainte:** le calcul de compensation est une méthode d'optimisation mathématique permettant de déterminer (ou d'«estimer») les paramètres inconnus d'un modèle géométrique-physique ou ceux d'une fonction prédéfinie à l'aide d'un ensemble de données mesurées. La compensation vise à ce que le modèle final ou la fonction définitive s'adapte «au mieux» aux données et aux petites contradictions qui apparaissent inévitablement. Dans une compensation libre, on part du principe que les points fixes utilisés sont exempts de toute erreur. Ce résultat est généralement obtenu en n'intégrant que le nombre minimal de points fixes requis. Ainsi, aucune contrainte n'est transmise «de l'extérieur» (autrement dit par le biais d'erreurs sur les points fixes) aux coordonnées compensées des points de contrôle. Dans le cas d'une compensation contrainte en revanche, les erreurs dont les points fixes (toujours considérés comme étant exempts de toute erreur) sont éventuellement entachés ou les contraintes s'exerçant sur eux sont intégralement reportées sur les coordonnées compensées.

**Corrélation:** elle décrit la relation linéaire existant entre des variables statistiques (deux ou plus). En géodésie, on entend par corrélation le degré de dépendance de différentes observations entre elles. Ainsi, deux mesures d'une même dénivelée effectuées à la suite l'une de l'autre sont fortement corrélées (en raison, notamment, des conditions météo identiques régnant lors de leur exécution, etc.)

**Déformations:** causes pouvant provoquer des modifications en planimétrie et/ou en altimétrie. Il incombe à l'ingénieur civil de déterminer les causes des modifications décelées et d'apprécier leur influence sur la sécurité des installations. Les déformations de l'ouvrage ou de son sous-sol peuvent être dues à la présence de sources, à des variations de température (d'où des sollicitations différentes de l'ouvrage), etc.



**Déplacements:** causes pouvant provoquer des modifications en planimétrie et/ou en altimétrie. Il incombe à l'ingénieur civil de déterminer les causes des modifications décelées et d'apprécier leur influence sur la sécurité des installations. Les déplacements de l'ouvrage ou de son sous-sol peuvent être dus à des tassements, à des glissements, à la formation de fissures, etc.

**Déplacements en planimétrie et modifications d'altitude:** différences de coordonnées entre époques, lorsque leur signification au niveau de confiance choisi a été prouvée. La géodésie a pour tâche principale de déterminer de telles modifications en planimétrie et en altimétrie. Lorsque les différences ne sont pas significatives, on parle d'écarts en planimétrie et en altimétrie.

**Déviation de la verticale et cotes du géoïde:** on appelle déviation de la verticale en un point de mensuration l'angle entre la direction effective de la verticale et la normale à l'ellipsoïde de référence utilisé pour la compensation. La cote du géoïde est l'écartement existant entre cet ellipsoïde de référence et le géoïde, ce dernier étant assimilable au niveau moyen des mers prolongé sous les continents.

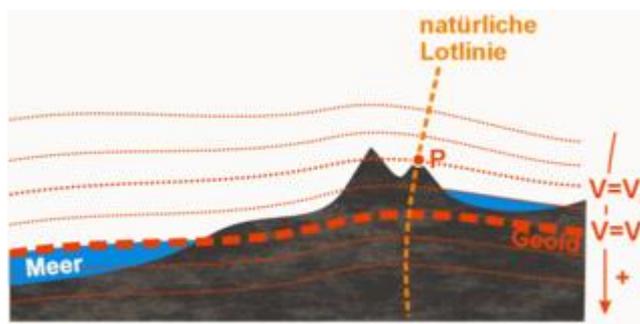


Figure A3.1: Déviation de la verticale et cote du géoïde

**GNSS:** systèmes mondiaux de navigation par satellites (Global Navigation Satellite Systems); cette abréviation générique regroupe des systèmes de mesure et de navigation tels que le GPS (Global Positioning System) américain, le système russe GLONASS ou le système européen GALILEO de même que leurs extensions, basées par exemple sur des satellites géostationnaires.

Dans les réseaux géodésiques dédiés à la surveillance d'ouvrages de retenue, les mesures GNSS servent surtout à contrôler la stabilité des points de référence et à assurer la liaison entre les réseaux locaux et des points de référence situés à une certaine distance, le cas échéant dans d'autres zones géologiques (cf. exemples présentés à l'annexe A4). La précision des mesures GNSS dépend fortement

- des instruments et des antennes mis en œuvre ou de la qualité des valeurs de calibration,
- du niveau d'adéquation des points et des stations du réseau pour les mesures de ce type (horizon dégagé, trajets multiples, perturbations des signaux),
- du nombre de satellites disponibles et de leur constellation,
- de la durée des mesures et éventuellement de l'heure à laquelle elles sont réalisées,
- de la distance et de la dénivelée entre les stations de mesure ou vers les stations de référence et enfin
- du logiciel d'exploitation.

Si les mesures (à l'aide de récepteurs et d'antennes géodésiques multifréquence dûment contrôlés) et l'exploitation des données sont effectuées avec soin, alors la précision relative entre points en planimétrie (1 sigma) peut atteindre 1 à 3 mm. En

altimétrie, les imprécisions de mesure sont environ trois fois plus grandes qu'en planimétrie.

**Mesure électronique de la distance**, aussi appelée mesure électro-optique de la distance: c'est une méthode de mesure indirecte de la distance, puisqu'elle est déduite du temps mis par un signal acoustique, radio ou lumineux pour parcourir le trajet recherché (mesure du temps de vol).

**Méthode des moindres carrés** (appelée *least squares method* en anglais): il s'agit de la méthode mathématique standard pour procéder à un calcul de compensation sur la base de valeurs approchées. Elles doivent permettre, par itérations, de minimiser la somme des carrés des résidus (on appelle résidu l'écart entre une observation effective et sa valeur compensée). On estime que cette condition est satisfaite lorsque la différence par rapport à l'itération précédente est inférieure à un seuil prédéfini.

**Points de contrôle (aussi appelés points de l'ouvrage ou points-objets)**: ils sont matérialisés durablement (dans toute la mesure du possible) sur l'ouvrage de retenue ou sur le terrain à surveiller (par exemple dans la roche) et sont mesurés par rapport aux points de référence. Ils doivent être aussi représentatifs que possible pour les déplacements et les déformations de l'ouvrage et des portions de terrain à déceler.

**Points de mesure** : cf. points de contrôle ou points de l'ouvrage / points-objets.

**Points de référence (aussi appelés points fixes)**: les déplacements et les déformations de l'ouvrage de retenue sont déterminés par rapport à des points de référence sélectionnés avec soin et matérialisés durablement, stables et non soumis aux éventuels mouvements subis par les objets à contrôler. Les coordonnées et/ou les altitudes des points de référence doivent être connus dans le cadre de référence choisi ou doivent pouvoir y être définies avec précision. Il n'est pas indispensable de pouvoir stationner les points de référence. S'ils peuvent être jugés comme étant fixes sur la base d'une analyse appropriée conduite sur deux époques de mesure ou plus (coordonnées restant a priori identiques) et contribuent ainsi à déterminer le positionnement du réseau géodésique, alors on parle de points fixes.

**Points fixes (cf. points de référence)**

**Précision et fiabilité** : la précision est une appréciation qualitative du degré de rapprochement entre un résultat et sa valeur vraie. La précision ou l'erreur moyenne selon cette définition tient donc compte des écarts aléatoires et de ceux de nature systématique éventuels. La notion de fiabilité est à interpréter comme une mesure de la qualité du contrôle des observations réalisées par l'ensemble des autres observations. Son sens est donc le même que dans le langage courant : digne de confiance, vérifié, sûr.

**Précision interne et externe** : la précision interne désigne la précision avec laquelle une mesure ou une détermination de coordonnées peut être répétée, les conditions dans lesquelles elle se déroule restant identiques; les défauts de positionnement ou de configuration éventuels d'un réseau géodésique (comme une erreur d'échelle) ne sont notamment pas pris en compte. La précision externe ou exactitude (correspondant à l'écart séparant l'espérance mathématique de la valeur vraie) tient compte, en revanche, de possibles variations dans les conditions de mesure, dues par exemple au recours à d'autres instruments.



**Réfraction atmosphérique** : on entend généralement par réfraction la déviation subie par un rayon lumineux (d'une onde plane) au passage d'un milieu dans un autre. Cette déviation est due à la modification locale de la vitesse de propagation de la lumière. En géodésie, des inhomogénéités au niveau des couches d'air traversées (conditions de température) peuvent provoquer des anomalies de réfraction, notamment en cas de visée rasante sur une partie ou la totalité de son trajet.

**Réseaux de mesure étendus**: ils servent généralement à obtenir des informations complémentaires et plus détaillées sur le comportement du barrage et/ou de ses abords. Ils sont par exemple mis en place lorsqu'une menace supplémentaire pèse sur l'ouvrage ou lorsque le réseau géodésique existant ne satisfait plus les exigences posées.

**Réseaux de mesure hybrides**: dans les réseaux de ce type, les méthodes géodésiques classiques (mesures d'angles et de distances, nivellements, etc.) sont complétées par des méthodes plus récentes telles que le GNSS ou encore par des mesures relevant de la géodésie physique (par exemple des mesures gravimétriques, etc.)

**Réseau interne et externe**: la fixation de la limite entre les réseaux interne et externe dépend du choix des points fixes ou de la définition du cadre de référence:

- **réseau interne**: réseau ou système de mesure visant à déterminer les mouvements relatifs (déplacements ou déformations) au sein même de l'ouvrage de retenue;
- **réseau externe**: réseau ou système de mesure permettant la détermination de déplacements par rapport à des points fixes «absolus» (dans le cadre de référence sélectionné).

**Système et cadre de référence**: un système de référence (géodésique) définit (de façon théorique) un système de coordonnées dans l'espace. Il comprend notamment des indications portant sur l'origine, les directions des axes de coordonnées et leur échelle (définition du mètre en général) ainsi que sur les dimensions et la position d'éventuelles surfaces de référence (telles qu'un ellipsoïde de référence). Le cadre de référence désigne quant à lui la réalisation (concrète) d'un système de référence (jeux de coordonnées de points effectifs déterminés à l'aide d'observations). Exemple: nouveau système de référence de la Suisse CH1903+ / cadre de référence associé MN95. Toutefois, il est également possible de définir des systèmes et des cadres de référence purement locaux, généralement liés à l'«axe du barrage».

**Transformation de Helmert**: ainsi baptisée en hommage au géodésien et mathématicien Friedrich Robert Helmert, elle permet la conversion de coordonnées cartésiennes tridimensionnelles; en géodésie, elle est fréquemment utilisée pour passer sans déformation d'un système tridimensionnel à un autre. C'est donc une similitude. Elle peut également s'appliquer à des jeux de coordonnées à deux dimensions, voire à une seule dimension, de façon analogue au cas tridimensionnel.

**Zones de confiance**: l'intervalle de confiance d'un paramètre estimé, par exemple une coordonnée ou une différence de coordonnées, décrit la zone autour de la valeur fournie où se trouve sa vraie position avec un degré de probabilité donné; cet intervalle renseigne donc sur la signification de la valeur présentée.

Il existe différents niveaux de confiance prédéfinis en fonction de la force d'expression souhaitée. Le tableau suivant indique les facteurs (par lesquels multiplier les intervalles d'erreur standard) pour parvenir aux niveaux voulus dans le



cas de zones de confiance à une, deux ou trois dimensions d'une détermination isolée ainsi que dans le cas de la différence entre deux déterminations.



Niveau de confiance (probabilité)	Plage de valeurs (dimension = 1) intervalle		Position (dimension = 2) ellipse		Espace (dimension = 3) ellipsoïde	
	Originale	Différence	Position	Différence	Position	Différence
19,9 %	-	-	-	-	<b>1</b>	1,41
39,4 %	-	-	<b>1</b>	1,41	-	-
68,3 %	<b>1</b>	1,41	-	-	-	-
95,0 %	1,96	2,77	2,45	3,46	2,70	3,82
99,0 %	2,58	3,65	3,04	4,30	3,37	4,76

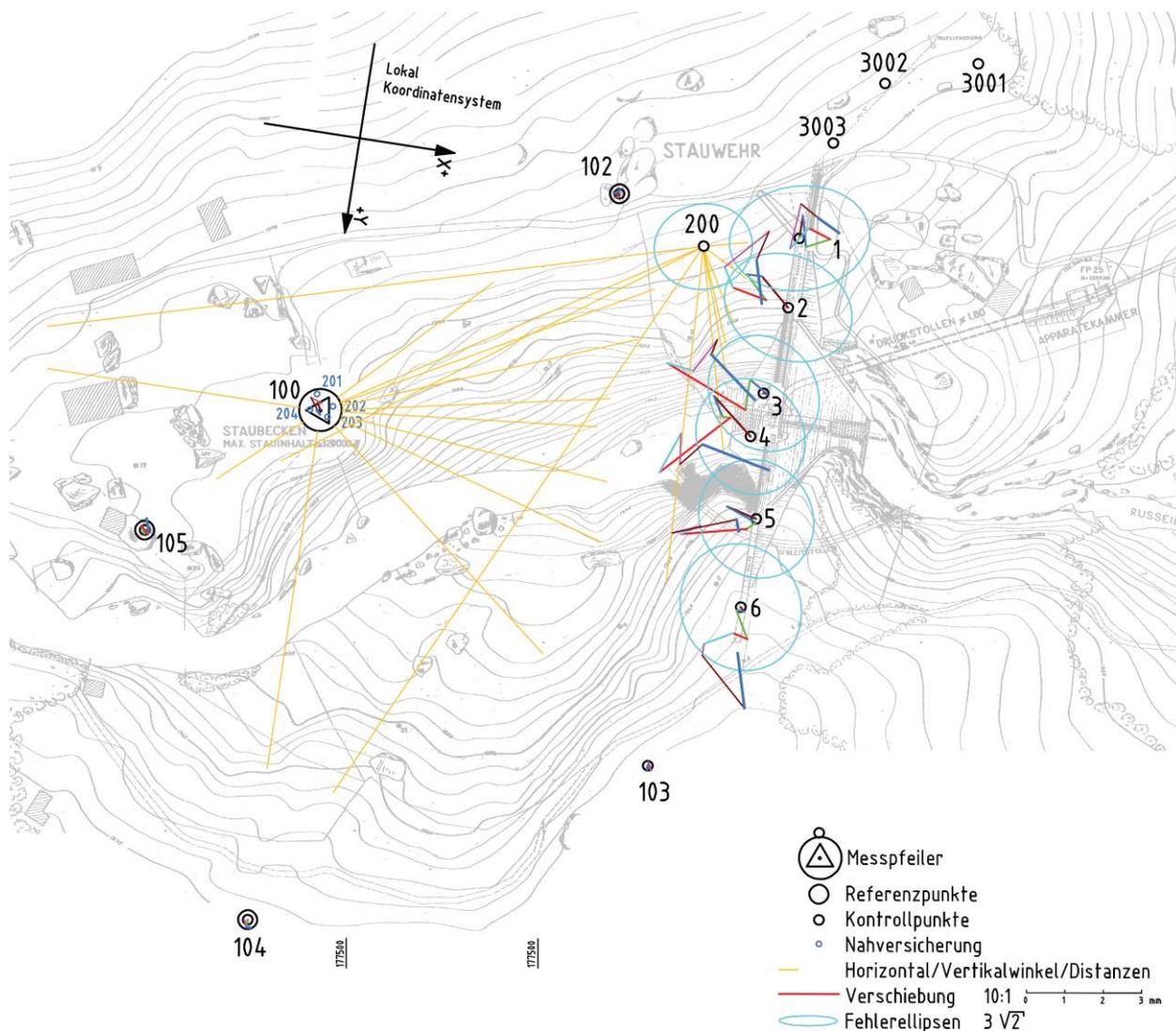
*Exemple de lecture:* l'ellipse d'erreur moyenne autour d'un point en planimétrie décrit sa position bidimensionnelle avec une probabilité de 39,4 %. Pour pouvoir décrire la différence entre deux déterminations réalisées à des époques différentes avec une probabilité de 95 %, les axes de l'ellipse d'erreur moyenne doivent être multipliés par 3,46; ils doivent être multipliés par 4,30 si la probabilité est de 99 %.



## A4. Exemples

### Réseau conventionnel simple dédié à la mesure annuelle des déformations d'un petit barrage-poids

(Représentation combinée du plan du réseau et des modifications en planimétrie)



Type de réseau: réseau de triangulation terrestre de faible étendue

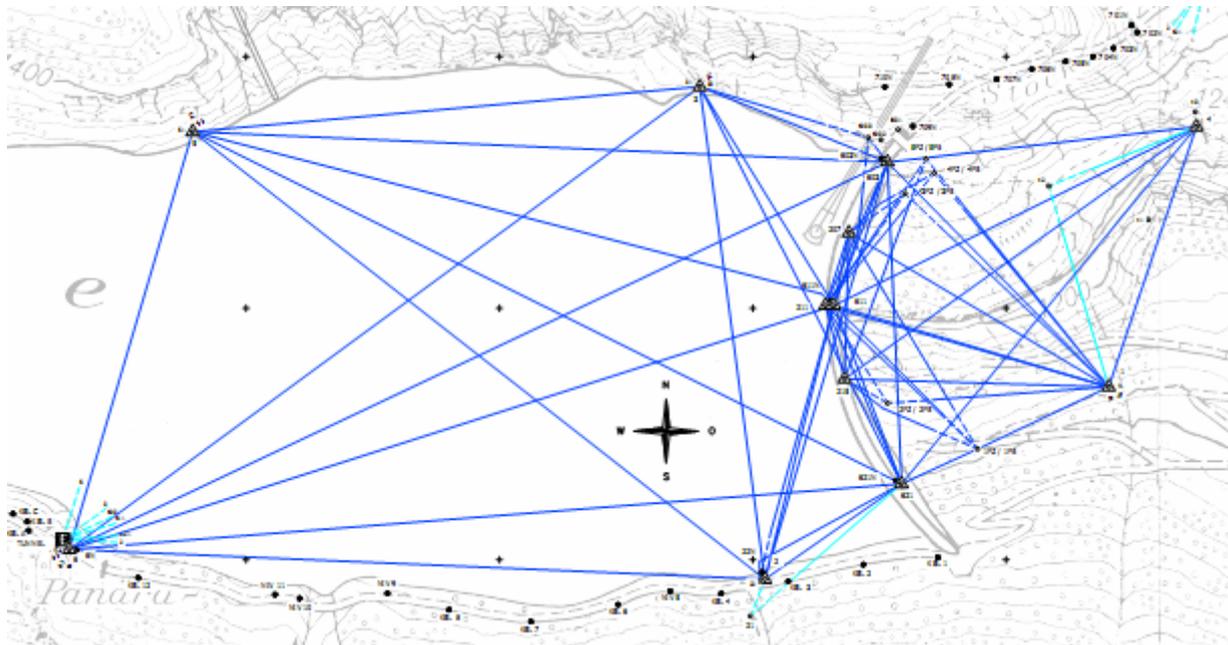
Matérialisation: 1 pilier de mesure, 5 repérages excentriques et 6 points de contrôle

Instruments utilisés: théodolite de précision Leica TDA5005

Fréquence du contrôle: 1 fois par an en automne

Compensation par la «méthode des moindres carrés»

## Réseau conventionnel d'un barrage-voûte de grande dimension



Type de réseau: réseau de triangulation terrestre classique (réseau d'ordre supérieur) combiné à un nivellement de précision le long de la route d'accès et sur le couronnement du barrage

Matérialisation: 12 piliers de mesure (avec des repérages excentriques pour certains d'entre eux) et 7 points supplémentaires sur le terrain ainsi qu'une trentaine de points de nivellement

Instruments utilisés: théodolite de précision Leica TDA5005, distance mètre de précision Mékomètre Kern ME5000, niveau de précision Leica DNA03 avec mires en invar étalonnées

Fréquence du contrôle: tous les 5 ans en règle générale

Observations utilisées dans le cadre de la compensation: environ 600 directions et angles verticaux ainsi que des distances

Précisions a posteriori ( $1\sigma$ ) des points sur le couronnement du barrage:

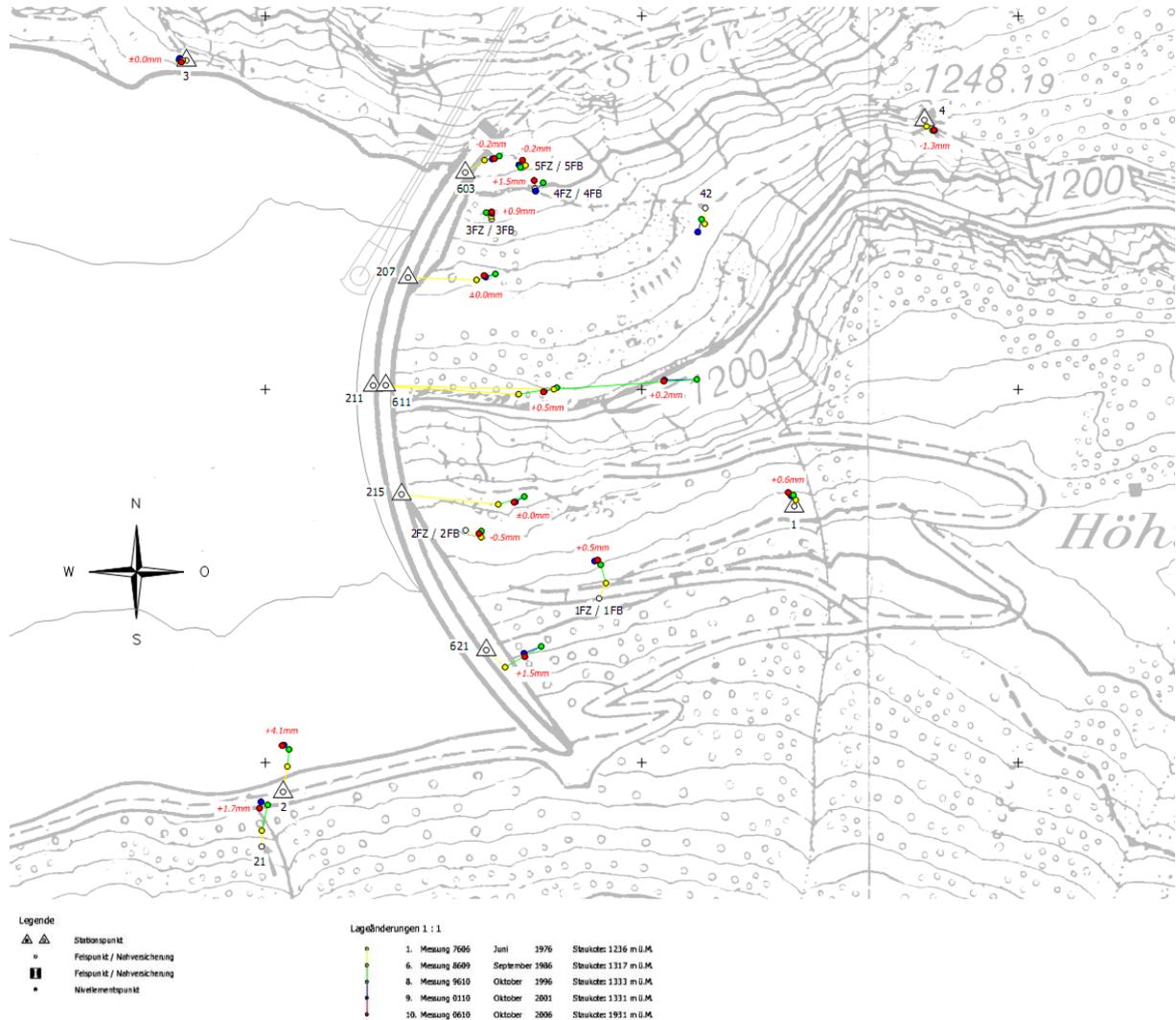
En planimétrie:  $\pm 0,3$  mm, en altimétrie:  $\pm 0,5$  mm

Réseau interne: polygonales (cheminements polygonométriques) et nivellements dans les galeries de contrôle

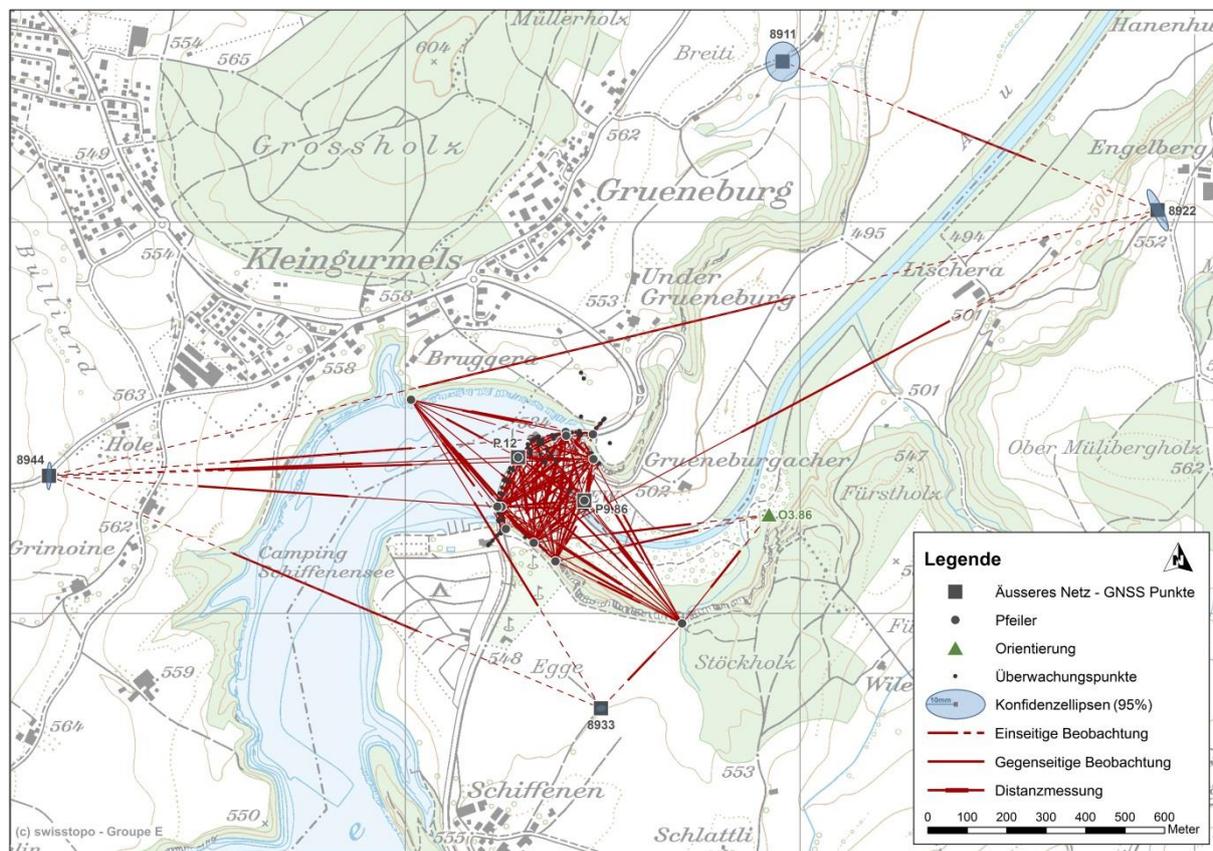
Liaison entre le réseau d'ordre supérieur et le réseau interne assurée par des visées nadirales / zénithales et un pendule, complétée par des mesures à la sortie de certaines galeries de contrôle



Représentation des modifications en planimétrie et en altimétrie:



## Réseau de mesure hybride: réseau de triangulation classique combiné à des observations GNSS (sur quatre points de référence et sur le couronnement du barrage)



Type de réseau: réseau de triangulation terrestre classique combiné à un nivellement de précision sur le couronnement du barrage et à son pied. Des mesures GNSS statiques servent à intégrer le réseau à un réseau-cadre comportant quatre points matérialisés de manière stable (8911-8944). Polygone supplémentaire incluant 26 points dans la galerie inférieure pour déterminer la position du fil de 8 pendules

Matérialisation: 8 piliers en béton, 3 piliers en acier sur le couronnement du barrage et 4 piliers en acier aux stations de référence GNSS. Les piliers en acier sont démontés à l'issue des mesures. 6 points supplémentaires sur le terrain (non stationnés) 29 cibles (chevilles) sur l'ouvrage, 47 points de nivellement

Instruments utilisés: théodolite de précision Leica TDA5005, distancemètre de précision Mékomètre Kern ME5000, niveau de précision Zeiss DiNi12 avec mires en invar étalonnées

Nombre d'observations par époque de mesure: 332 directions et 309 angles verticaux ainsi que 162 distances

Précisions a posteriori ( $1\sigma$ ) des points sur le couronnement du barrage: en planimétrie:  $\pm 0,3$  mm, en altimétrie:  $\pm 0,3$  mm; cibles (chevilles) sur l'ouvrage: en planimétrie  $\pm 0,5$  mm, en altimétrie:  $\pm 0,6$  mm