

PARTIE 3: APPAREILS ET METHODES DE MESURE

Table des matières

Niveau du plan d'eau

- 1.01 Balance à pression
- 1.02 Flotteur
- 1.03 Echelle limnimétrique
- 1.04 Manomètre
- 1.05 Sonde pneumatique
- 1.06 Sonde à ultrasons
- 1.07 Sonde de pression
- 1.08 Câble avec témoin sonore ou lumineux

Niveau du dépôt des sédiments

- 1.09 Mesure de profondeur d'eau

Température de l'air et de l'eau

- 1.10 Thermographe
- 1.11 Thermomètre normal
- 1.12 Thermomètre électrique

Température dans le béton

- 1.13 Thermomètre normal
- 1.14 Thermomètre électrique
- 1.15 Capteurs distribués de température à fibres optiques

Précipitations

- 1.16 Pluviomètre / Pluviomètre totalisateur / Pluviographe

Contraintes dans les remblais et dans le béton

- 1.17 Mesure de la pression des terres

Mesure du déplacement spatial des points

- 2.01 Triangulation
- 2.02 Mesures assistées par satellites (GPS)
- 2.03 Photogrammétrie
- 2.04 Laser-Scanning

Déformées le long de lignes horizontales ou verticales

- 2.05 Nivellement
- 2.06 Mesure simple d'angles et mesure de distances électro-optique
- 2.07 Alignement optique
- 2.08 Polygonale
- 2.09 Pendule, pendule inversé
- 2.10 Alignement par fil
- 2.11 Repère de tassement vertical
- 2.12 Repère de tassement hydraulique

Variation de longueur

- 2.13 Distomètre / Distinvar

Variation de longueur et déformée le long de lignes de forages

- 2.14 Extensomètres à tiges et à fils
- 2.15 Extensomètre à tiges pour barrage en remblai
- 2.16 Extensomètre fibre optique
- 2.17 Micromètre de forage / Micromètre de forage avec inclinomètre
- 2.18 Inclinomètre

Variation de rotations locales

- 2.19 Clinomètre / Tiltmètre

Mouvement de fissures et de joints

- 2.20 Micromètre / Déformètre / Dilatomètre / Déflectomètre

Déformation ponctuelle

- 2.21 Déformètre électrique noyé dans le béton
- 2.22 Fibre-optique noyée dans le béton (voir feuille 2.15)

Débit des eaux d'infiltration et de drainage

- 3.01 Mesure volumétrique avec récipient taré et chronomètre
- 3.02 Déversoir / Canal de mesure
- 3.03 Mesure du flux dans des tubes
- 3.04 Mesure du flux dans des tubes partiellement remplis

Pression de l'eau dans le rocher

- 3.05 Piézomètres: systèmes ouverts
- 3.06 Piézomètres: systèmes fermés
- 3.07 Piézomètres: cellules de pression (pneumatique ou électrique)

Pression de l'eau dans les matériaux meubles

- 3.08 Piézomètres: systèmes ouverts
- 3.09 Piézomètres: systèmes fermés
- 3.10 Piézomètres: cellules de pression (hydraulique, pneumatique et électrique)

Relevé des modifications physiques ou chimiques

- 3.11 Turbidimètre
- 3.12 Analyse chimique

Méthodes géophysiques

- 4.01 Sismique réflexion, sismique réfraction, géoélectrique, électromagnétique, géoradar, géomagnétique, gravimétrie, tomographie sismique, ultrason, relevé infrarouge, dia-graphie

Inspection par caméra

- 4.02 Robot sous-lacustre muni d'une caméra
- 4.03 Caméra dans un forage

Caractéristiques des bétons

- 4.04 Scléromètre (Marteau de Schmidt)
- 4.05 Essais en laboratoire

Détection des circulations d'eau

- 4.06 Mesure des variations de température en raison des percolations

Divers

- 5.01 Contrôle des ancrages



Niveau du plan d'eau

BALANCE A PRESSION

1. Principe de mesure

Par la mesure de la pression hydrostatique, cet appareil permet de déterminer le niveau du plan d'eau de la retenue. La traditionnelle balance à pression mécanique est de plus en plus remplacée par un capteur à quartz.

2. Appréciation

Cet instrument a fait ses preuves; sa précision et sa résolution vont au-delà des nécessités du contrôle des barrages.



Figure 1.01-1: Balance à pression
(Source: Rittmeyer SA, Zoug)

Des développements technologiques récents ont encore augmenté la fiabilité de cet équipement.

La transmission des valeurs de mesure est habituelle, tout comme leur enregistrement automatique.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Des dépôts de sédiments peuvent obstruer les conduites et perturber les mesures du capteur. La turbidité des eaux peut fausser la mesure.

4. Exigences techniques

L'installation devra déjà être prévue lors de la phase du projet. Un manomètre de précision devrait être associé à la balance. La prise de pression ne doit pas se trouver dans un canal ou une conduite où la mesure serait perturbée par un écoulement (vidange de fond, déversoir, etc.).

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Contrôles:

- à niveau haut: par la mesure depuis le point fixe d'un nivellement ou à l'aide d'un limnimètre
- à niveau bas: au moyen d'un manomètre de précision ou un capteur de pression piézoélectrique, hydraulique ou pneumatique

Entretien:

- Le conduit de mesure est à purger régulièrement.

6. Redondance

Manomètre de précision avec transmission de mesure ou capteur de pression, limnimètre, câble avec témoin sonore ou lumineux, etc.

7. Remarques

L'appareillage de télétransmission qui lui est associé sera étudié dans le cadre de l'équipement global de l'ouvrage.

Niveau du plan d'eau

FLOTTEUR

1. Principe de mesure

Permet de mesurer avec précision les variations du plan d'eau sur une hauteur limitée, notamment pour les niveaux élevés du lac (crues).

2. Appréciation

Dispositif simple et fiable, nécessitant cependant un contrôle régulier. La plage de mesure est relativement limitée.

Ce dispositif est généralement couplé à un enregistreur ou à un équipement de télétransmission.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Peut être endommagé par des corps flottants et par la glace. Les sédiments et des petits corps flottants peuvent perturber le système.

4. Exigences techniques

Ne doit pas être placé dans la zone d'un courant, ni dans les zones de gel (prévoir au besoin un chauffage électrique). L'accès pour l'entretien doit être facile. Prévoir un dispositif amortisseur de variations brusques dues aux clapotis. Prévoir la possibilité de purger le puits de mesure.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Liberté de mouvement de l'ensemble des éléments mécaniques. Correspondance entre la cote réelle et la cote affichée.

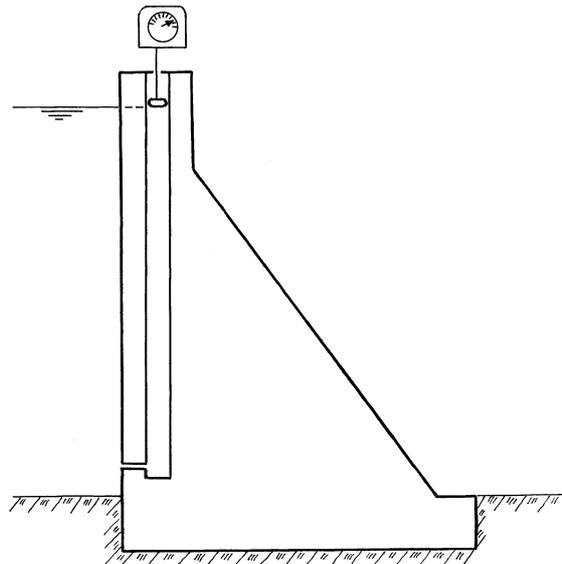


Figure 1.02-1: Flotteur

6. Redondance

Echelle limnimétrique, qui sert également à l'étalement.

7. Remarques

En lieu et place d'un flotteur, on peut installer un capteur de pression, un limnimètre pneumatique ou un capteur à ultrason, lequel transmet le niveau de la retenue sur un enregistreur permettant la télétransmission. Un tel équipement ne comporte, comparativement au flotteur, aucun élément mécanique.

Niveau du plan d'eau

EHELLE LIMNIMETRIQUE

1. Principe de mesure

Il s'agit d'une latte calibrée en bois ou en métal avec repères décimétriques et centimétriques. Il existe des modèles avec repère du niveau maximum atteint (niveau à valeur limite, muni d'une bande de papier qui se colore au contact de l'eau).



Figure 1.03-1: Echelle limnimétrique

2. Appréciation

Mesure facile d'un niveau d'eau par une lecture directe. Permet de suivre visuellement les variations d'un niveau d'eau, par exemple en cas de crues.

Peut être posée verticalement (par exemple sur un parement amont d'un barrage en béton) ou inclinée (le long du talus d'un barrage en remblai). Cet équipement ne se prête pas à la télétransmission.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Le clapotis de l'eau ne permet d'avoir qu'une valeur approchée du niveau. Peut être endommagée par des corps flottants. Dégradation de la peinture et du repérage.

4. Exigences techniques

Ne pas placer la latte de façon à entraver le courant ni à proximité du déversoir (mesures faussées suite à la courbure de la surface de la lame d'eau). Garantir la visibilité et un accès facile. Prévoir des repères permettant une lecture (éventuellement avec des jumelles) en tout temps et prévoir au besoin un éclairage.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Contrôler si l'échelle est toujours correctement fixée et qu'elle n'est pas endommagée. Nettoyer régulièrement et au besoin refaire la peinture.

6. Redondance

Pas nécessaire.

7. Remarques

A l'aval de l'ouvrage, il peut être intéressant de placer une latte permettant de déterminer le niveau et le débit correspondant.

Niveau du plan d'eau

MANOMETRE

1. Principe de mesure

Un conduit de liaison avec la retenue transmet au manomètre la pression hydrostatique correspondant au niveau du plan d'eau.

2. Appréciation

Dispositif simple et fiable, de précision limitée, par exemple comme redondance pour un contrôle rudimentaire des balances à pression.

Cet équipement de mesure ne se prête pas pour des lectures directes. Des cellules de prise de pression doivent être installées pour une télétransmission des valeurs.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Obstruction, gel, entrée d'air dans le conduit. Blocage du mécanisme de l'appareil de mesure. Valeurs erronées en raison d'une échelle de mesure inappropriée de l'appareil.

4. Exigences techniques

Protection contre le gel du conduit et de l'appareil de mesure. Possibilité de purger le conduit et d'en éliminer l'air.

Eviter de placer la prise de pression dans une zone de prise ou de rejet (conduite forcée, vidange de fond, etc.).

L'échelle du manomètre doit donner une pression exprimée en mètre sur mer afin d'éviter des conversions entachées d'erreur.

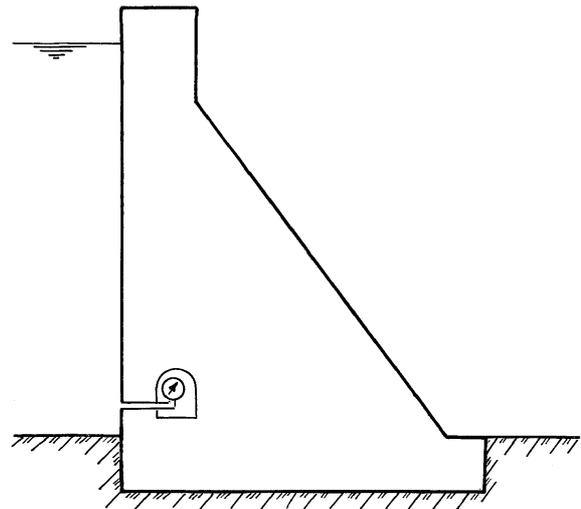


Figure 1.04-1: Manomètre

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Purge périodique du conduit. Examen périodique de l'appareil de mesure (prévoir un manomètre de rechange pour un contrôle rudimentaire).

6. Redondance

Dispositif identique en d'autres endroits ou, de cas en cas, autres dispositifs tels qu'échelle limnimétrique, câble avec témoin sonore ou lumineux, cellule électrique, etc.

7. Remarques

Niveau du plan d'eau

SONDE PNEUMATIQUE

1. Dispositif de mesure

La sonde pneumatique sert à mesurer des niveaux d'eau. De l'azote ou de l'air comprimé est introduit dans un conduit dont l'extrémité inférieure, ouverte, se trouve sous le niveau d'eau attendu le plus bas. Lorsque des bulles commencent à s'échapper dans l'eau une pression de gaz équivalente au niveau hydrostatique s'installe dans le conduit. Cette pression est enregistrée par une cellule de mesure et transformée en un signal électrique.

2. Appréciation

Cet équipement de mesure nécessite certains frais d'installation, mais peut être engagé de façon très flexible. Il convient à des talus inclinés de barrages en remblai ou de rives de cours d'eau, ainsi qu'à des barrages en béton et des seuils en rivière. La cellule de mesure n'entre pas en contact avec l'eau. L'appareillage (embouchure et conduit) prend très peu de place. Un danger de gel est pratiquement inexistant. La sonde pneumatique se prête bien à la télémessure.

3. Dérangements possibles et erreurs de mesure

De la vase et des dépôts solides peuvent influencer les valeurs mesurées à l'embouchure. Une perte de pression (bouteille d'azote vide ou panne d'énergie au compresseur) conduit à une interruption de la mesure.

4. Exigences techniques

Le conduit de mesure doit être protégé contre des impacts mécaniques ; par exemple, il sera placé dans un tube de protection. On évitera d'installer l'embouchure dans un canal ou un tuyau, car le courant d'eau peut affecter les mesures (vidange de fond, prise d'eau). Dans le cas d'un seuil déversant, l'embouchure doit également se trouver en dehors du domaine affecté par la courbure des filets d'eau.

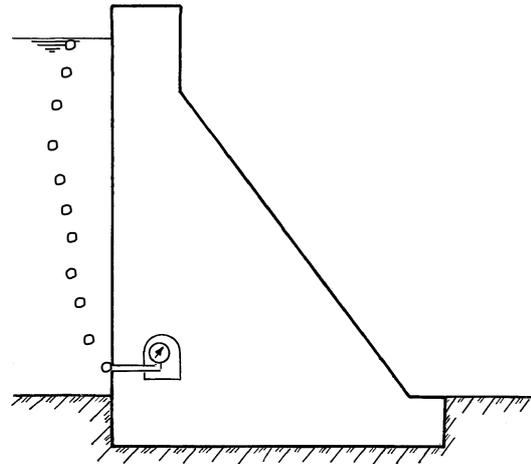


Figure 1.05-1: Sonde pneumatique

5. Contrôles du fonctionnement et entretien

Contrôles :

- A niveau d'eau élevé : par mesure de nivellement à partir d'un point fixe ou par latte
- A niveau d'eau bas : par manomètre de précision ou cellule de mesure hydraulique piézoélectrique

Entretien :

- Le conduit de mesure est à purger régulièrement.

6. Redondance

La redondance ne peut être atteinte que par des mesures complémentaires au manomètre de précision, latte, cellule de pression, sonde électrique de niveau, etc.

7. Remarques

La télémessure de cet équipement est à prévoir dans le projet général de l'auscultation.

Niveau du plan d'eau

SONDE A ULTRASONS

1. Dispositif de mesure

Cet équipement détecte la surface de l'eau par réflexion d'impulsions d'ultrasons. La distance entre le détecteur et la surface de l'eau est déterminée à partir du temps écoulé entre l'émission et la réception du signal (temps de parcours) et de la vitesse de propagation dans le milieu concerné (air).

2. Appréciation

La sonde permet une mesure directe du niveau d'eau après calibrage. L'installation de la sonde est très simple. Le domaine de mesure est cependant limité à 8-10 m. La précision des mesures est inférieure à 0.5% du domaine de mesure. La sonde à ultrasons se prête bien à la télétransmission.

3. Dérangements possibles et erreurs de mesure

En cas de vagues, le niveau d'eau ne peut être déterminé qu'approximativement. La mesure sera également faussée si la surface de l'eau est gelée et recouverte de neige. L'appareillage est sensible à une surtension et au rayonnement direct du soleil.

4. Exigences techniques

La sonde à ultrasons doit être placée à l'écart de la zone d'influence d'un évacuateur de crues (mesures faussées par la courbure de la surface d'écoulement). La surface de l'eau immédiatement sous la sonde doit être libre de toute turbulence, formation de glace et dépôt de neige. L'appareillage doit être en mesure de fonctionner dans un environnement humide. La sonde est à protéger contre une surtension de l'alimentation et contre un rayonnement direct du soleil.

5. Contrôles du fonctionnement et entretien

Contrôler régulièrement que la sonde est bien fixée (contrôle avec un niveau à bulle) et qu'elle n'est pas endommagée. Etalonnage périodique avec un mètre pliant ou une latte de mesure.

6. Redondance

Au moyen d'un autre système de mesure du niveau d'eau (par exemple latte).

7. Remarques

- La sonde doit être montée parfaitement verticalement (contrôle avec niveau à bulle). Le cône d'émission des ultrasons ne doit pas être interrompu par une paroi latérale.
- Aucun objet solide ne doit figurer à l'intérieur du cône.
- Le rayonnement direct du soleil doit être évité! Le réchauffement de la tête de la sonde peut conduire à des erreurs de mesure. Le cas échéant, installer un toit de protection.

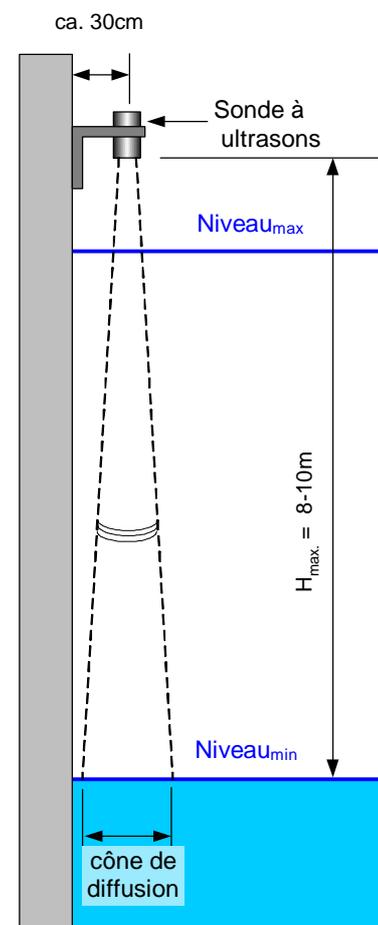


Figure 1.06-1: Exemple de montage d'une sonde à ultrasons

Niveau du plan d'eau

SONDE DE PRESSION

1. Dispositif de mesure

Une conduite reliée à la retenue transmet la pression hydrostatique correspondant au niveau d'eau à une sonde de mesure de pression (ou un transducteur de pression). Ce procédé de mesure consiste à transformer la pression d'un fluide agissant sur une membrane directement en un signal électrique. Les mesures sont saisies par un enregistreur de données ou peuvent être transmises à un ordinateur portable. Afin d'éliminer l'influence de variations de la pression de l'air, la sonde est pourvue d'un capillaire atmosphérique qui est intégré dans la transmission du signal. La sonde de pression peut être montée sur le parement amont d'un barrage, sur des talus, dans des puits pourvus de flotteurs ou sur des murs de rive.

2. Appréciation

Equipement de mesure flexible, fiable et peu encombrant, d'une précision suffisante pour l'auscultation des barrages. La consommation en courant d'une sonde de pression est très faible et permet de se contenter de batteries pour l'exploitation. Cet équipement se prête bien à l'automatisation et à la télétransmission.

3. Dérangements possibles et erreurs de mesure

La membrane est affectée par les dépôts de calcaire, les saletés et les impacts mécaniques. Le calcaire peut réduire la flexibilité de la membrane et, par là même, sa capacité à correctement reproduire la pression. Les sondes de pression ont une tendance au *drift* (déviations progressive systématique des mesures). Sans protection de surtension les sondes ne résistent pas à la foudre.

4. Exigences techniques

La sonde de pression est à installer de préférence dans un tube de montage, qui protège la sonde elle-même et le câble de mesure. Pour l'entretien ou la réparation, il est possible de retirer la sonde

du tube de protection. Dans tous les cas, il est important d'avoir un arrêtoir à l'intérieur du tube afin de pouvoir positionner la sonde toujours à la même hauteur. Le capillaire doit se trouver au-dessus du niveau des plus hautes eaux et ne doit pas être recourbé. Le montage de la sonde sur un talus de faible pente est à déconseiller; la sonde doit être aussi proche de la verticale que possible. En cas de pressions hydrostatiques élevées, une installation fixe est recommandée (par exemple à l'aide d'un forage depuis l'intérieur du barrage). La sonde ne doit pas se trouver dans la zone de courant d'une prise ou d'un rejet d'eau (conduite à pression, vidange de fond, etc.) Une protection de surtension est indispensable, les sondes de qualité sont généralement équipées d'une protection anti-foudre.

5. Contrôles du fonctionnement et entretien

De l'eau fortement calcaire est défavorable et nécessite un détartrage fréquent, qui doit être pratiqué soigneusement et à fond.

6. Redondance

Même installation à proximité ou, de cas en cas, mesures complémentaires par latte de mesure, sonde à sifflet, sonde électrique ou manomètre.

7. Remarques

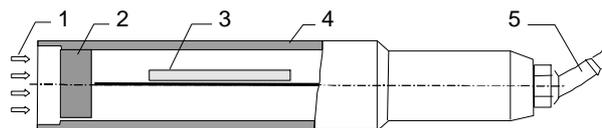


Figure 1.07-1: Détails d'une sonde de pression

1. Pression hydraulique
2. Cellule de mesure avec membrane et capteur
3. Electronique d'exploitation ou amplificateur
4. Boîtier
5. Câble avec capillaire atmosphérique

Niveau du plan d'eau

CÂBLE AVEC TEMOIN SONORE OU LUMINEUX

1. Principe de mesure

Le niveau d'un plan d'eau peut être relevé au moyen d'une sonde descendue dans un puits ou un tube vertical directement relié avec la retenue par un conduit. La sonde est suspendue à un tuban métrique. La sonde indique la position du plan d'eau par un sifflement (déplacement d'air lors du contact de la sonde avec l'eau) ou par une lampe qui s'allume, accompagnée souvent d'un bourdonnement (fermeture d'un circuit électrique dans l'eau qui est conductrice).

2. Appréciation

Dispositif simple, fiable et très précis dans toutes plages de mesure, par exemple comme redondance à la balance à pression. Cet équipement se prête à la télétransmission.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Obstruction, gel du conduit vers le puits ou le tube.

4. Exigences techniques

Protection contre le gel du conduit et du puits ou du tube. Possibilité de purge et d'élimination de l'air emprisonné dans le conduit et le puits ou le tube. Capacité d'écoulement suffisante dans le conduit. Eviter de placer l'entrée du conduit dans une zone de courant de prise ou de rejet (conduite forcée, vidange de fond, etc.).

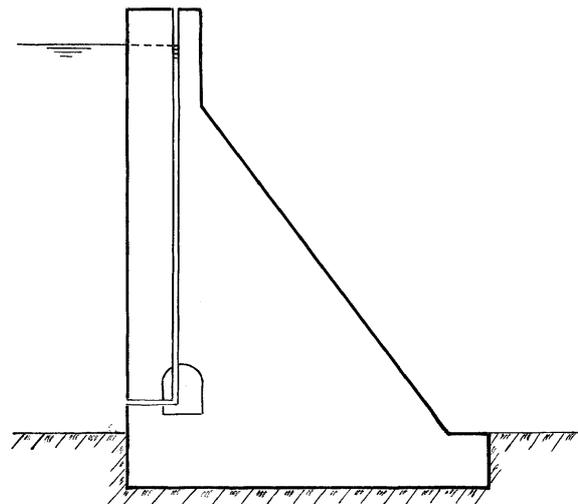


Figure 1.08-1: Dispositif pour câble avec témoin sonore ou lumineux

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Purge périodique du conduit et du puits ou du tube.

6. Redondance

Dispositif identique en d'autres endroits. Câble avec témoin descendu directement dans la retenue (pénible et impossible en cas de bassin gelé) ou, de cas en cas, autres dispositifs tels qu'échelle limnimétrique, cellule électrique, etc.

7. Remarques

Niveau de dépôt des sédiments

MESURE DE PROFONDEUR D'EAU

1. Dispositif de mesure

La sédimentation des retenues se laisse contrôler par des mesures de profondeur d'eau. Celles-ci peuvent se faire à partir d'une embarcation, soit par sondage à la perche ou au fil lesté, soit par ultrasons (voir feuille explicative 1.06 pour le principe de mesure).

Afin d'obtenir une répartition des sédiments dans l'espace, il est nécessaire de connaître la position du bateau au moment de la mesure. Celle-ci peut se faire depuis la rive par une mesure d'angle et de

distance ou par positionnement au moyen d'une mesure GPS. Une possibilité plus simple consiste à

tendre d'une rive à l'autre des fils avec des repères de distance. Les relevés permettent de dresser la topographie ou des profils.

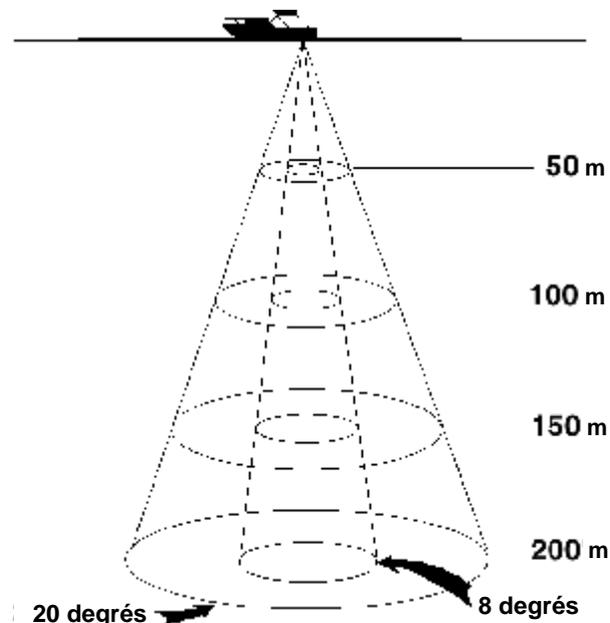


Figure 1.09-1: Mesure de profondeur d'eau par ultrasons

2. Appréciation

Les mesures faites au moyen de fils lestés ou de perches requièrent du temps et du personnel.

Un bateau et un opérateur sont nécessaires pour effectuer des mesures avec des moyens modernes de positionnement et de mesure de profon-

deur. Les mesures sont faites automatiquement et enregistrés dans un fichier. Il possible de relever en un jour jusqu'à une centaine de profils de 300 à 400 m de longueur.

Les mesures par sonde à ultrasons et le positionnement par voie GPS requièrent un équipement coûteux. De plus, une position favorable des satellites de référence est requise, ce qui n'est pas toujours le cas dans les vallées alpines étroites.

3. Dérangements possibles et erreurs de mesure

Détermination de la position du bateau : Au moyen de théodolites automatiques ou par une navigation par satellites, il est possible d'obtenir une précision de la position de l'ordre du cm. Dans les vallées étroites, la navigation des satellites est réduite.

Mesure de la profondeur : Des courants forts ou des turbulences rendent difficiles voire impossibles la mesure de profondeur. La végétation ou des atterrissements locaux peuvent influencés les mesures par ultrasons. Pour les relevés dans des versants raides, il faut recourir à des dispositions de mesures, des sondes et des logiciels spéciaux.

4. Exigences techniques

Détermination de la position au moyen de systèmes automatiques depuis les rives ou par navigation par satellites. Equipement transportable pouvant facilement être installé dans un bateau.

5. Contrôles du fonctionnement et entretien

Mesures de comparaisons par exemple au moyen d'un fil lesté ou d'une latte. Service régulier de la sonde à ultrasons auprès du fournisseur.

6. Redondance

Mesure à plusieurs reprises du même profil et comparaison des profondeurs. Etablir des profils transversaux et longitudinaux et comparer les profondeurs aux points d'intersection des profils.

7. Remarques

Ce système peut aussi être utilisé pour le relevé d'affouillements

Température de l'air et de l'eau

THERMOGRAPHE

1. Principe de mesure

Le thermographe permet la mesure et l'enregistrement en continu de la température ambiante. Le relevé se fait sur une bande de papier fixée sur un tambour. La durée d'enregistrement est de 7 à 31 jours selon la vitesse de rotation du tambour. Le tambour est mis en marche soit par remontage du mouvement à la main, soit par un mécanisme d'horloge à quartz alimenté par batterie.

De nouveaux appareils sont équipés d'un thermomètre électrique, lequel transmet le signal de sortie stocké dans une mémoire à partir de laquelle les données peuvent être reprises pour être interprétées.

2. Appréciation

Les 2 appareils fonctionnent sans problème pour autant qu'ils soient bien installés et entretenus. La plage de mesure se situe habituellement entre -35°C et $+50^{\circ}\text{C}$. Il n'est pas absolument certain de pouvoir obtenir la précision désirée de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

L'équipement électrique facilite l'interprétation des données, car elles sont déjà sous forme digitale.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

L'exposition directe aux rayons du soleil ou les courants d'air fausse l'enregistrement. Un manque d'encre peut conduire à la perte d'une partie de l'enregistrement. Arrêt de l'enregistrement suite à un manque d'énergie (remontage de l'horloge non effectué, batterie déchargée, défectuosité de l'alimentation électrique).

Des pannes dues à la neige soufflée ne sont pas rares.

Une panne des appareils électriques en raison d'une surtension (foudre) est possible.

Des données peuvent être perdues en cas de dépassement de la capacité de la mémoire des appareils électriques.

4. Exigences techniques

Le thermographe doit être installé si possible dans un petit cabanon d'accès facile (particulièrement en hiver). Les appareils électriques doivent être placés dans un boîtier de protection ventilé.

L'endroit où le thermographe est mis en place doit être représentatif de la température ambiante de la zone du barrage.

Le thermographe ne doit pas être installé dans un lieu influencé par le réchauffement du soleil ou par la chaleur d'air évacué.

Le thermographe doit être complété par un thermomètre à maximum/minimum.

Une protection contre la foudre des appareils électriques doit être prévue.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

L'entretien de l'appareil se fait selon les instructions du fabricant (changement du papier, encre, câblage, etc.).

Pour les thermographes, des comparaisons continues de mesures doivent se faire au moyen du thermomètre à maximum/minimum.

Lors du changement de la bande de papier, le mouvement doit être remonté, car sa durée de fonctionnement ne dépasse que de 30 à 50 % la durée d'enregistrement.

L'état de l'alimentation électrique (batteries) doit être régulièrement contrôlé.

6. Redondance

Elle est obtenue par le thermomètre à maximum/minimum.

7. Remarques

Il existe des appareils électroniques modernes qui permettent le traitement direct des valeurs mesurées.

Température de l'air et de l'eau

THERMOMETRE NORMAL

1. Principe de mesure

Température de l'air: La mesure de la température de l'air peut se faire au moyen d'un thermomètre industriel à capillaire. Un thermomètre à maximum/minimum est particulièrement bien indiqué, car en plus de la mesure courante, il permet de connaître la température la plus basse et la plus haute de la période de mesure.

Température de l'eau: L'appareil est composé d'un thermomètre placé dans un tube métallique de protection muni d'un réservoir d'eau perforé. Le principe consiste à remplir le réservoir jusqu'à ce qu'il acquière la température de l'eau. Le thermomètre est remonté à la surface le réservoir rempli d'eau captée à la profondeur voulue. Il est alors possible de lire la température.

2. Appréciation

La mesure est simple et se fait par lecture directe. Les thermomètres défectueux sont facilement remplaçables. Les simples thermomètres ne se prêtent pas à la télétransmission.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Température de l'air: L'exposition directe aux rayons du soleil et les courants d'air peuvent fausser la mesure de la température de l'air.

Température de l'eau: Le thermomètre doit être maintenu assez longtemps à la profondeur voulue (quelques minutes) afin que l'eau dans le réservoir perforé atteigne la température environnante. Lors de la mesure, il s'agit de retirer et de lire rapidement le thermomètre afin de limiter les variations de température.

4. Exigences techniques

Température de l'air: Pour la mesure de la température de l'air, la plage de mesure doit être comprise entre -30 °C et +40 °C. Le thermomètre doit être installé dans un endroit protégé du soleil et de l'air chaud évacué. Prévoir un thermomètre de réserve.

Température de l'eau: La plage de mesure du thermomètre doit être comprise entre 0°C et + 30 °C (ceux du commerce atteignent + 50 °C).

Les thermomètres indiquant les valeurs extrêmes sont très utiles.

Les thermomètres doivent avoir une certaine inertie afin qu'ils ne réagissent pas trop rapidement aux influences extérieures (modification de la température de l'eau ou de l'air, rayonnement du soleil) lorsqu'on les retire de l'eau. Prévoir un thermomètre de réserve.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

L'exactitude de la mesure doit être vérifiée de temps en temps par des mesures de comparaison avec un thermomètre de réserve.

6. Redondance

Au moyen du thermomètre de réserve.

7. Remarques

Grâce à l'installation de thermomètres supplémentaires en différents endroits, la température de l'air peut être connue dans la zone du barrage.

Les températures de l'air et de l'eau peuvent également être déterminées au moyen d'une sonde électrique placée dans l'eau ou fixée sur le parement amont du barrage (voir feuille explicative 1.12).

Avec une installation fixe de sondes électriques, la transmission des valeurs mesurées est possible

Température de l'air et de l'eau

THERMOMETRE ELECTRIQUE

1. Dispositif de mesure

Les appareils pour la mesure de la température du béton placés dans le béton ou dans un forage sont basés sur les principes suivants:

- **thermomètre à résistance:** un changement de température provoque une variation de la résistance d'un fil métallique placé dans le capteur. La lecture se fait au moyen d'un pont de Wheatstone.
- **thermoélément (thermocouple):** deux fils de métaux différents sont soudés à leurs extrémités; l'une est placée au point de mesure dans le béton et l'autre à l'extérieur. Lors d'un changement de température, un courant s'établit entre les deux points de liaison qui peut être mesuré. La mesure dans le béton est faite au point de soudure des 2 fils.
- **thermomètre à corde vibrante:** un changement de température modifie la fréquence propre d'une corde vibrante excitée par un aimant situé dans la sonde. Une corde de comparaison qui se trouve dans l'appareil de mesure permet de déterminer la température.

2. Appréciation

Ces mesures sont fiables et d'exécution facile. Des appareils fixes ou portables peuvent être utilisés. Les thermomètres défectueux sont facilement remplaçables.

Cet équipement se prête à la transmission des valeurs mesurées.

3. Dérangements possibles et erreurs de mesure

Panne en raison de surtension d'origine atmosphérique.

Corrosion des éléments des prises électriques pour les mesures.

Des problèmes temporaires peuvent surgir provoqués par des contacts intermittents de même que par des perturbations d'origine électrique et magnétique.

Dans le cours du temps, le point zéro de ces appareils peut se déplacer.

L'apparition d'usure de la sonde est mise en évidence par une dérive graduelle de la mesure.

Des erreurs de raccordement des câbles sont possibles pour plusieurs des ponts de mesure utilisés. Des erreurs de l'indicateur proviennent aussi de l'appareil de mesure lui-même et ne sont pas souvent provoquées par le capteur.

4. Exigences techniques

La plage de mesure pour la température de l'air est comprise entre -30 °C et +40 °C et entre -0 °C et +30 °C pour la température de l'eau.

Le thermomètre pour la mesure de la température de l'air ne doit pas être installé dans un endroit influencé par le rayonnement du soleil ou par un air chaud.

La qualité du matériel choisi pour les capteurs et les câbles est très importante (résistance mécanique, blindage électrique).

Les câbles ne doivent pas comporter d'épissures entre les sondes et le tableau de lecture.

Emploi uniquement de sondes fiables. Avoir des thermomètres de remplacement portables en réserve.

Les mesures ne doivent pas être interrompues pendant des années.

L'équipement de lecture (éventuellement centralisé) peut mémoriser les valeurs, ce qui facilite leur transfert sur ordinateur.

5. Contrôles du fonctionnement et entretien

Les instruments de mesure (pont de mesure, etc.) doivent être contrôlés périodiquement.

Les sondes doivent être calibrées. Le recours à des appareils portables est utile, car ils permettent de mesurer ou simuler le signal émis par la sonde. Les prises électriques pour les mesures nécessitent un entretien périodique (corrosion).

6. Redondance

Par des appareils de remplacement.

7. Remarques

De nouveaux types d'appareil, tels le thermistor ou les capteurs à fibre optique, sont les produits issus de développements récents. Un large potentiel de développement existe encore.

Température dans le béton

THERMOMETRE NORMAL

1. Principe de mesure

La température interne du béton peut être déterminée de façon simple avec un thermomètre industriel à capillaire. Ce dernier est introduit dans un forage vertical ou incliné ou dans un tube pris dans le béton, de telle manière que la lecture soit faite à la profondeur voulue. Les thermomètres sont fixés soit à une ficelle soit à l'extrémité d'une perche et sont retirés du forage pour lecture.

2. Appréciation

La mesure est simple et se fait par lecture directe. Les thermomètres défectueux sont facilement remplaçables.

Cet équipement ne se prête qu'à des lectures directes; des thermomètres électriques doivent être installés pour la télétransmission des valeurs (voir feuille explicative 1.14)

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Les circulations d'air et d'eau dans les forages ou les tubes faussent les mesures et sont à éviter. L'orifice des forages ou des tubes doit être fermé par un bouchon.

Lors de la mesure, il s'agit de retirer et de lire rapidement le thermomètre afin de limiter les écarts de température.

4. Exigences techniques

On peut utiliser les thermomètres usuels du commerce de différentes grandeurs avec une plage de lecture comprise entre -10 °C et $+30\text{ °C}$ (... $+60\text{ °C}$) et avec une précision de l'ordre de $\pm 0,5\text{ °C}$.

Les forages pour les mesures doivent être placés à une certaine distance des conduites et des évitements (puits, galeries).

Il faut toujours prévoir un nombre suffisant de points de mesure.

Prévoir des thermomètres de réserve.



Figure 1.13-1: Introduction d'un thermomètre normal dans un forage

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

L'exactitude de la mesure doit être vérifiée de temps en temps par des mesures de comparaison avec les thermomètres de réserve.

6. Redondance

Par les thermomètres de réserve.

7. Remarques

Température dans le béton

THERMOMETRE ELECTRIQUE

1. Principe de mesure

Les appareils pour la mesure de la température placés dans le béton ou un forage sont basés sur les principes suivants:

Thermomètre à résistance: une variation de température provoque un changement de résistance dans le conducteur métallique de la sonde. La mesure se fait au moyen d'un pont de mesure.

Thermoélément (thermocouple): deux fils de métaux différents sont soudés à leurs extrémités. Une tension apparaît entre les deux extrémités libres des fils, qui dépend de la température et que l'on peut mesurer. La mesure de température dans le béton est faite au point de soudure des fils.

Thermomètre à corde vibrante: une variation de température cause un changement de la fréquence de vibration d'un filament sous tension qui est excité dans la sonde par un aimant. Un filament étalonné se trouve dans l'appareil de mesure et sert de référence.



Figure 1.14-1: Station de mesure des températures du béton

2. Appréciation

Ces mesures sont fiables et faciles à exécuter. Des pannes de certains capteurs sont possibles. Ce thermomètre se prête à la télétransmission des valeurs mesurées.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Panne par suite de surtension.

Corrosion des bornes électriques de contact à l'instrument de mesure.

Au cours du temps, des dérives du point zéro peuvent affecter ces appareils.

Pour les anciens ponts de mesure, des erreurs de raccordement des câbles sont possibles.

Une circulation d'air ou d'eau doit être évitée dans les forages ou les tubes pris dans le béton dans lesquels sont placés des instruments de mesure.

4. Exigences techniques

La plage de mesure est comprise entre -10 °C et +60 °C lors d'une mise en place dans le béton frais, 100 et +30 °C lors d'une mise en place ultérieure.

La qualité du matériel des capteurs et des câbles est très importante (résistance mécanique, blindage électrique).

Les câbles ne doivent pas comporter d'épissures entre les capteurs et le tableau de lecture.

Emploi uniquement de sondes fiables.

Les mesures ne doivent pas être interrompues pendant des années.

L'équipement de lecture (éventuellement centralisé) peut mémoriser les valeurs, ce qui facilite leur transfert sur ordinateur.

Les capteurs placés dans un forage ou un tube doivent être thermiquement isolés avec l'extérieur par un couvercle ou un bouchon.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

L'instrument de mesure (pont de mesure, etc.) doit être périodiquement contrôlé.

Les prises électriques pour les mesures (contacts) nécessitent un entretien périodique (corrosion).

6. Redondance

La mise en place d'un nombre suffisant de capteurs permet d'atteindre une certaine redondance.

7. Remarques

Les capteurs électriques placés dans des forages ou des tubes peuvent être facilement remplacés en cas de dommage. Les capteurs noyés dans le béton sont perdus en cas de panne. Un remplacement n'est possible que par l'exécution d'un forage et par la mise en place de nouveaux capteurs.

**Répartition de la température dans le béton
Circulation d'eau dans les remblais
Modification de température due aux infiltrations**

CAPTEURS DISTRIBUES DE TEMPERATURE A FIBRES OPTIQUES

1. Principe de mesure

Une fibre optique (à base de silice) protégée à l'intérieur d'un câble est installée suivant un parcours défini. A l'aide d'un instrument de mesure (analyseur), des impulsions de lumière sont envoyées dans la fibre.

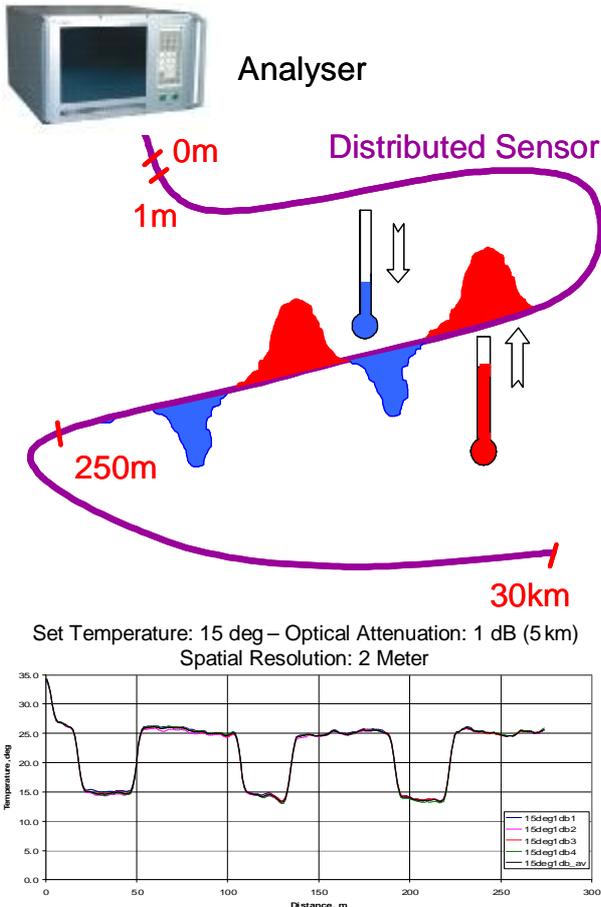


Figure 1.15-1: Principe de mesure distribuée de température.

Ces impulsions interagissent avec la silice par le biais de plusieurs types de diffusion et une petite partie de la lumière diffusée revient vers l'analyseur. L'intensité rétro diffusée et le décalage en longueur d'onde introduit par la diffusion contiennent des informations sur la température de la fibre à l'endroit où la diffusion a eu lieu. Si le temps de parcours (aller et retour) est aussi mesuré, il devient donc possible de déterminer la température de la fibre optique à chaque endroit le long du câble. De ce fait, ce type de mesure est appelé "distribuée". Les différents analyseurs dits

« distribués » sont classifiés en fonction du type de diffusion utilisée : Brillouin ou Raman. Les systèmes Brillouin permettent de mesurer sur des distances qui peuvent atteindre 30 km, les systèmes Raman ont une portée limitée à 1-10 km selon les fournisseurs. La résolution spatiale est généralement de l'ordre de 1m et la résolution en température de 0.1 °C à 1 °C.

Ce type de capteur est utilisé en particulier pour la mesure de températures en un grand nombre de points, mais aussi pour la détection de fuites. Dans ce cas, la différence de température ou de capacité thermique entre l'eau et la structure sèche est détectée à l'endroit de la fuite.



Figure 1.15-2: Installation du câble de mesure sous le goudron d'étanchéité d'une digue.
(Source : GESO, LTV des Freistaates Sachsen)

2. Jugement

Les systèmes de mesure de température distribuée à fibre optique sont avantageux dans le cas où un grand nombre de points de mesure est nécessaire. Comme la mesure se fait le long d'un

seul câble, l'installation est grandement simplifiée par rapport à l'intégration d'un nombre équivalent de capteurs discrets traditionnels. L'utilisation de la fibre optique rend ces capteurs insensibles aux perturbations électromagnétiques (foudre, courants parasites...) et à la corrosion. Dans le cas de la détection de fuites, la nature distribuée de la mesure permet de détecter ces événements sans connaissance préalable des endroits où ils pourraient apparaître. Dans le cas des barrages en remblai, il est notamment possible de détecter des fuites directement où elles se produisent sur le parement amont.

3. Possible problèmes et sources d'erreur

Dans le cas des capteurs basés sur la diffusion Raman, un étalonnage de chaque câble sur toute la gamme de température à mesurer est nécessaire avant l'installation. Dans le cas de la diffusion Brillouin, cet étalonnage peut se faire à une seule température et en un seul point du câble. Comme la diffusion de Brillouin dépend non seulement de la température mais aussi de l'état de contrainte de la fibre optique, il est important que le câble soit construit de telle façon à isoler la fibre optique des tractions appliquées au câble.

4. Exigences techniques

Les capteurs distribués sont livrés sous forme de câble enroulé sur bobine. Ils doivent donc être déroulés et couplés thermiquement avec la structure à surveiller. Certains câbles peuvent être noyés dans le béton et même dans le goudron. Il est aussi possible de les installer dans des puits de

forage dans la roche ou dans le terrain. L'appareil de mesure doit généralement être installé dans un local technique, sec et relativement propre. Dans le cas de détection de fuites il est possible d'améliorer la qualité de la détection en introduisant des changements contrôlés de température. Ceci se fait à l'aide d'un conducteur électrique, intégré dans le même câble que la fibre optique, et chauffé par l'intermédiaire d'un courant électrique produit par un générateur combiné à l'analyseur. Comme les zones mouillées de la structure ont tendance à chauffer et refroidir plus lentement que les zones « sèches », les fuites d'eau sont facilement identifiables.

5. Contrôles de fonctionnement et maintenance

Les systèmes de mesure à fibres optiques fournissent en général une alarme en cas de mauvais fonctionnement d'un capteur. Seul les connecteurs optiques nécessitent un nettoyage en cas de déconnexion et re-connexion manuelle (mesures ponctuelles).

6. Redondance

Installation du même système à différents endroits ou comparaison avec autres systèmes de mesure indépendants. Il est possible d'installer des câbles contenant plus qu'une fibre optique. En cas de rupture d'une fibre, il est possible d'utiliser la fibre de réserve.

7. Remarques

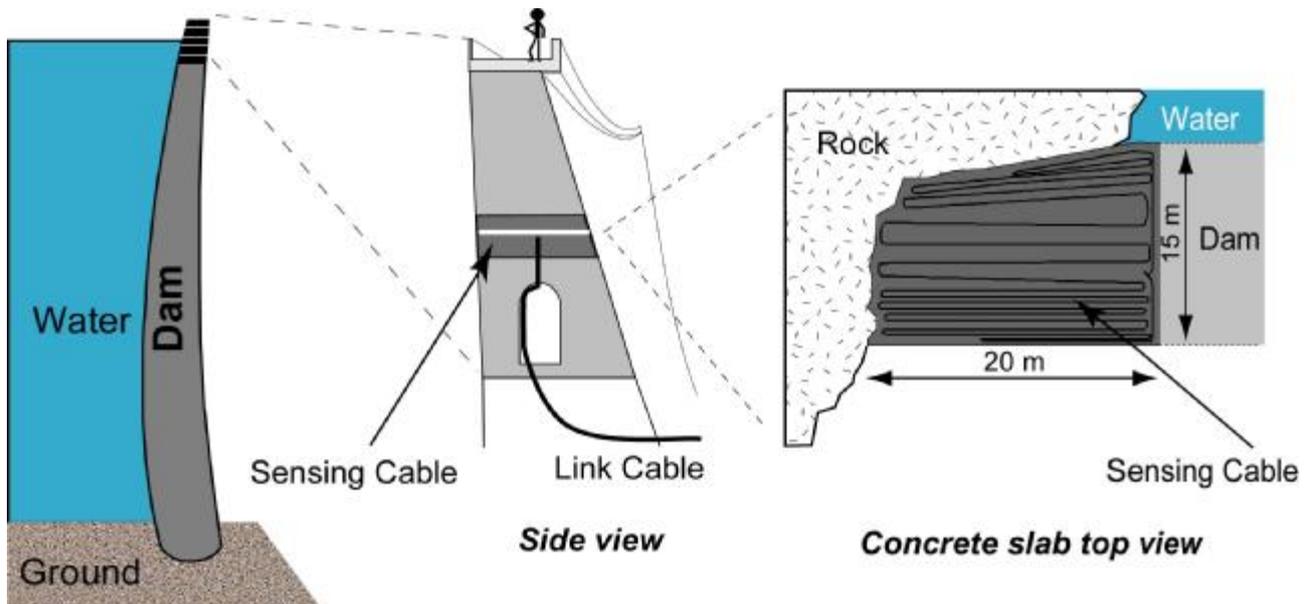


Figure 1.15-3: Installation dans un bloc de béton d'un barrage voûte (Source MET-EPFL, Omnisens, SMART-TEC).

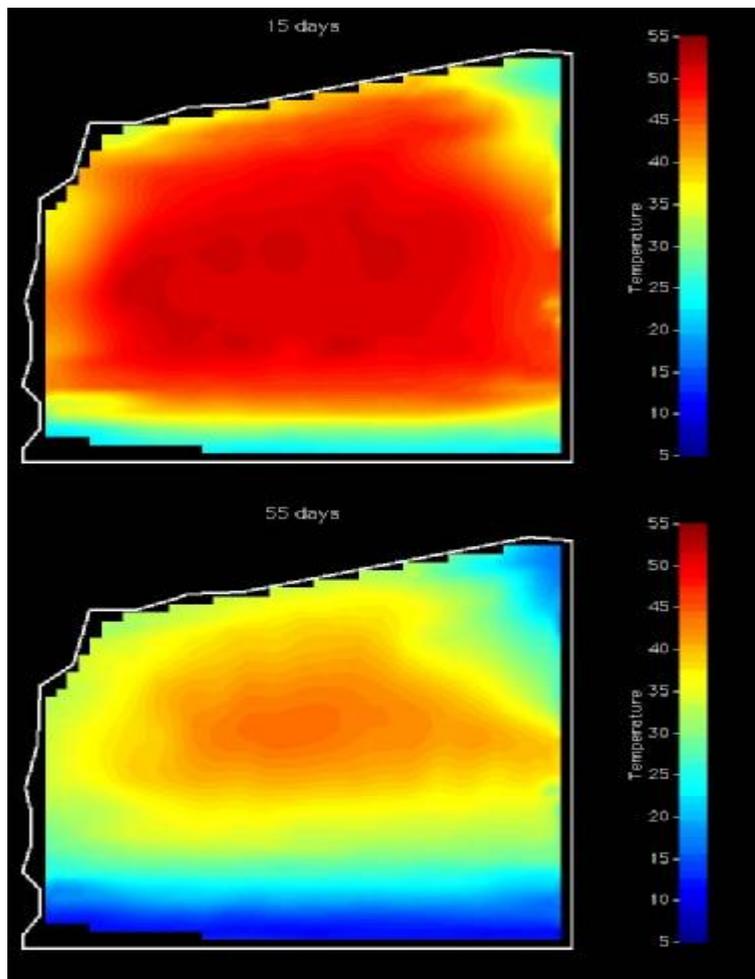


Figure 1.15-4: Mesures de température, 15 et 55 jours après le bétonnage (Source MET-EPFL, Omnisens, SMARTEC).

Précipitations dans la région de la retenue

PLUVIOMETRE / PLUVIOMETRE TOTALISATEUR / PLUVIOGRAPHE

1. Principe de mesure

Ces instruments sont utilisés dans le cadre de la surveillance des barrages pour la mesure des précipitations tombées dans la région du barrage. Les résultats de mesure permettent de tenir compte des conditions météorologiques dans l'interprétation des débits d'infiltration et de drainage ainsi que des pressions d'eau dans la fondation, qui sont tous deux influencés par le niveau de la nappe phréatique. Par ailleurs, les mesures fournissent d'importantes données pour les études hydrologiques.

Les appareils suivants sont utilisés :

Le **pluviomètre** recueille les précipitations. L'appareil de mesure est principalement constitué par un récipient d'une surface de 200 cm² parfois 500 cm². La quantité des précipitations tombées est régulièrement relevée au moyen d'un récipient gradué.

Dans le cas du **pluviomètre totalisateur**, les précipitations sont recueillies dans un réservoir de forme conique muni d'une petite ouverture (généralement 200 cm²). Il est capable d'accumuler les précipitations sur 6 à 12 mois. Les mesures se font à intervalle très espacé (environ 1 mois).



Figure 1.16-1: Pluviographe avec auget à bascule

Les **pluviographes** sont des appareils qui permettent de relever la distribution des pluies de manière mécanique ou électronique. Le principe d'auget à bascule est utilisé. La pluie remplit un auget qui bascule lorsqu'un certain poids est atteint et se vide en donnant une impulsion qui sera enregistrée.

2. Appréciation

Le **pluviomètre** totalisateur est un instrument de mesure volumétrique très simple, lequel est relevé en principe toutes les 24 heures. Il demande un entretien réduit. Les inconvénients sont la précision des mesures et l'absence de relevé détaillé de la répartition dans le temps des précipitations.

Quant au **pluviomètre totalisateur**, les quantités des précipitations sont recueillies sur une longue durée. L'intérêt de cette mesure réside plus dans l'information relative à la quantité de pluie dans une région montagneuse et d'accès difficile que la connaissance de la répartition de la pluie dans le temps.

Le **pluviographe** livre des données dans le temps et de haute résolution, ce qui est particulièrement très utile pour les études hydrologiques. De plus, la mise en mémoire électronique des mesures facilite leur interprétation. Il demande un entretien est considérable. Par ailleurs, un approvisionnement en énergie pour le relevé des mesures doit être garanti.

Leur utilisation pour la surveillance des barrages ne requiert pas une grande précision.

Le pluviomètre et le pluviographe sont des appareils pour un relevé direct. De son côté, le pluviographe se prête à la télétransmission des valeurs.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Des erreurs relativement grandes peuvent poser problème en raison d'une petite surface de référence ou de l'influence du vent, d'une calotte de neige, de l'hétérogénéité des alentours (par exemple, présence à proximité d'arbres et de maisons) ou encore du gel.

En cas de panne d'alimentation, les pluviographes sont perturbés, voire hors d'usage.

4. Exigences techniques

L'emplacement doit être représentatif et d'accès facile en tout temps.

Il est adéquat d'équiper le pluviomètre et le pluviographe d'un chauffage.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Entretien courant selon les instructions du fournisseur.

6. Redondance

N'est pas nécessaire.

7. Remarques

Le texte ci-dessus n'est valable que pour l'utilisation du pluviomètre dans le cadre de la surveillance d'un barrage.

Contraintes dans les remblais et dans le béton

MESURE DE LA PRESSION DES TERRES

1. Principe de mesure

Capteur de pression se présentant sous la forme d'un disque plat et circulaire (diamètre environ 25 à 35 cm) pour la mesure, perpendiculairement à la surface du disque, de la pression totale dans un remblai (pression des terres + pression interstitielle). Différents systèmes de transmission des valeurs (électrique, hydraulique, pneumatique) sont utilisés selon la distance et le produit. La transmission à la boîte de connexion s'effectue soit par câble soit par tube flexible. Pour la détermination de la pression effective (pression des terres), il est nécessaire d'installer également des cellules de mesure de pression interstitielle.

2. Appréciation

Les systèmes hydrauliques et pneumatiques sont sensibles aux variations de température. La mesure hydraulique est uniquement possible si le poste de mesure se situe à un niveau inférieur à celui de la cellule de mesure la plus basse placée dans le corps de la digue ce qui permet de suivre le développement des pressions depuis le début des remblais. La mise en valeur des résultats est souvent problématique. Toutefois le système permet de suivre la tendance du développement des contraintes. Le système pneumatique ne convient que pour des mesures jusqu'à 3 MPa et des longueurs de tube flexible jusqu'à 500 m. La transmission des valeurs de mesure est habituelle. L'enregistrement automatique est possible.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Dégâts aux tubes flexibles pendant leur mise en place ou suite à des tassements différentiels de matériaux différents.

Dégâts aux câbles en cas de protection insuffisante contre les surtensions.

Hétérogénéité de l'enrobage du capteur de pression conduit à des résultats inutilisables.

4. Exigences techniques

Les câbles de mesure doivent être protégés contre les surtensions. Les épissures entre capteurs et boîte de connexion doivent être évitées à tout prix. Les tubes flexibles dans le système hydraulique doivent être placés de telle manière à éviter les sous-pressions.

Les câbles électriques et les tubes flexibles doivent être placés dans des tranchées étroites et être protégés de manière efficace contre les dégâts possibles dus aux engins de chantier.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Pour le système hydraulique ou pneumatique, il faut prévoir au moins une purge annuelle (eau ou gaz) des tubes flexibles, ainsi qu'un entretien régulier et soigné des appareils de lecture.

6. Redondance

L'installation de 2 systèmes différents (par exemple électrique et pneumatique) est possible, mais pas absolument nécessaire. Toutefois, éviter la pose d'un seul capteur en un point de mesure.

7. Remarques

Lors de la mise en place de l'installation, veiller particulièrement à l'homogénéité du matériel d'enrobage

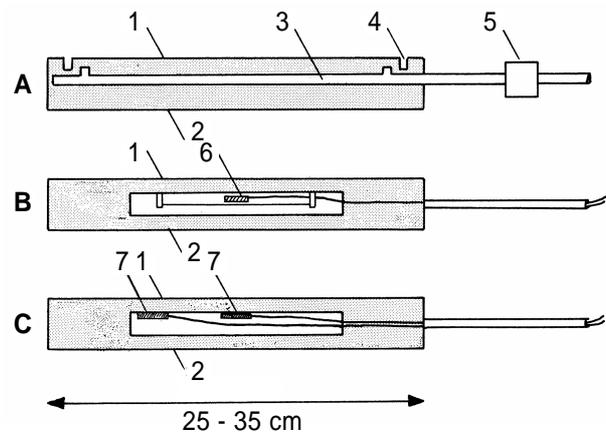


Figure 1.17-1: Cellule de mesure de la pression des terres

- A Mesure hydraulique
- B Mesure avec corde vibrante
- C Mesure de résistance électrique

- 1 Face active
- 2 Face passive
- 3 Chambre de mesure avec liquide
- 4 Rainure pour augmenter la flexibilité
- 5 Membrane pour la mesure de pression
- 6 Corde vibrante
- 7 Résistance



Mesure du déplacement spatial des points

TRIANGULATION

1. Principe de mesure

Le principe de la triangulation est la détermination de la position d'un point par des techniques géodésiques. En règle générale, il s'agit de la définition des coordonnées spatiales (3 dimensions, situation et altitude) par

- l'intersection de 2 directions
- le recoupement de 2 distances
- en règle générale, la combinaison des 2 méthodes.

La détermination du déplacement "absolu" des points de contrôle situés sur un barrage et dans ses environs, par rapport aux points de référence situés hors de la zone d'influence du barrage, se fait par la mesure de directions (éventuellement d'angles horizontaux), d'angles de hauteur et de distances. Les instruments employés à cet effet sont:

- le théodolite de précision (erreur moyenne de mesure sur une direction: $\pm 2''^{CC}$)
- l'appareil de précision pour la mesure des distances (erreur moyenne de mesure: $+ (0,1 - 0,2 \text{ mm} + 1 \text{ mm par km de la distance mesurée})$)

L'erreur de centrage de ces instruments est plus petite ou égale à $\pm 0,1 \text{ mm}$.



Figure 2.01-1: Théodolite de précision T2002

Les mesures simples d'angles, les alignements optiques et les polygonales (voir feuilles explicatives 2.06, 2.07, 2.08) sont des applications simplifiées de la triangulation. Très souvent, un nivellement est combiné avec une triangulation (feuille explicative 2.05).



Figure 2.01-2: Instrument de précision de mesure de distance ME5000

2. Appréciation

Depuis longtemps, c'est la méthode éprouvée pour la détermination d'un déplacement "absolu". Cette méthode est coûteuse et exigeante, mais elle est très fiable en raison des mesures surabondantes indispensables.

En général, le traitement des mesures se fait au moyen d'un ordinateur. La triangulation peut être combinée avantageusement aux mesures des pendules, aux polygonales et aux nivellements.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Les mesures de triangulation dépendent des conditions météorologiques. Les erreurs dues aux effets atmosphériques (réfraction, vibrations, etc.) peuvent fortement influencer les mesures.

4. Exigences techniques

La triangulation exige une instrumentation importante et un personnel technique expérimenté.

Le réseau doit être établi en collaboration avec l'ingénieur civil, le géomètre expérimenté et le géologue.

Une visibilité suffisante entre les points (prendre en considération la végétation et la neige) est nécessaire. De plus, il faut tenir compte des phénomènes de réfraction (pour les visées proches du sol ou de constructions) et, selon leur importance, des conditions d'accès aux points de référence et aux points de contrôle (conditions hivernales en haute montagne). L'emplacement et le nombre de points de contrôle doivent être conformes aux exigences de l'ingénieur civil. Les points de référence et fixes doivent être implantés dans un terrain stable (géologie).

En général, on procède à la construction d'un pilier aux différents points de stationnement (aspect financier, dépenses uniques et périodiques). On tiendra compte des effets thermiques et mécaniques sur les piliers.

L'analyse (traitement des observations surabondantes et calculs des coordonnées) s'effectue aujourd'hui à l'aide d'un modèle mathématique et stochastique avec des moyens informatiques. La conception et l'analyse requièrent de bonnes connaissances théoriques et une grande expérience pratique de la part du géomètre.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

La disponibilité permanente du dispositif de mesure exige un contrôle périodique des points pour s'assurer de dégâts éventuels, du dégagement des visées (élagage, constructions, etc.).

Les instruments et leur dispositif de centrage doivent être contrôlés lors d'examen périodiques et par une analyse critique des observations.

6. Redondance

Le rattachement de la triangulation avec d'autres systèmes de mesure, en particulier les pendules, assure une haute redondance extérieure.

Une redondance interne ou «géodésique» est donnée par un nombre excédentaire d'observations et un nombre surabondant de points de référence et de contrôle. De cette façon, il est possible de compenser, au fil des ans, la perte de points de référence et de contrôle.

7. Remarques

Le GPS (voir feuille explicative 2.02) est souvent utilisé aujourd'hui pour la détermination de variations planimétriques et altimétriques, avec une précision (et fiabilité) réduite, dans le cas par exemple de glissement, de mouvement de glacier, etc.

(Photos: Schneider Ingénieurs SA, Coire)

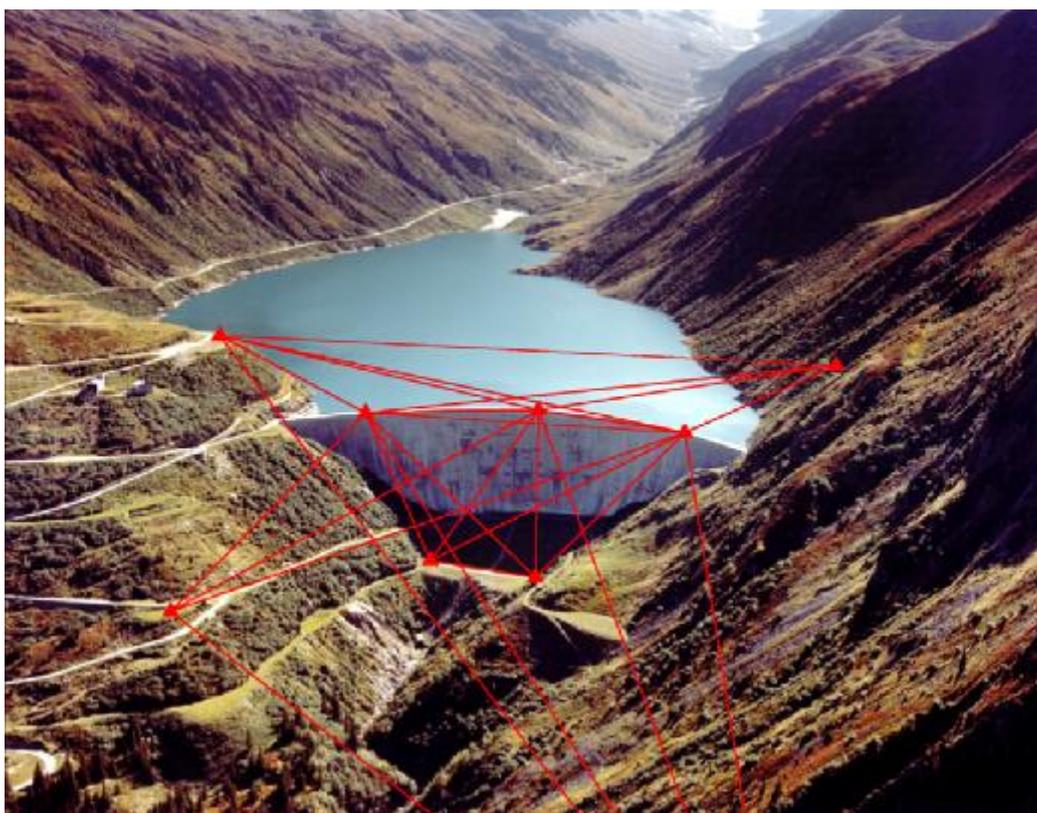


Figure 2.01-3: Exemple d'un réseau de mesure

Mesure du déplacement spatial des points

GPS (Global Positioning System)

1. Dispositif de mesure

Lors des 20 dernières années, le Département américain de la défense des USA a développé et réalisé un système de navigation comprenant une constellation de 24 satellites effectuant 2 rotations par jour sur une orbite située à environ 20'000 km.

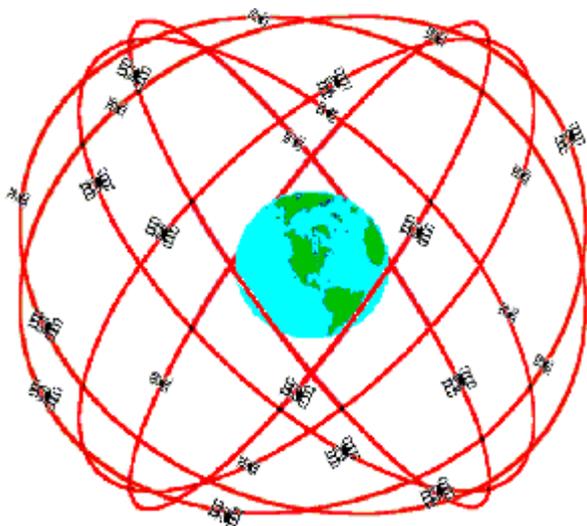


Figure 2.04-1: Configuration des satellites



Figure 2.04-2: Antenne GPS

a) Principe

Il s'agit de la mesure des distances entre l'antenne du récepteur et les satellites. Pour effectuer la résolution géométrique, il faut disposer au minimum de 3 mesures de distance. La position de l'antenne est obtenue par l'intersection de 3 sphères dont les centres sont la position du satellite et les 3 distances mesurées en sont les rayons.

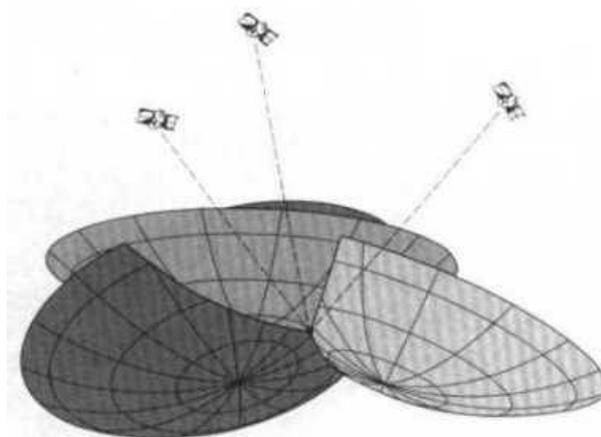


Figure 2.02-3: Détermination de la position au moyen de l'intersection de sphères dans l'espace

b) Application géodésique

Moyennant un mode de mesure adéquat, ce système de navigation peut être utilisé pour la détermination précise d'une position par rapport à un point connu. A cet effet, il faut disposer de 2 récepteurs GPS lesquels mesurent les distances à des satellites visibles simultanément. Grâce une méthode d'analyse adéquate, les différences relatives de coordonnées entre les stations (lignes de base) peuvent être déterminées sur la base des différences des distances entre les stations respectives et les satellites isolés (méthode différentielle GPS).

Pour l'application à la surveillance des barrages, seule la méthode différentielle est intéressante.

2. Appréciation

La mesure au moyen de GPS est par rapport aux méthodes géodésiques conventionnelles (par exemple, les mesures d'angles et de distance) largement indépendante des conditions météorologiques. Une liaison visuelle entre les différentes stations n'est pas nécessaire.

Comme les mesures GPS se basent sur un ellipsoïde (forme idéalisée de la Terre), il faut toujours tenir compte de l'influence des déviations des pendules et des ondulations du géoïde lors de la combinaison avec les méthodes de mesures géodésiques conventionnelles (par exemple, les mesures des angles et des distances).

La détermination des différences de coordonnées entre 2 stations au moyen du GPS donne des résultats d'une précision de 1 à 2 cm (simple erreur moyenne) qui dépend des méthodes de mesures et d'analyse (logiciels standards). Cette méthode de mesure peut être utilisée pour des applications dont la précision exigée est réduite,

comme par exemple des glissements de terrain de grande envergure.

Une augmentation de la précision exige un nombre important d'observations (mesures statiques pendant de nombreuses heures, de préférence de nuit) et l'utilisation de programme d'analyse spécialisé (par exemple le "Berner GPS-Software"). L'application du GPS pour la détermination précise des points requiert l'utilisation de méthodes de mesure et d'analyse particulières. De plus, il faut faire appel à un personnel expérimenté.

Cependant, dans le cas de réseau restreint (réseau géodésique de 1 – 2 km, comme c'est souvent le cas pour la surveillance des barrages), la précision des mesures géodésiques conventionnelles peut ne pas être atteinte. En plus, les mesures par GPS sont tributaires de nombreuses erreurs systématiques difficiles à recenser.

3. Dérangements possibles et erreurs de mesure

Les mesures GPS sont tributaires de nombreuses influences susceptibles de perturber la qualité des mesures.

a) Satellites

- Définition des orbites: insécurité concernant les orbites utilisées par les satellites (la plupart du temps, préalablement calculées)
- Horloge des satellites: défauts de l'horloge des satellites lors de la mesure de distance

b) Défaut du récepteur GPS

- Antennes: offsets des centres de phases de l'antenne GPS (point de mesure), ceux-ci peuvent varier pour des constellations différentes des satellites
- Multipathing: la propagation sur plusieurs trajectoires du signal des satellites (par exemple, par réflexion) engendre des erreurs de la mesure de distance
- Centrage: centrage défectueux de l'antenne au-dessus de point de contrôle

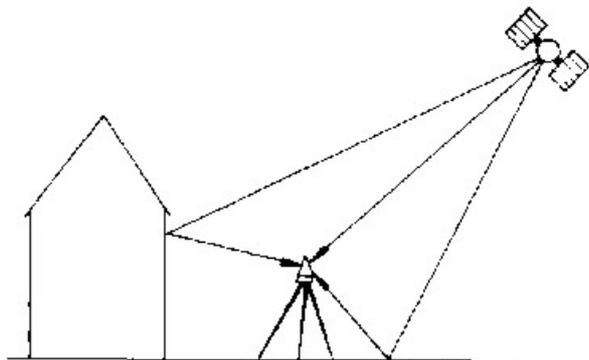


Figure 2.04-4: Effet de la propagation sur plusieurs trajectoires (Multipathing)

c) Influence de l'atmosphère

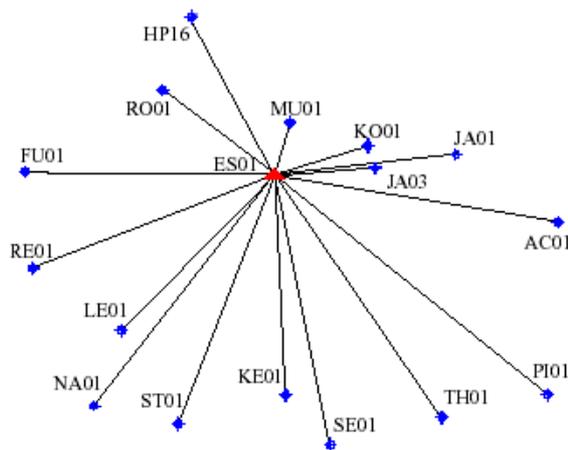
- Ionosphère: l'épaisseur "stationnaire" de l'ionosphère (environ 500 – 1'000 km) en relation avec l'activité solaire engendre un retard du signal GPS et, de ce fait, une erreur sur la distance mesurée entre le récepteur GPS et les satellites. Cela se répercute par une erreur d'échelle.
- Troposphère: une prise en compte erronée des conditions météorologiques engendre avant tout des erreurs dans la détermination des hauteurs au moyen du GPS

d) Configuration des satellites

- Configuration des satellites: des configurations différentes des satellites (par exemple, la panne d'un satellite) peuvent provoquer des erreurs systématiques
- Couverture: des accidents de terrains (collines, montagnes), des bâtiments et la végétation peuvent nuire à la visée en direction des satellites, de telle façon que le nombre de satellites pour la mesure soit inférieur au minimum requis.

e) Analyse

- Choix erroné des lignes de base/des stations de référence



2.02-5: Exemple d'une définition adéquate des lignes de base

4. Exigences techniques

On doit porter une attention particulière à la mise en place de l'antenne. Les obstacles à la vue directe des satellites tels la topographie, les constructions, la végétation, etc. peuvent fortement altérer les résultats.

La liaison visuelle entre les points des différentes stations n'est par contre pas nécessaire.

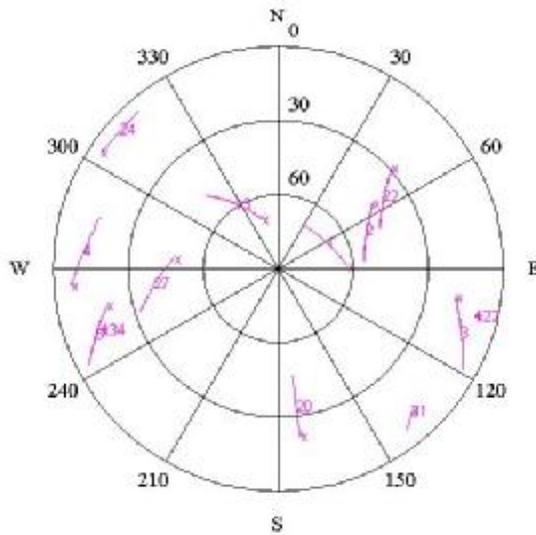


Figure 2.04-6: Visibilité prédéterminée des satellites pour un moment et un lieu donnés

5. Contrôles du fonctionnement et entretien

Vérification et détermination du centre de phase géométrique des antennes utilisées.

6. Redondance

Répéter les mesures avec des configurations différentes des satellites.

Vérification des différences entre les coordonnées calculées au moyen de la triangulation traditionnelle.

7. Remarques

Mesure du déplacement spatial des points

PHOTOGRAMMETRIE

1. Principe de mesure

La photogrammétrie se distingue des autres méthodes de la géodésie principalement par le fait que l'image photographique des objets est mesurée et non les objets eux-mêmes.

Les prises de vues sont faites à partir d'avions et ceci de telle façon qu'un objet soit couvert au moins par 2 photos (recouvrement). Les photos sont prises au moyen de caméras spéciales, appelées chambres photogrammétriques, qui sont installées dans des avions adaptés pour les prises aériennes.

masse (environ 2 Gb par photo) bon marché sous forme

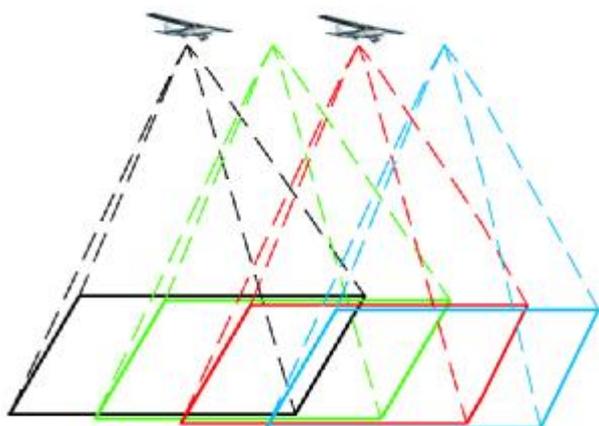


Figure 2.03-1: Schéma de principe pour la prise de vue avec une chambre photogrammétrique

A l'aide d'appareils de restitution ou de méthodes de calculs et de logiciels, il est possible d'établir le modèle photogrammétrique. Si ce modèle est intégré dans un système de coordonnées grâce à des points de coordonnées connues et visibles sur les photos, il peut être restitué à l'échelle.

La photogrammétrie trouve son application principalement pour la représentation spatiale du terrain sous forme de cartes. Elle sert aussi au relevé de zones particulières (rives d'un lac, versants d'une retenue, etc.) et offre ainsi une contribution intéressante pour la sécurité des barrages.

La photogrammétrie se prête en particulier à l'observation à long terme de zones de glissement (potentiel), de glaciers ou de zones de permafrost. On peut prendre des photos de manière préventive et ne les utiliser qu'en cas de besoin par crainte d'un mouvement ou s'il s'est manifesté.

2. Appréciation

La photogrammétrie livre dans des conditions adéquates un grand nombre d'informations. Les images photographiques sont des mémoires de

analogique qui peut être digitalisée/scannée en tout temps. La photogrammétrie nécessite des conditions favorables de prise de vue et d'éclairage. Elle exige un fort investissement en matériel et en personnes spécialement formées. La précision de la restitution dépend de l'échelle de l'image. L'erreur moyenne planimétrique de la restitution atteint 0,1 ‰, l'erreur altimétrique 0,15 ‰ de la hauteur de vol par rapport au sol.

Pour une image à l'échelle du 1:5'000 et des chambres photogrammétriques habituelles, on obtient ainsi des erreurs planimétriques et altimétriques respectivement de ± 10 et ± 15 cm. Réduire d'environ de la moitié cette erreur moyenne est possible avec des moyens et investissements adéquats.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Des dérangements peuvent être causés par des conditions météorologiques défavorables. Elles conduisent à un report ou à une répétition des vols. Des erreurs de mesure dans le sens usuel peuvent pratiquement être exclues.

4. Exigences techniques

Les objets à surveiller doivent être visibles depuis les airs ou être signalés. Une végétation dense

peut empêcher, voire rendre impossible le dépouillement des données.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

La sécurité de fonctionnement des chambres photogrammétriques est acquise et testée avant chaque vol. Les pannes sont rares.

6. Redondance

Une redondance réduite est donnée par le recouvrement adéquat des photos aériennes. La répétition des prises de vues aériennes est coûteuse.

7. Remarques

Outre la photogrammétrie sur base de photos aériennes, la photogrammétrie terrestre entre aussi en ligne de compte. Par exemple, elle peut être utile pour le contrôle de versants instables. L'importance de la photogrammétrie pour les mesures de niveaux devrait être remplacée dans le futur par le Laser-Scanning ou par une combinaison des deux. La combinaison avec la photogrammétrie procure une meilleure visualisation que le Laser-Scanning seul. Voir à ce sujet la fiche technique 2.04.

Mesure du déplacement spatial de points

LASER-SCANNING

1. Dispositif de mesure

Le développement de la méthode Laser-Scanning date d'une dizaine d'années. Le Laser-Scanning utilise le principe de la mesure de distance sans réflecteurs. Elle est combinée avec un système de balayages horizontal et vertical d'un rayon laser et réalise à grande vitesse, selon les appareils, de 1'000 à 500'000 mesures de distance par seconde en direction de l'objet à relever (bâtiment, tunnel, surface du terrain, etc.). Le pilotage est électronique.

La méthode Laser-Scanning peut être appliquée de façon fixe, par exemple à partir de trépieds, ou en mouvement depuis un véhicule de mesure voire aussi depuis un avion ou un hélicoptère. On parle aussi de « Airborne Laser-Scanning » ou LIDAR (Light Detection and Ranging). Les deux systèmes se distinguent par des rayons d'action et des précisions différentes.



Figure 2.04-1: Le Laser-Scanning permet de relever des surfaces de barrage en béton et par exemple de situer les dégâts.

Les résultats bruts d'un scanner se présentent sous forme d'un nuage de points. Par l'intermédiaire de points de référence, tels les coordonnées nationales, et l'emploi d'un logiciel sophistiqué, on peut obtenir des plans et des dessins à 2 et 3 dimensions, des nuages de points localisés, des objets en 3D, des relevés de terrain, etc.

2. Appréciation

Le Laser-Scanning permet de saisir en temps réel des objets quelconques et remplace la photogrammétrie terrestre. Les résultats recherchés peuvent être déduits du nuage de points et sont disponibles sous forme digitale pour des applications futures.

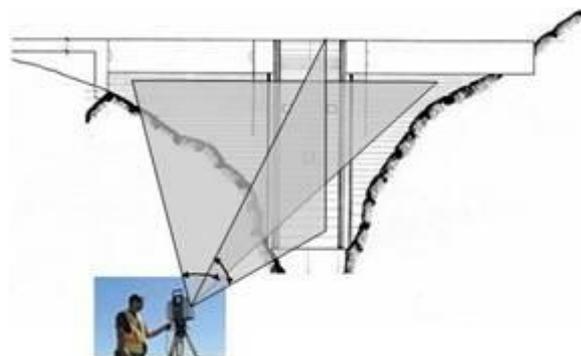


Figure 2.04-2: Représentation schématique du mode de relevé de la surface d'un barrage en béton

La mesure de distance sans réflecteurs entre la station du Laser-Scanning et l'objet est limitée de 50 jusqu'à 200 m au maximum selon l'instrument et la qualité de réflexion de la surface de l'objet.

La précision relative des points d'un tel Laser-Scanning terrestre est inférieure au centimètre. Elle dépend par ailleurs de la distance et de la qualité de la surface de réflexion de l'objet.

Pour l'application à partir d'un avion, le rayon d'action (hauteur de vol par rapport à l'objet) est au plus de 2'000 m. « Airborne » livre des modèles du terrain digitalisé avec une précision en altitude d'environ 10 à 15 cm et présente l'avantage que des résultats satisfaisants sont obtenus même dans des zones recouvertes de forêts. Par contre, la précision planimétrique dépend fortement de la hauteur de vol et de la détermination par GPS de la position du laser dans l'avion.

3. Dérangements possibles et erreurs de mesure

Sans signification.

4. Exigences techniques

Les coûts d'investissement pour un équipement Laser-Scanning sont élevés. L'emploi et la mise en œuvre du Laser-Scanning requièrent l'intervention de spécialistes.

5. Contrôles du fonctionnement et entretien

Pas important.

6. Redondance

Pas important.

8. Remarques

Le Laser-Scanning, en particulier avec des photos couleurs digitales, remplace dans une large mesure la photogrammétrie (voir aussi 2.03).

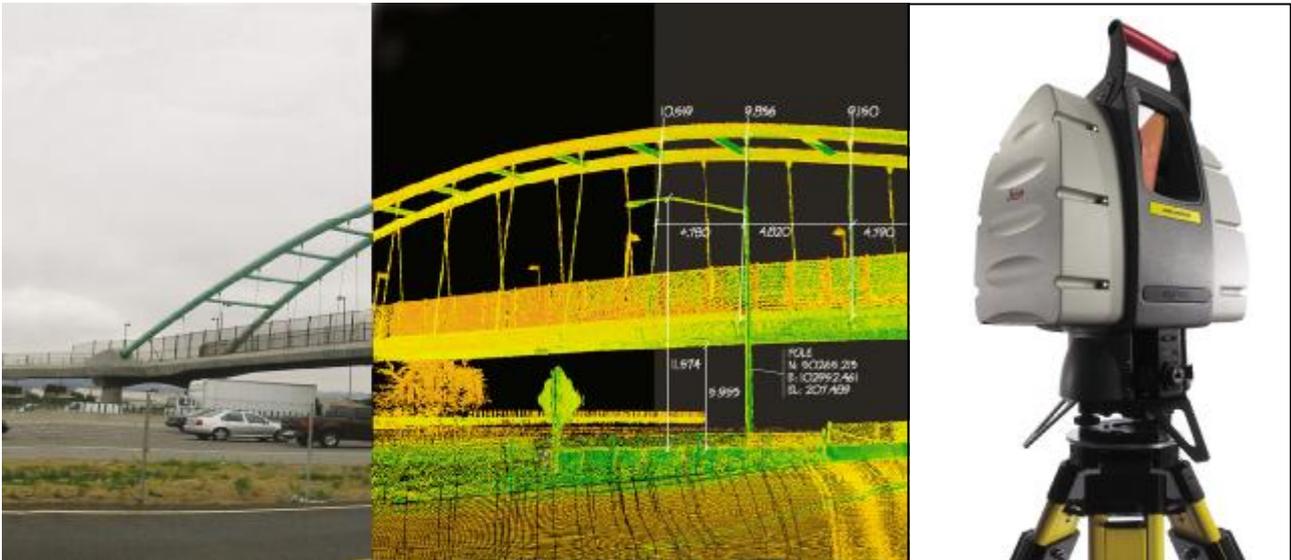


Figure 2.04-3: Représentation d'un nuage de points d'un objet relevé par Laser-Scanning

Déformées le long de lignes horizontales ou verticales

NIVELLEMENT

1. Principe de mesure

Le nivellement est une méthode simple pour la mesure des hauteurs. La différence d'altitude entre points voisins est déterminée par des visées horizontales (au moyen d'un niveau) sur une mire verticale. La différence d'altitude est égale à la différence des lectures avant - arrière sur la mire. Les instruments pour la réalisation de tels nivellements optiques sont :

- le niveau à bulle
- le niveau à compensateur analogue
- le niveau à compensateur digital

La précision des différences d'altitude déterminées par nivellement dépend de la précision de la nivelle ou du compensateur de l'instrument, ainsi que de la mire. Elle peut être de quelques centèmes de mm pour la différence d'altitude entre points voisins. Les mires en bois ou en aluminium portent un ruban d'invar avec une graduation précise.



Figure 2.05-1: Niveau digital
(Source: Schneider Ingénieurs SA)

En plus du nivellement géométrique, on peut également déterminer les différences d'altitude par nivellement trigonométrique (mesure d'angle de hauteur) ou, plus rarement, par nivellement hydrostatique (voir feuille explicative 2.12).

2. Appréciation

Pour la détermination de différences d'altitude, c'est une méthode éprouvée simple et bien adaptée. Pour obtenir une précision élevée (supérieure à ± 1 mm entre points voisins), il faut éliminer les erreurs systématiques des appareils de mesure (en particulier le niveau à compensateur) et des mires.

L'emploi de niveaux digitaux facilite la mesure des différences de hauteur. Le traitement des mesures est simple et facilement interprétable.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Les nivellements de haute précision sont très sensibles aux erreurs systématiques des instruments:

- affaissement (assurer une mise en place sûre)
- erreur de mise au net (inclinaison de la ligne de visée due au mouvement de la lentille de mise au net)
- champ électrique (magnétique) pour le niveau à compensateur
- erreur d'inclinaison (voir chapitre 5)

Pour les mires:

- erreur de division, erreur du point zéro de la division
- biais de la base de la mire
- non verticalité de la mire
- saleté sous la base de la mire
- saleté sur le point de mesure
- affaissement de la mire

Des erreurs systématiques sont induites par un éclairage artificiel de la mire lors de l'emploi de niveau digital.

Il est de toute façon recommandé de se placer toujours à mi-distance entre deux points voisins (portées égales).

4. Exigences techniques

La visée doit être dégagée entre l'instrument et la mire.

Les points de nivellement doivent être durablement rattachés par exemple au moyen de boulons. Si des nivellements sont souvent effectués, il est bon aussi d'assurer les points intermédiaires par des boulons.

Les points de référence ou fixes doivent être rattachés en groupe sous une forme appropriée et durable.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Contrôle des points de nivellement en ce qui concerne leur intégralité et les dégâts éventuels.
Contrôle des instruments et des mires en ce qui concerne:

- les erreurs d'inclinaison, éventuellement ajuster
- les erreurs de division de la mire (on peut éliminer par calcul l'erreur du point zéro de la division)
- la non verticalité de la mire (ajuster la nivelle à bulle d'air)
- le biais de la base de la mire

6. Redondance

Un cheminement avec des mesures aller-retour indépendantes est absolument requis pour disposer d'un nivellement sous contrôle.

Un rattachement d'un nivellement au réseau de triangulation (détermination trigonométrique des altitudes) offre une grande précision et fiabilité.

7. Remarques

L'exécution d'un nivellement semble être un travail simple. Ce travail n'est cependant pas exempt de difficultés et les surprises sont fréquentes quand la précision la plus grande possible est recherchée.



Figure 2.05-2: Mire de nivellement de 3 m

Déformées le long de lignes horizontales ou verticales

MESURE SIMPLE D'ANGLES ET DE DISTANCES ELECTRO-OPTIQUE

1. Principe de mesure

La **mesure simple d'angles** se situe entre l'alignement optique et la triangulation. En général, la mesure d'angles permet de déterminer des déplacements horizontaux dans une seule direction. En lieu et place d'une ligne horizontale comprise entre les points de référence et de contrôle d'un alignement optique, la mesure simple d'angles s'appuie sur des éléments de la triangulation. Les points de référence sont matérialisés par 1 - 2 stations de mesure implantées à l'aval à proximité des appuis latéraux.

La mesure périodique de l'angle α en visant des points de contrôle appropriés situés sur et à proximité du barrage permet de déterminer à partir d'une variation de l'angle $\Delta\alpha$, le déplacement du

point de contrôle dans la direction principale amont- aval. On suppose que la situation des points de référence A et B est stable, mais elle sera périodiquement contrôlée. On admet aussi que la distance entre les points de référence et de contrôle est fixe. Le choix du niveau des points de référence et de contrôle est libre.

Pour la mesure, il faut disposer d'un théodolite convenablement placé sur un pilier ou un trépied, lequel est muni d'un dispositif de centrage d'une précision appropriée. A titre de contrôle, on peut aussi mesurer un angle β depuis la station B. Dans ce cas, on doit obtenir plus ou moins les mêmes déplacements dans le sens amont - aval que ceux déterminés à partir du point A.

La **mesure simple d'angles verticaux** remplace la mesure par pendule dans le cas d'un barrage voûte à forte courbure verticale ou très mince. Elle consiste à déterminer, pour des repères situés sur le parement aval dans une section verticale donnée, un angle vertical (mesure de la distance zénithale, mesure d'un angle de hauteur) à partir d'un point de stationnement (éventuellement d'un pilier de mesure) situé au pied du mur.

On obtient le déplacement des repères par la mesure de la variation de l'angle en considérant comme fixes la situation et l'altitude du pilier de mesure, tandis que la variation de distance entre le pilier et les repères est négligée. Ces hypothèses doivent être périodiquement vérifiées au moyen de mesures de triangulation ou éventuellement par un pendule inversé placé au droit du pilier de mesure.

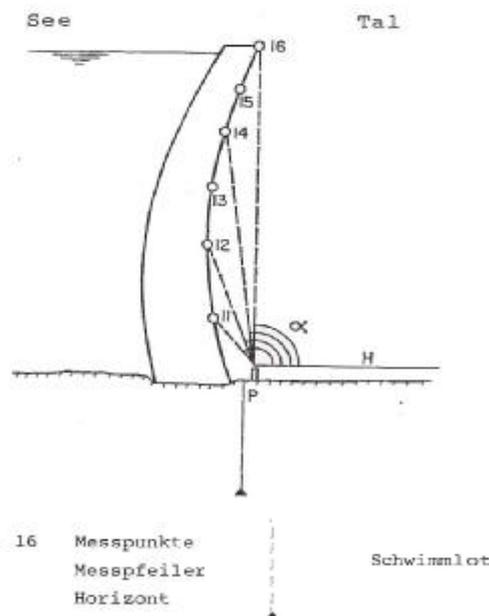
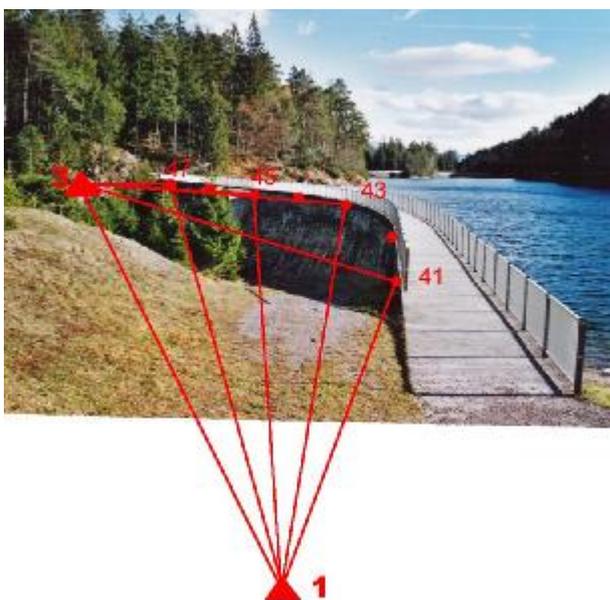
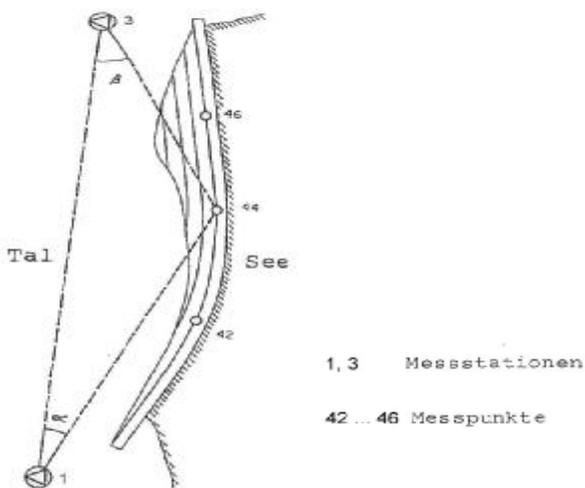


Figure 2.06-1: Mesure simple d'angle (Source: Schneider Ingénieurs SA, Coire)



Figure 2.06-2: Mesure d'angles verticaux pour un barrage-voûte

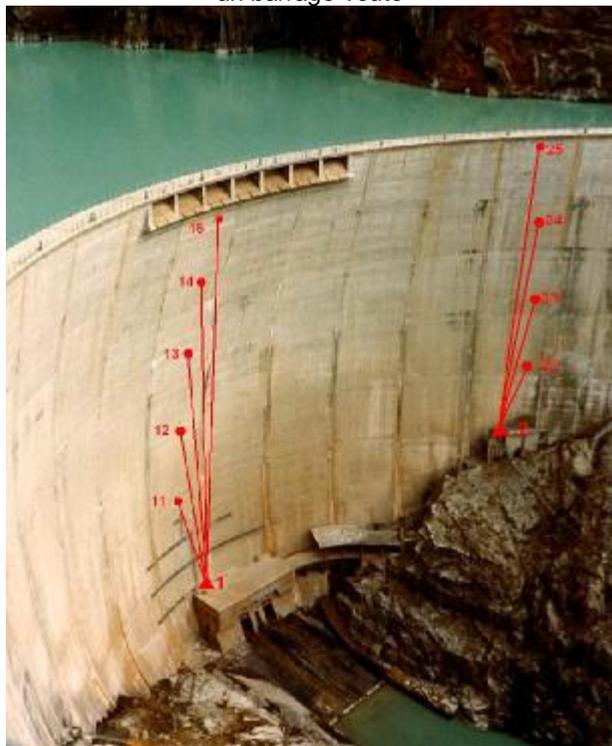


Figure 2.06-3: Mesure d'angles verticaux pour un barrage-voûte

▲ 1,2 Piliers de mesure ● 11..25 Points de contrôle

Théoriquement, la mesure de l'angle horizontal permet aussi de connaître le déplacement dans le sens transversal.

Cette mesure, relativement difficile, exige l'emploi d'un théodolite à secondes avec oculaire coudé pour visées fortement inclinées. Au besoin, les mesures d'angles verticaux exigent la pose de repères spéciaux.

La **mesure simple de distance** consiste à mesurer la distance entre une station située à l'aval et un point de mesure sur le barrage.

La variation de distance horizontale ΔD entre 2 mesures correspond au déplacement des points de contrôle dans la direction de mesure.

La mesure exige l'emploi d'un tachéomètre électro-optique et l'accès aux points de mesure pour y placer un réflecteur. La précision du tachéomètre définit la précision du déplacement.

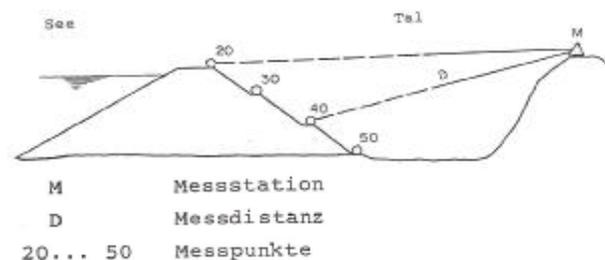


Figure 2.06-4: Distribution des points de mesure sur un barrage en remblai

Le calcul du déplacement du point de contrôle est aisé selon les méthodes précitées. Ces méthodes sont uniquement recommandées comme élément d'une triangulation.

Afin d'être complet, il faut encore mentionner les mesures en arrière avec ou sans distance, appelées aussi stationnement libre. La mesure est pour le moins inhabituelle pour déterminer les variations planimétriques et demande en règle générale des connaissances en géodésie.

2. Appréciation

La précision atteinte par les méthodes de **mesures simples d'angles et de distances** est convenable, mais en raison du manque de mesures surabondantes, on n'a pas ou presque pas de redondance. La méthode de la mesure simple de distance demande l'emploi d'un tachéomètre électro-optique.

La **mesure d'angles verticaux** demande un personnel qualifié. Comme en général l'atmosphère à proximité d'un barrage n'a pas une répartition normale, la mesure d'angles verticaux est fortement influencée par les anomalies de réfraction. Par ailleurs, d'autres erreurs systématiques faussent les mesures, telles que la hauteur de l'instrument, le centrage de l'instrument, la déviation de la verticale en raison de la variation du plan d'eau, etc. La mesure d'angles verticaux ne devrait être faite que si la mise en œuvre d'autres techniques de mesure est impossible.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Il est très important de tenir compte des défauts des instruments ou de les éliminer en appliquant correctement les principes de mesure (par exemple: mesure des angles dans les deux positions de la lunette, tenir compte de l'erreur d'index du théodolite ou de l'erreur d'échelle du tachéomètre). Les mesures dépendent des conditions météorologiques (conditions hivernales en haute montagne) et sont plus ou moins influencées par la réfraction.

Le nettoyage des points de mesure sales situés sur les parements des barrages est problématique en raison de leurs difficultés d'accès.

4. Exigences techniques

Toutes ces techniques de mesure dépendent de la topographie. Des lignes de visées dégagées entre la station de mesure et le point de contrôle sont indispensables. Il faut s'assurer de l'accessibilité aux stations de mesure.

Les stations de mesure sont à protéger contre les chutes de pierres, les avalanches, la poussée de la neige. Les mesures doivent être effectuées par un personnel spécialisé.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Contrôle des points de référence et des stations de mesure pour le cas de dégâts éventuel.

Contrôle et ajustement éventuel des instruments employés.

6. Redondance

Pour la mesure d'angles et de distances, la redondance est possible grâce à la mesure de la triangulation principale; ce qui n'est que partiellement le cas pour la mesure des angles verticaux.

Raccordement à des pendules inversés ancrés à grande profondeur.

7. Remarques

Déformées le long de lignes horizontales ou verticales

ALIGNEMENT OPTIQUE

1. Principe de mesure

La visée, par exemple au moyen d'un instrument d'alignement depuis un point de stationnement vers un point de repère fixe constitue un plan vertical de référence. Les points de contrôle se trouvent dans ce plan. Les variations de distance par rapport au plan de référence donnent les déformations. Il existe différentes méthodes:

- Un chariot mobile muni d'un repère est placé au droit des points de contrôle. Le repère est amené dans le plan de référence (alignement sur le réticule de la lunette). La distance au plan de référence est mesurée sur une échelle graduée fixée sur le chariot.
- Les points de contrôle sont équipés de repères fixés de manière permanente sur l'ouvrage. L'instrument de mesure est placé sur un chariot au point de stationnement. Après l'orientation de la visée sur le point de référence, celle-ci est amenée par translation au moyen du chariot sur le repère du point de contrôle.
- Depuis le point de stationnement, on mesure un angle horizontal entre le point de repère et les points de contrôle qui sont fixés directement sur l'ouvrage. Le déplacement du point est calculé en fonction de la variation de l'angle, en admettant comme constante la distance au point de contrôle qui a été préalablement déterminée de manière élémentaire (en principe, "mesure d'alignement" selon 2.05 en remplacement de l'alignement proprement dit).

Pour une reconstitution éventuelle du plan de référence, on se sert des mesures de direction vers des points de référence proches et vers un groupe de points d'orientation.

En règle générale, l'alignement est rattaché à un réseau de triangulation, ce qui permet une vérification périodique de la stabilité du plan de référence.

2. Appréciation

Méthode simple et efficace. La précision dépend de la distance, des conditions de réfraction et des instruments utilisés. La mesure d'angle est généralement plus indiquée que le recours à un chariot.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Réfraction, notamment lors de visées rasant par trop la surface des ouvrages, du terrain, de l'eau ou de la neige.

Visées gênées par la présence de neige, de plantes, d'arbustes ou de brouillard, de pluie, etc.

Dégâts ou destruction du dispositif de mesure par des avalanches, glissements de plaques de neige, éboulements, etc.

Erreurs systématiques des instruments.

Erreurs de centrage.



Figure 2.07-1: Collimateur

4. Exigences techniques

Conception irréprochable du système afin d'éliminer les erreurs d'observation, d'instruments et de centrage.

Prévoir le dispositif de mesure en tenant compte de l'influence de la réfraction, d'obstacles, etc.

Placer les points de stationnement et de référence dans des zones stables.

Avec l'emploi d'un chariot, ces conditions ne peuvent être remplies que partiellement, avant tout parce que l'ensemble du dispositif de mesure doit être aligné de façon précise dans un plan de référence vertical. Les mesures d'angles permettent plus de liberté pour adapter le dispositif de mesure aux conditions locales, mais nécessitent du personnel qualifié.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Contrôle périodique des points de stationnement, de référence et de contrôle dans le cas de dégâts éventuels. Dégager les visées.

Contrôle périodique des instruments, des centrages; éventuellement réglage ou révision.

6. Redondance

Par mesure de la triangulation principale ou par raccordement à des pendules inversés ancrés à grande profondeur.

7. Remarques

La mesure d'alignement optique est aujourd'hui dépassée. Elle peut être remplacée par d'autres méthodes telles par exemple la triangulation

feuille explicative 2.01) ou la mesure simple d'angles et de distances (voir feuille explicative 2.05).



Déformée le long de lignes horizontales ou verticales

POLYGONALE

1. Principe de mesure

La polygonale est une combinaison de vecteurs. Elle peut être aussi considérée comme une triangulation simplifiée (voir feuille explicative 2.01). Pour la mesure de ces vecteurs, les instruments et éléments de mesure suivants sont utilisés:

- théodolite de précision (erreur moyenne de mesure: $\pm 2^{\text{CC}}$)
- appareil de précision de mesure de distance (erreur moyenne de mesure selon les exigences: de ± 2 mm pour des digues en remblai jusqu'à $\pm 0,02$ mm pour les barrages en béton)

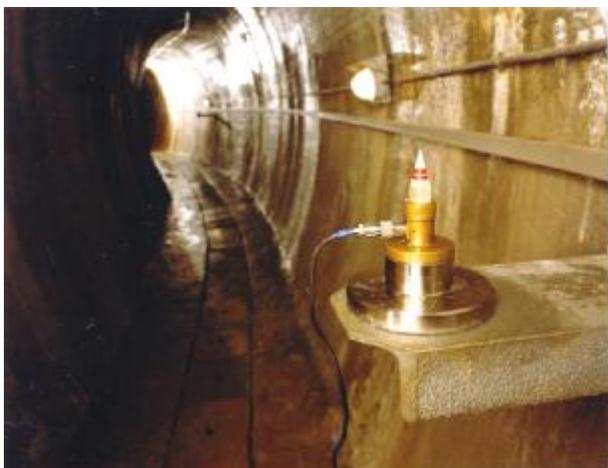


Figure 2.08-1: Mesure d'angles dans une galerie de contrôle

Les polygonales sont pour la plupart effectuées le long des galeries horizontales de barrages en béton.

Le centrage des instruments est de grande importance en raison des courtes distances de la polygonale et de la haute précision relative souhaitée; selon les circonstances (par ex. valeurs des déplacements à mettre en évidence, précision souhaitée), elle se situe entre ± 1 mm et $\pm 0,01$ mm. La stabilité des points de polygonales qu'il s'agisse de points au sol, de consoles, de socles ou de piliers dépend de ces exigences de précision. Le dispositif de mesure à installer doit répondre à ces exigences, aussi bien pour les points fixés sur le sol (mesure à partir de trépied) que pour les socles ou consoles avec plaque de centrage dans les galeries de contrôle.

2. Appréciation

La polygonale est une méthode éprouvée pour la détermination des coordonnées. Selon la précision demandée, installation de mesure simple à coûteuse. En général, les différences d'altitude sont déterminées au moyen d'un nivellement (voir

feuille explicative 2.05), éventuellement par mesures d'angles de hauteur.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Les polygonales sont sensibles aux erreurs systématiques. Les instruments et leur dispositif de centrage doivent être périodiquement contrôlés. Les polygonales dans les galeries sont indépendantes des conditions atmosphériques. Les courants d'air dans les galeries influencent les mesures.

4. Exigences techniques

La visibilité entre les points voisins de la polygonale doit être assurée. Les polygonales exigent en règle générale une instrumentation importante. En règle générale, en raison de la propagation des erreurs, la polygonale doit être combinée avec des mesures de pendules et/ou un réseau de triangulation. Si cela est possible, les polygonales en galeries de barrages en béton seront prolongées dans les galeries en rocher. Pour les mesures de distance avec fils ou rubans en invar, il faut prévoir des segments égaux et assez de place pour la flèche du fil. Les courants d'air dans les galeries doivent être évités.

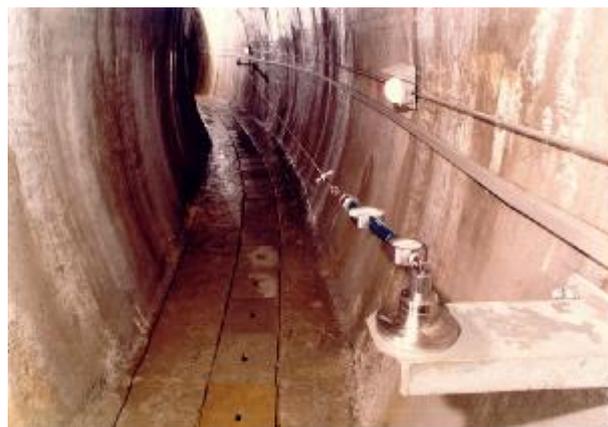


Figure 2.08-2: Mesure de distance avec un fil invar entre 2 consoles dans une galerie de contrôle

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Contrôle des points repérés en cas de dégâts éventuels.

Contrôle des instruments employés.

6. Redondance

Les mesures aller et retour indépendantes des angles et des distances de la polygonale assurent une bonne redondance interne. De plus, différents

files invar permettent la mesure des segments de la polygonale. Le rattachement aux pendules et/ou au réseau de triangulation garantit une redondance extérieure.

7. Remarques

Les polygonales, grâce à leur nombre élevé de points le long de lignes horizontales (galeries de

contrôle), est une méthode idéale pour déterminer les déformations. Les précisions relatives atteintes sont sans concurrence.

(Photos: Schneider Ingénieurs SA, Coire)

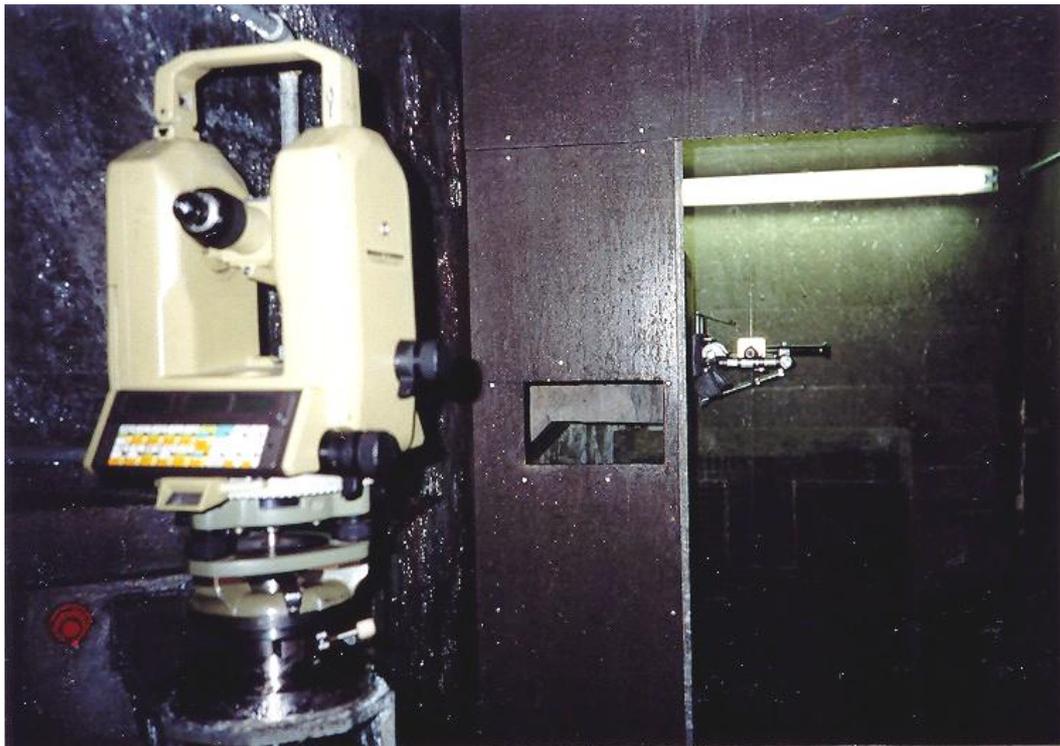


Figure 2.08-3: Théodolite et station de mesure de pendule avec une ouverture pour la visée

Déformées le long de lignes horizontales et verticales

PENDULE, PENDULE INVERSE

1. Principe de mesure

Le pendule permet la mesure précise de déplacements horizontaux. Il est essentiellement constitué par un fil suspendu qui est centré avec précision et tendu par un poids. En vue de permettre l'amortissement d'une oscillation éventuelle du pendule, le poids tendeur du fil se trouve dans une cuve remplie d'eau ou d'huile. Le pendule inversé, ancré à son extrémité inférieure, est muni d'un flotteur pouvant se mouvoir librement dans une cuve conçue à cet effet. La force de tension du fil se situe entre approximativement 200 et 2000 N pour les deux équipements. Le pendule inversé peut de plus être équipé d'un système de centrage. Dans un forage muni d'un tube rainuré, le fil peut être centré à n'importe quel niveau par un ancrage mobile. Cette combinaison permet la détermination de la déformée le long du forage. Par visée optique du fil, à l'aide d'un instrument spécialement conçu à cet effet, à différents niveaux, la déflexion de la section du barrage peut être déterminée. Alors que la lecture dans deux directions orthogonales a été



Figure 2.09-1: Pendule inversé avec système de centrage mobile et enregistrement automatique

effectuée jusqu'à aujourd'hui le plus souvent sur une échelle équipée d'un vernier, les instruments les plus récents sont équipés d'un dispositif de mesure à indication digitale.



Figure 2.09-2: Système de centrage

2. Appréciation

Les deux équipements de pendule ont fait leurs preuves depuis de nombreuses années. C'est une mesure simple et très précise, pratiquement irremplaçable pour le relevé périodique de la déflexion du barrage. Le système de centrage peut se révéler très utile dans le cas où un pendule devrait être installé ultérieurement. Ainsi, avec un seul poste de lecture, le déplacement peut être mesuré à différentes profondeurs.

Automatisation du relevé de la position au fil de pendule et transmission à distance des mesures sont possibles et sont importantes pour la surveillance à distance.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

En plaçant l'instrument de mesure avec peu de soins sur ses repères, des écarts de mesure notables peuvent en résulter.

- Une quantité insuffisante d'eau/d'huile dans la cuve du flotteur d'un pendule inversé entraîne un blocage du flotteur et conduit à une position erronée du pendule inversé,

- dans la cuve d'amortissement d'un pendule conduit à un accroissement de la tension du fil, par réduction de la poussée d'Archimède, et par conséquent, à un allongement du fil, avec le risque que le poids tendeur touche le fond de la cuve.



Figure 2.09-3: Lecture au coordisclope

En présence de fourchettes pour la transmission à distance des mesures la position du fil peut être faussée suite à l'apparition de frottements trop importants. Il est donc recommandé d'utiliser des appareils de mesure qui n'entravent pas le mouvement du fil.

Un fil coudé conduit à des imprécisions notables des mesures.

Le fil du pendule peut parfois toucher le col de la cuve d'amortissement – ou la cuve du flotteur. Le poids tendeur ou le flotteur peut aussi toucher le fond la cuve respectivement la boue déposée au fond de celle-ci.

La liberté de mouvement du fil dans des puits et des forages peut être gênée par des efflorescences ou par des objets tombés dans ces éléments.

Un centrage du fil effectué sans soins peut parfois conduire à un saut apparent dans les déplacements mesurés.

La formation de glace autour d'un point de suspension ou dans une cuve à flotteur peut non seulement conduire à une position faussée du pendule, mais parfois aussi à la rupture du fil ce qui, pour les pendules inversés, peut aussi endommager le flotteur (des fils chauffants ont prouvé leur efficacité).

Suite à des déformations importantes dans la fondation rocheuse, lors de la première mise en eau, il arrive parfois aussi que le tube scellé dans le forage d'un pendule inversé se rompe. Si dans ce cas, de l'eau jaillit dans le tube, le pendule inversé

est mis en mouvement ce qui empêche pratiquement la continuation de la mesure sans que l'on procède à la réparation du tube. Suite à des déformations du rocher ou des injections, le forage peut se déformer de telle façon que le fil vient en contact avec le tube. Autant que possible, le point d'ancrage doit être déplacé ou un reforage sera entrepris afin de redonner au fil toute sa liberté de mouvement.

Un courant d'air dans le puits de pendule met le pendule en oscillation ce qui rend les lectures difficiles, erronées et parfois impossibles.

4. Exigences techniques

Les points de suspension doivent être rendus accessibles pour inspection.

Le dispositif de suspension doit être muni d'un centrage précis du fil.

Les postes de lecture doivent être éclairés correctement et protégés le mieux possible contre des écoulements d'eau provenant des puits de pendule.

Des courants d'air dans les puits de pendule doivent être évités, afin de ne pas fausser la position des pendules. Pour cela, toutes les niches de mesure doivent être séparées du système des galeries de contrôle et fermées par des portes.

Afin de protéger le personnel, la chute d'éventuels contrepoids de centrages intermédiaires doit être empêchée par des mesures adéquates.

Afin d'empêcher, à coup sûr, la rupture du tube installé dans un forage de pendule inversé, celui-ci doit si possible être aménagé dans la partie aval de la surface d'appui du barrage (zone comprimée).

Pour les pendules inversés, il doit être exigé que la tension dans le fil:

- puisse être vérifiée facilement à l'aide de repères fixés sur le flotteur, qui indiquent la tension correspondante ou
- puisse être mesurée directement par un dispositif adéquat.

Pour la surveillance à distance, la position du fil devrait être relevée sans contact, et si possible, à l'aide d'un instrument ne présentant pas d'éléments mécaniques.

Lors du choix des appareils, il faut tenir compte de l'amplitude attendue du mouvement du fil.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Contrôler si l'espace libre pour des mouvements horizontaux est assuré sur toute la hauteur du pendule. (Faire glisser l'ancrage mobile sur la hauteur du forage.)

Vérifier si la quantité d'eau dans la cuve à flotteur est suffisante et contrôler par mouvements verticaux si la distance entre le poids tendeur et le fond de la cuve d'amortissement est encore suffisante.

Eau/huile dans la cuve d'amortissement doit être vérifiée lors de chaque mesure effectuée manuellement. En cas de besoin il est indispensable d'ajouter de l'eau.

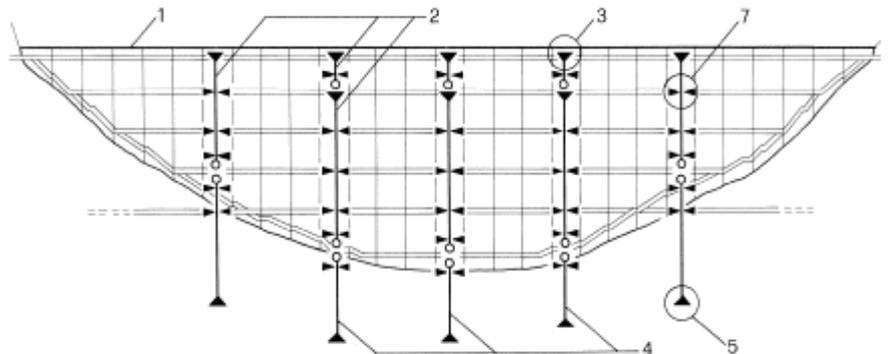
En présence d'une fourchette d'un dispositif de télémessure vérifier si le fil, après un mouvement imposé, reprend sa position originale. Si nécessaire, contrôler la position du fil après avoir démonté ou déclenché la fourchette. Contrôler en hiver s'il y a formation de glace autour de la suspension ou dans la cuve du flotteur. Dans l'affirmative, prendre des mesures pour l'empêcher. De temps en temps, les pendules doivent impérativement être contrôlés par mesures géodésiques (au minimum une fois par période quinquennale), afin de vérifier la stabilité de leurs points fixes.

6. Redondance

Comparaison des déflexions observées dans plusieurs sections d'un barrage.
Combinaison avec mesures géodésiques de même que l'alignement (ou polygonale).
Comparaison des résultats obtenus par pendules avec ceux d'autres mesures de déformation tels que clinomètre, tiltmètre, extensomètre, etc.

7. Remarques

Il est recommandé de disposer d'un instrument de mesure de remplacement.

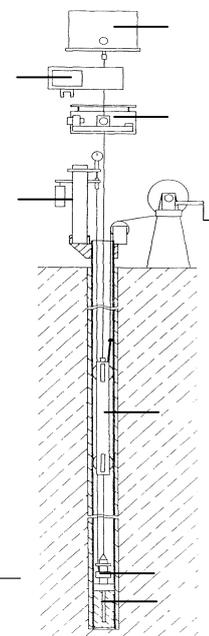
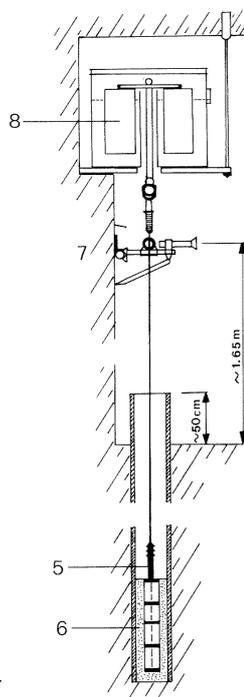
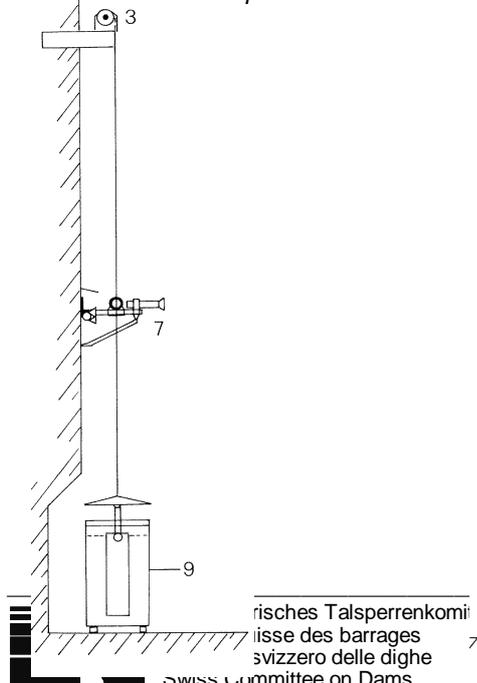


De cette façon, il est possible d'effectuer de temps en temps des mesures de comparaison. Lors du remplacement de l'appareil de mesure, de nombreuses mesures de comparaison doivent être faites avec l'ancien et le nouvel appareil. Lors du changement du fil, une mesure doit être impérativement réalisée avant et après le remplacement.

1. Couronnement
2. Pendule
3. Point de suspension d'un pendule
4. Pendule inversé.
5. Ancrage du pendule inversé
6. Coulis de ciment durci
7. Poste de mesure (pour coordiscope)
8. Flotteur / Cuve du flotteur

Figure 2.09-4: Exemple d'une disposition moderne de stations de mesure de pendules

11. Système de centrage mobile
12. Mesure verticale de distance
13. Mesure automatique



*Figure 2.09-5:
Pendule direct*

*Figure 2.09-6:
Pendule inversé*

*Figure 2.09-7:
Pendule inversé
avec système de
centrage mobile*



Déformées le long de lignes horizontales et verticales

ALIGNEMENT PAR FIL

1. Principe de mesure

Pour l'essentiel, les éléments de l'alignement par fil sont empruntés à ceux du pendule. En règle générale, un fil est librement tendu d'une rive à l'autre le long de parois rectilignes en galeries ou le long du parapet au niveau du couronnement. Ce fil définit un plan vertical de référence. Les déformations par rapport à ce plan, c'est-à-dire les composantes amont - aval, qui correspondent aux variations de la distance du fil à la paroi, sont déterminées au moyen d'un chariot de mesure. L'instrument de mesure est fixé à la paroi. La position du fil visé verticalement est lue sur le chariot de mesure (échelle avec vernier ou indicateur digital) comme pour un pendule.

1. Alignement le long du couronnement à l'aide d'un fil d'acier
2. Pendules
3. Stations du réseau de triangulation
4. Détail de la mesure par alignement

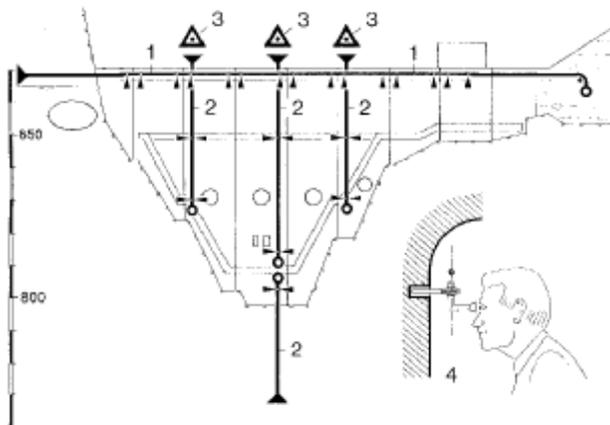


Figure 2.10-1: Exemple d'une disposition moderne de stations de mesure d'alignement

Le fil est soumis à une tension constante de manière que la flèche ne varie pas, limitant ainsi la distance entre l'appareil de mesure et le fil. La tension est assurée par un poids librement suspendu à l'une des extrémités du fil après que ce dernier a été amené en position verticale par une poulie de renvoi à faible frottement.

La portée dépend du poids et de la qualité du fil. Des portées jusqu'à 200 m pour une flèche maximale de 20 cm sont possibles sans autre. Pour des portées plus grandes, le niveau du radier doit être adapté à la flèche. Celle-ci peut être réduite au moyen de supports intermédiaires conçus sous forme de flotteurs de façon que le fil oscille dans un plan vertical tout le long de la portée (flotteur semblable à celui des pendules inversés).

L'alignement par fil permet également de mesurer les déplacements relatifs au joint entre deux blocs (cisaillement), en prévoyant des stations de mesure de part et d'autre du joint.



Figure 2.10-2: Suspension intermédiaire d'un fil au moyen d'un flotteur

2. Appréciation

Mesure simple et précise équivalant à celle d'un pendule.

Ne convient qu'aux ouvrages rectilignes.

Remplace avantageusement l'alignement optique. La précision est indépendante de la longueur de l'alignement et de la réfraction. La mesure est possible également par faible visibilité.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Coude du fil au droit des points de fixation ou de lecture. Centrage imparfait du fil au droit des points de fixation. Mauvaise mise en place de l'instrument de mesure.

Courant d'air provoquant un mouvement du fil ou faussant sa position.

Modification de la flèche du fil suite à la formation d'eau de condensation.

Cet équipement se prête à l'automatisation et à la télétransmission.

4. Exigences techniques

Paroi longue et rectiligne en galerie ou un parapet au niveau du couronnement.

L'installation de mesure sera prolongée si possible dans les flancs de la vallée par des galeries. Au besoin, le profil du radier de la galerie sera adapté à la flèche du fil.



Figure 2.10-3: Point fixe d'alignement

Aucune fabrication en série ayant fait ses preuves n'est connue. Des expériences concluantes à long terme ont été faites cependant en galeries ou sur des couronnements: Schräh (dès 1973) et Rempen des Forces motrices du Wagital, Mapragg des Forces motrices du Sarganserland (Barrages suisses 1985, pages 62 et 214; congrès CIGB 1985, Q56/R53-Vol.I, pages 986 et 999) et Pigniu des Forces motrices Ilanz.

Guidage précis du fil aux points de la fixation: serre-fils coaxiaux, éléments mobiles orientables exactement dans un même plan, "appui" supplémentaire du fil contre la surface d'un cylindre vertical aux deux extrémités de la portée libre.

Le fil ne doit être ni coudé ni déformé.

Assurer une tension constante: un dispositif compensera les variations de longueur du fil dues aux différences de température ainsi que les variations de distance entre les points de fixation, variations dues aux déformations de l'ouvrage (par exemple, poulie de renvoi à faible frottement et poids librement suspendu).



Figure 2.10-4: Appareil de mesure d'alignement

Dans le cas d'utilisation à l'extérieur, il convient de protéger le fil des courants d'air (par exemple, évidemment dans le parapet fermé par un couvercle). La fixation de l'appareil de mesure doit être exactement à angle droit avec le fil.

Centrage et orientation soignés de l'appareil de mesure.

Prévoir des stations de mesure proches des points de fixation pour le contrôle de l'appareil de lecture. Ces stations garantissent en outre la reconstruction du plan vertical de référence en cas de remplacement du fil ou du dispositif de fixation.

Ne pas prévoir de station de mesure trop proche de joints, d'angles, etc., pour éviter de fausser les mesures par des déformations locales non représentatives de celles de l'ouvrage.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Avant de procéder aux mesures, tapoter le fil pour éliminer l'eau de condensation. Ensuite laisser le fil se stabiliser.

Contrôles lors de la mesure: déplacement libre du fil tout le long de la portée, déplacement libre du dispositif de mise en tension, contrôle de l'instrument de mesure aux stations prévues à cet effet.



Figure 2.10-5: Point fixe d'alignement avec poids tendeur

Contrôles périodiques: le fil ne doit être ni coudé, ni déformé, ni entaillé; libre déplacement de la poulie de renvoi.

6. Redondance

Combinaison avec des mesures géodésiques (par exemple, polygonale) ainsi que des pendules.

7. Remarques

Il est recommandé de disposer d'un instrument de mesure de remplacement.

De cette façon, il est possible d'effectuer de temps en temps des mesures de comparaison.

Lors du remplacement de l'appareil de mesure, de nombreuses mesures de comparaison doivent être faites avec l'ancien et le nouvel appareil.

Lors du changement du fil, une mesure doit être impérativement réalisée avant et après le remplacement.

Déformées le long de lignes horizontales et verticales

REPERE DE TASSEMENT VERTICAL

1. Principe de mesure

Tube vertical en matière synthétique, dont les éléments successifs sont montés au fur et à mesure de la progression du remblai. A distance voulue (de 3 à 10 m), des plaques ou des bagues métalliques (acier, aluminium) sont placées horizontalement à l'extérieur du tube, solidaires du remblai et pouvant coulisser sur le tube. Leur position relative est repérée au moyen d'une sonde à induction. La distance est mesurée par rapport à l'arête du bord supérieur du tube. Mode de repérage: acoustique (sifflet) ou optique (courant d'induction maximum mesuré à l'appareil d'enregistrement). Dans le cas de fondation en terrain meuble, le dispositif peut être prolongé par un forage de quelques dizaines de mètres de profondeur. En lieu et place des plaques de repère, des bagues métalliques sont mises en place en contact direct avec le sable de remplissage du forage.

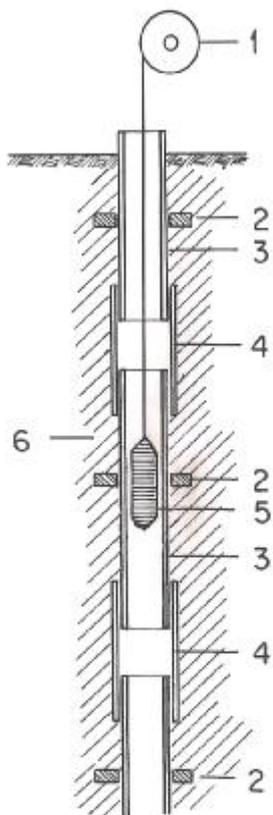


Figure 2.11-1: Repère de tassement

1. câble de mesure et appareil d'enregistrement
2. plaques métalliques
3. tubes
4. manchon
5. sonde de mesure
6. remblai

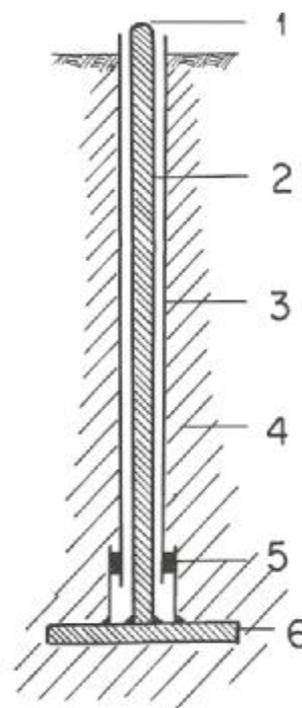


Figure 2.11-2: Repère de tassement avec plaque de base

1. point de mesure (nivellement)
2. tige de mesure
3. tube de protection
4. remblai
5. manchon de glissement
6. plaque de base

Si une bague métallique est mise en place sur un élément du tube, la position de tous les éléments peut être déterminée indépendamment des repères de tassement. L'inclinomètre peut se révéler très utiles pour affiner les valeurs des mesures. En règle générale, on peut renoncer aux plaques de repères si l'élément de tube n'est pas trop long. Plusieurs mesures de comparaison montrent même des valeurs de tassement identiques pour les éléments de tube et les plaques de repère. En variante, le dispositif peut également être placé horizontalement.

2. Appréciation

Dispositif de mesure approprié pour remblais homogènes constitués par des matériaux fins à graveleux jusqu'à environ 50 m, exceptionnellement 100 m de hauteur. L'installation fortement inclinée ou horizontale est contestée. Dans ce dernier cas, un treuil installé en bout de tube permet à l'aide d'un câble va-et-vient de déplacer le capteur pour

les mesures. En alternative, la sonde peut être introduite dans le tube au moyen de tiges. Cet équipement se prête à l'automatisation et à la télétransmission.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Introduction de matériau et de corps étrangers dans le tube. Déformation du tube suite à de grandes déformations horizontales de la digue, en particulier (blocage de la sonde pour des ouvrages de grande hauteur).

Rupture du tube sous l'effet d'une forte poussée des terres. Cisaillement du tube au passage de la zone de contact de deux matériaux.

Sollicitation excessive des manchons de liaison des tubes. Adhésion des plaques au tube (prévoir des manchons coulissants entre la plaque et le tube).

Influence du champ magnétique sur la sonde (réglage sur place). Frottement du câble à la paroi du tube (en particulier dans des courbes) introduit des allongements complémentaires et fausse la mesure.

Allongement du câble de suspension de la sonde. Déformation spatiale du tube complique l'interprétation correcte des mesures (éventuellement à combiner avec un inclinomètre).

4. Exigences techniques

a) Mise en place

La longueur des éléments du tube ne doit pas excéder 6 m (ou mieux 3 m). Les manchons de liaison doivent être de longueur suffisante (jusqu'à quelques décimètres) afin de pouvoir suivre le tassement du remblai. Les manchons doivent être munis par exemple de manchettes en caoutchouc afin d'éviter l'entrée du matériau de remblai. Lors de la mise en place, la verticalité du tube doit être contrôlée pendant la montée du remblai et être corrigée si nécessaire. L'encastrement du tube au moyen d'un matériau approprié mis à la main doit précéder le remblai de 0.5 à 1.0 m. La partie du tube qui sort du remblai doit être protégée de manière efficace et être signalée par des éléments visibles ou gardée par un surveillant afin d'éviter tout dommage par les engins de terrassement. La partie supérieure du tube doit toujours être fermée par un capuchon. En variante, le tube peut suivre le remblai (puits). Prévoir un espace libre à l'extrémité inférieure du tube.

Enfin, à la fin des travaux des digues de grande hauteur (> 100 m), on devrait placer dans des

forages des repères de tassement supplémentaires à côté de certains mis en place pendant les travaux afin de suivre les tassements postérieurs à la construction.

b) Mesure

La distance à chaque plaque doit être relevée tant à la descente qu'à la montée de la sonde. Le bord supérieur du tube doit être nivelé lors de chaque mesure. Pour de grandes longueurs, la sonde doit le cas échéant être alourdie afin que le câble soit toujours tendu.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Contrôle fréquent du fonctionnement électrique de la sonde et des appareils de lecture.

Examen occasionnel de l'allongement du câble.

Disposer d'au moins 2 sondes et appareils de lecture identiques pour chaque ouvrage, dont la compatibilité aura été vérifiée (également pendant les travaux).

6. Redondance

Un tube endommagé est la plupart du temps irrémédiablement perdu. Il faut donc équiper plusieurs profils de mesure, au moins 3 par digue. Comme moyen de redondance, on peut recourir aux repères de tassement hydrauliques et aux chaînes d'extensomètres (voir feuilles explicatives 2.11 et 2.14) ce qui permet de couvrir les cas difficiles, par exemple dans les zones où l'on s'attend à d'importants tassements différentiels qui peuvent conduire à une forte sollicitation du matériau, voire à des fissures. Le cas échéant un autre moyen de redondance consiste en un nivellement de la tête du tube et d'une galerie de contrôle sur le toit de laquelle s'arrêtent les tubes.

7. Remarques

Les repères de tassement peuvent être utilement combinés avec un inclinomètre, si le tube est muni de rainures. La prise en compte de la déformation horizontale du tube permet une interprétation en toute confiance des tassements de la digue.

Si des repères de tassement doivent être mis dans un enrochement, les tubes et les plaques doivent être placés dans un enrobage de gravier bien calibré.

Dans le cas simple de petites digues, une plaque fixée à l'extrémité inférieure d'un double tube peut servir de repère de tassement.

La sonde mécanique USBR n'est aujourd'hui plus d'un usage courant et a été remplacée par une sonde à induction.

Déformées le long de lignes horizontales et verticales

REPÈRE DE TASSEMENT HYDRAULIQUE

1. Dispositif de mesure

Le repère de tassement hydraulique fonctionne selon le principe des vases communicants. La cellule de mesure est munie d'un système hydraulique ouvert comprenant une buse faisant office de trop-plein. La cellule est placée dans le remblai et enrobée de sable. Du poste de lecture, une conduite d'alimentation permet l'introduction d'eau désaérée jusqu'au trop-plein de la cellule. L'eau en excès est évacuée jusqu'au poste de lecture par une conduite de drainage. Une conduite d'aération entre le poste de lecture et la tête de la cellule doit être prévue dans le but d'avoir la pression atmosphérique au droit des deux points. La mesure s'effectue par le relevé d'un niveau sur un tube fixe translucide gradué au poste de lecture; éventuellement utilisation d'une contre-pression de mercure.

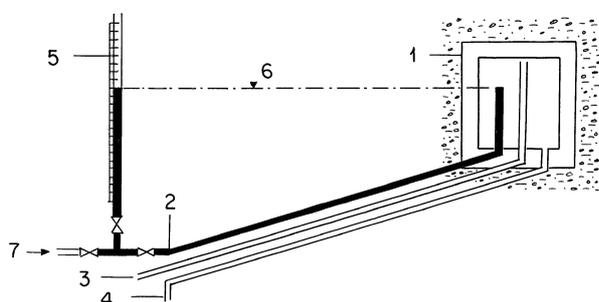


Figure 2.12-1: Schéma d'un repère de tassement hydraulique

1. Cellule de mesure
2. Conduite d'alimentation
3. Conduite d'aération
4. Conduite de drainage
5. Tube fixe gradué transparent
6. Niveau d'eau pour la mesure
7. Conduite d'alimentation d'eau désaérée

2. Appréciation

Système adapté pour tout remblai, en particulier si la mise en place d'un repère de tassement n'est pas possible, par exemple dans la zone amont de digues avec revêtement d'étanchéité. Le poste de mesure doit se trouver à un niveau inférieur à celui de la cellule, afin que la différence d'altitude de la cellule par rapport au poste de lecture soit donnée par une pression hydraulique statique (par rapport au trop-plein).

Comme l'altitude du poste de mesure par rapport à la cellule doit être connue avec précision, le système est quelque peu compliqué.

Cet équipement se prête à l'automatisation et à la télétransmission.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Introduction de corps étrangers dans les conduites de mesure. Mauvais dégazage de l'eau pour la mesure.

Rupture des conduites suite à des tassements différentiels de deux types de matériaux voisins que doivent traverser les conduites, ce qui réduit le domaine d'utilisation du système aux remblais dont les tassements sont modérés.



Figure 2.12-2: Repère de tassement hydraulique dans la fondation d'un barrage en béton

4. Exigences techniques

La cellule doit être placée si possible sur une plaque de base. Les conduites (3 par cellule) doivent être continues (sans manchons ni brides) depuis la cellule jusqu'au poste de lecture. Cependant une pente doit toujours être prévue entre la cellule et le poste de lecture, en évitant des points hauts.

Les conduites d'alimentation et de drainage sont des tubes en nylon de 3-4 mm de diamètre intérieur. La conduite d'aération doit avoir un diamètre intérieur de 6-7 mm.

Les conduites doivent être posées sur un lit de sable dans le remblai.

Lors de la pose, les conduites doivent être clairement identifiées (par exemple, au moyen de rubans plastiques de couleur). La sécurité contre le gel de toute l'installation doit être garantie.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Les conduites doivent être régulièrement nettoyées et purgées. L'eau de mesure doit être bouillie pour être dégazée.

Le niveau de référence des tubes fixes gradués doit être repéré régulièrement.

6. Redondance

La redondance peut être obtenue par un repère de tassement au même point ou par la mise en place de 2 cellules au même point avec un système de conduites indépendantes.

7. Remarques

Comparativement aux repères de tassement, ce système est relativement onéreux.



Variation de longueur

DISTOMETRE / DISTINVAR

1. Dispositif de mesure

Le distomètre et le distinvar sont des appareils de mesure de haute précision pour la détermination d'une modification de longueur au moyen de fil invar ou en acier. Le fil et l'appareil de mesure du distomètre sont fixés entre des boulons qui définissent le segment de mesure. Un équipement de mise en tension intégré à l'appareil de mesure assure une traction constante de 8 kg du fil. Un micromètre mesure l'intervalle entre le distomètre et l'extrémité du fil invar fixé à l'instrument. Le distomètre est un appareil totalement mécanique muni d'un ressort qui permet de tendre manuellement le fil. Il a été développé pour des mesures de convergences en tunnel.

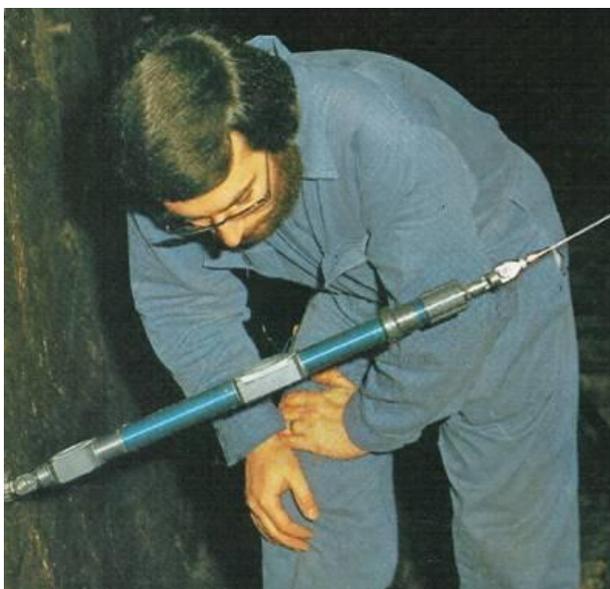


Figure 2.13-1: Distomètre en position de mesure

Le distinvar et son pivot sont fixés à l'aide d'une plaque de centrage sur un pilier ou une console. Le fil est tendu au moyen d'une balance de précision et un appareil digital mesure l'intervalle entre le distinvar et l'extrémité du fil invar fixé à l'instrument. Le distinvar a été développé au CERN et utilisé pour la mesure précise de longueurs en métrologie.

Les 2 appareils peuvent mesurer des distances de 1 à environ 30 m. Des distances plus longues sont possibles toutefois avec des restrictions.

Les mesures avec des fils invar sont des mesures relatives. Pour obtenir des distances absolues, un calibrage de l'équipement entier (appareil de mesure et fil invar) est nécessaire. Depuis longtemps, les 2 appareils sont utilisés pour les mesures géodésiques (par exemple, polygonales dans les galeries des barrages) et des mesures de segments

dans le terrain (par exemple, mouvement de rocher dans les environs de la retenue).

2. Appréciation

Par leur utilisation facile et leur haute précision des mesures de $\pm 0.01 - 0.03$ mm, le distomètre et le distinvar sont des instruments très utiles pour des mesures particulières. Le distomètre peut mesurer dans toutes les directions (horizontale, inclinée, verticale). Le distinvar ne peut être utilisé que pour de mesures horizontales ou légèrement inclinées (jusqu'à 10 %).

La plage de mesure du distomètre est de 10 cm, celle du distinvar de 5 cm. Des fils de longueurs différentes doivent être prévus pour les différents tronçons de mesure.

En regard de l'avantage de la faible dilatation du fil invar (environ $\pm 1 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) par rapport à celle de l'acier (environ $\pm 10 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), des variations de longueur des fils invar sont dues à des charges thermiques et mécaniques.



Figure 2.13-2: Distinvar monté sur une console pour la mesure de tronçons de polygonale dans une galerie de barrage

3. Dérangements possibles et erreurs de mesure

L'instabilité des boulons et un travail peu minutieux peuvent conduire à des dérangements et des erreurs.

Un étalonnage imprécis du distomètre, un pli du fil invar en raison d'une mauvaise manutention, la confusion des fils et les problèmes généraux déjà évoqués lors de l'utilisation de fils invar et en acier

(dilatation, etc.) conduisent à des erreurs de mesure.

4. Exigences techniques

Les boulons de mesure du distomètre doivent être solidement fixés dans le béton de masse ou le rocher. Les boulons doivent être protégés contre toute dégradation (couvercle, etc.).

Il faut prévoir des relevés de température pour la compensation des mesures. Pour les mesures géodésiques, un fil invar d'un diamètre de 1,65 mm est employé.

5. Contrôles du fonctionnement et entretien

Après chaque mesure avec le distomètre, la tension et la longueur du tronçon de mesure doivent être étalonnés avec le matériel adéquat. Le distivar est plus stable et de ce fait ne demande qu'un étalonnage tous les 1 à 2 ans. Les appareils de mesure doivent être contrôlés de temps en temps par le fournisseur.

6. Redondance

Pour le contrôle des distances ou des déplacements mesurés, les mesures peuvent être effectuées avec plusieurs fils. Il est alors possible de vérifier la stabilité des fils. Les mesures qui sont ainsi répétées et corrélées les unes avec les autres, ne demandent aucune redondance complète. Une meilleure redondance est donnée par l'emploi d'appareil de mesures électro-optique, par exemple lors de mesures géodésiques.

7. Remarques

En cas de dépassement de la plage de mesure, des rallonges de longueur constante sont utiles. Autrement, il ne reste qu'à préparer un nouveau fil.

(Photos: Schneider Ingénieurs SA, Coire)

Variation de longueur et déformée le long de lignes de forages

EXTENSOMETRES A TIGES ET A FIL

1. Principe de mesure

Les nombreux extensomètres, à une ou plusieurs tiges, disponibles sur le marché permettent tous de mesurer des variations de longueur dans un forage, entre un point d'ancrage (d'une tige ou d'un fil) et une tête de mesure fixée à l'entrée du forage. En principe, les extensomètres se distinguent entre eux par les 3 points suivants:

- type de leur ancrage
- construction des éléments longitudinaux: tiges ou fils
- manière dont la mesure de la variation de longueur est obtenue: mécaniquement ou électriquement (principe de la variation d'une résistance électrique ou celui de la corde vibrante).

ferment, ainsi que déterminer les mouvements approximatifs de ceux-ci. Cet équipement se prête à l'automatisation et à la télétransmission.

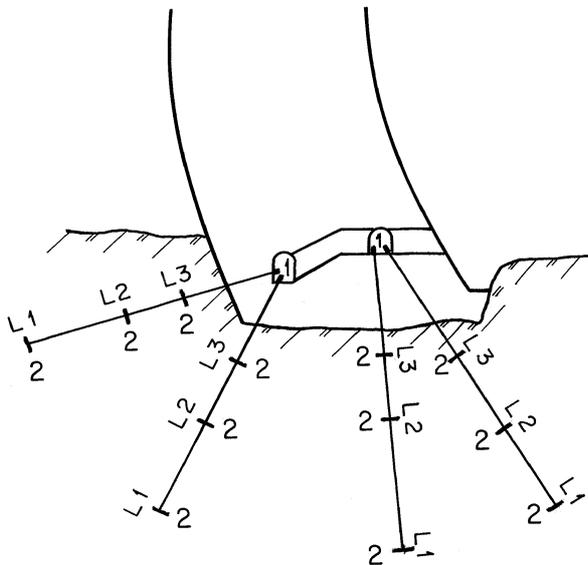


Figure 2.14-1: Disposition possible d'extensomètres dans la fondation d'un barrage en béton

1. Tête de mesure dans la galerie de contrôle
2. Point d'ancrage des tiges

2. Appréciation

Les équipements ne sont pas d'une très haute précision (approximativement $\pm 0,5$ mm). Mais à condition que les mouvements présumés représentent au moins quelques millimètres, les équipements donnent des informations fiables sur les déformations survenant dans une fondation rocheuse. Si au contraire les déformations sont trop petites, ces équipements ne peuvent pas fournir des données satisfaisantes.

Moyennant un arrangement judicieux des ancres d'un extensomètre à tiges (fils) multiples, on peut aussi localiser la position approximative de fissures ou de joints rocheux, qui s'ouvrent et se

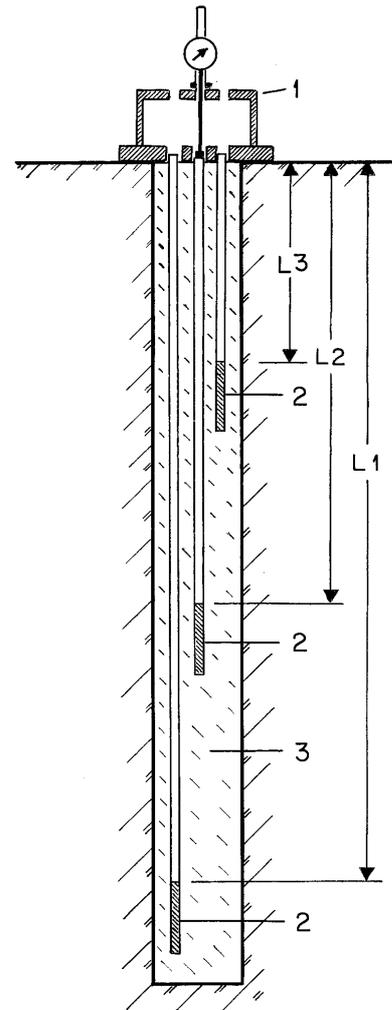


Figure 2.14-2: Disposition intérieure d'une tête de mesure équipée de 3 tiges

1. Tête de mesure
2. Point d'ancrage des tiges
3. Coulis d'injection

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Si l'ancrage ne tient pas, ce problème peut être résolu le plus souvent, car cette situation est déjà normalement reconnue lors des contrôles effectués en cours de montage de l'équipement ou suite aux premières mesures.

Les tiges ou les fils peuvent être bloqués lors des injections.

Les mesures sont influencées plus ou moins fortement par des frottements.

En cas d'une qualité insuffisante de l'acier, il y a apparition de rouille ce qui, à long terme, conduira à la perte de l'équipement.

En cas d'extensomètres à fil, il y a risque d'apparition de changements brusques dans la qualité de l'acier pour cause de vieillissement, ce qui fausse les mesures.

La plage de mesures est dépassée.



Figure 2.14-3: Appareil digital de mesure monté sur une tête de mesure avec déflexomètre et identification du point de mesure

4. Exigences techniques

D'une manière générale, n'utiliser que des équipements ayant fait leurs preuves.

Il est indispensable que le montage soit effectué par un spécialiste. Celui-ci doit aussi procéder aux premières mesures.

Le fonctionnement correct de l'équipement, ainsi que l'importance de l'influence des frottements entre tige/fil et la gaine de protection, doivent pouvoir être vérifiés après le montage, puis à intervalles de quelques années, à l'aide d'essais de traction judicieusement conçus. Pour cela, il y a lieu d'exiger aussi de la part du fournisseur, lors du choix de l'équipement, un appareil adéquat pour effectuer de tels essais. Un tel appareil devrait être exigé aussi pour le contrôle d'extensomètres qui furent installés il y a longtemps.

Où cela est possible, les têtes de mesure seront rendues accessibles aussi en cas de mesures effectuées à distance, de telle façon que des me-

sure mécaniques (manuelles) puissent être effectuées en même temps.

La plage de mesure devrait au besoin pouvoir être réajustée, sans que toute la série des mesures soit interrompue par un saut d'une valeur inconnue.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Le fonctionnement des extensomètres doit être contrôlé, à intervalles de quelques années, par un essai de traction adéquat (voir exigences techniques). Une mesure doit être impérativement effectuée avant et après un essai de traction.

En cas de surveillance à distance, les résultats obtenus devront être vérifiés périodiquement à l'aide d'une mesure mécanique (faite à la main).

6. Redondance

Une certaine redondance peut être obtenue par l'installation d'extensomètres à tiges/fils multiples, la comparaison des variations de longueur des différents segments entre elles pouvant montrer si les résultats obtenus sont plausibles ou non.

Combinaison avec mesures par pendules inversés ou avec mesures géodésiques.

La redondance peut aussi être obtenue par un arrangement spatial de plusieurs extensomètres dans une zone de fondation.

En outre, l'installation de plusieurs extensomètres sous un barrage augmente la fiabilité des mesures, les résultats obtenus pouvant être comparés entre eux d'une part, et avec des déformations du barrage d'autre part.



Figure 2.14-4: Tête de mesure avec 3 tiges

7. Remarques

Variation de longueur et déformée le long de lignes de forages

EXTENSOMETRE A TIGES POUR BARRAGE EN REMBLAI

1. Principe de mesure

Le dispositif comprend un élément de mesure et une tige (de 3 à 6 m de longueur) disposés entre 2 ancrages. L'ensemble est noyé dans le remblai. La plage de mesure peut atteindre 30 cm. L'extension de la déformation est transmise à l'élément de mesure depuis un long cône de mesure par un levier agissant sur une membrane. La valeur mesurée par le principe de la résistance ou de la corde vibrante est transmise électriquement par câble à la chambre de mesure. Souvent, on a recours à de nombreux éléments de mesure, en les disposant légèrement superposés les uns par rapport aux autres ou reliés entre eux de manière à former une chaîne (en règle générale, uniquement horizontalement).

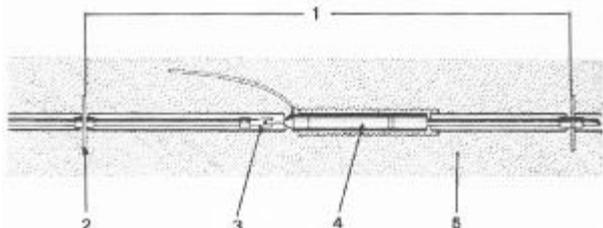


Figure 2.15.1: Exemple d'un extensomètre

1. Longueur de mesure
2. Ancrage
3. Joint flexible (articulation)
4. Eléments de mesure
5. Remblai

2. Appréciation

Dispositif de mesure, ayant fait ses preuves, utile pour la surveillance des déformations des zones critiques du barrage en remblai. En particulier, il sert au contrôle des déformations différentielles des remblais dans les cas de conditions difficiles de sous-sol ou de liaison.

Cet équipement se prête à l'automatisation et à la télétransmission.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Totalement hors service lorsque la plage de mesure a été dépassée. Comme il est extrêmement difficile de prévoir la déformation du remblai aux endroits critiques, c'est souvent la raison de la perte de l'instrument. En cas de doute, choisir une plage de mesure étendue en prenant de courtes distances de mesure.

Rupture du câble en raison d'une traction excessive.

Rupture du câble en raison de travaux menés sans précautions. Protection efficace nécessaire: par exemple, pose des câbles dans une tranchée faite dans le remblai terminé. Protection insuffisante contre la foudre. Panne de l'appareil de lecture.

4. Exigences techniques

En raison des déformations relativement importantes du corps du remblai, la plage de mesure doit être assez large, au moins 5 % de la longueur du tronçon de mesure (par exemple 15 cm pour 3 m). Les déformations attendues (allongement ou raccourcissement) doivent être prises en compte lors du réglage initial afin de pouvoir utiliser la plage complète de mesure.

Les câbles de mesure doivent être étanches et être hermétiquement fixés à l'élément de mesure. Les câbles de mesure doivent être protégés contre les surtensions (coup de foudre) et être continus (sans épissures) dans le remblai entre l'appareil et la chambre de mesure. Les câbles doivent avoir une grande résistance mécanique et être disposés en formant des méandres dans les tranchées.

Dans les remblais de grande hauteur, les câbles peuvent être avantageusement tirés verticalement jusqu'au couronnement afin d'éviter de traverser les points délicats constitués par les limites des zones de matériaux.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Entretien de l'appareil électrique de lecture, en particulier des contacts électriques.

6. Redondance

Fibre optique, mesures géodésiques au couronnement, mesures de distance par fil invar.

Une véritable redondance peut être atteinte par la pose en parallèle de plusieurs dispositifs de mesure analogues.

7. Remarques

Précaution particulière à prendre lors de la traversée d'éléments d'étanchéité (chemins de percolation préférentiels).

La mise en place de câbles de mesure dans des puits ou des galeries peut conduire à de grosses difficultés et à la mise hors service du système au cours du temps.

La définition de la mesure de base se fait après la pose complète de tous les éléments du système.

Variation de longueur et déformée le long de lignes de forages

EXTENSOMÈTRE À FIBRE OPTIQUE

1. Dispositif de mesure

Une fibre optique tendue entre deux points s'allonge ou se raccourcit suivant les déformations du barrage et de sa fondation. L'élongation de la fibre optique se traduit dans une variation des paramètres de transmission de la lumière, en particulier la phase, l'intensité ou le spectre.

Il existe plusieurs types d'extensomètres à fibre optique avec des caractéristiques très différentes: capteurs interférométriques à longue base de type SOFO, capteurs interférométriques à courte base de type Fabry-Perot, capteurs spectraux à réseaux de Bragg, capteurs à variation d'intensité par micro-courbures.

Pour la mesure, une émission infrarouge est envoyée dans deux fibres. L'une est la fibre de mesure liée mécaniquement à la structure en suivant les déformations. L'autre est la fibre de référence placée librement dans un tube parallèlement à la fibre de mesure. Un miroir est fixé à l'extrémité de chaque fibre. Les faisceaux de lumière sont envoyés vers un système d'analyse. Il est ensuite possible de connaître la différence de longueur entre les deux fibres.

Les mesures peuvent s'effectuer à grande distance (de l'ordre de 5 à 10 km à l'aide de câbles de rallonge optiques) sans besoin de conditionnement local du signal. La télétransmission de mesure est possible.



Figure 2.16-1: Installation de surface d'un capteur SOFO. La zone de mesure s'étend entre deux étréquerres (une seule est montrée dans la photo).

2. Appréciation

En général, ils présentent une bonne durabilité et stabilité, aucune protection contre la foudre n'est nécessaire comme les capteurs ne sont pas

conducteurs. Les capteurs de type interférométrique (principe de superposition de deux faisceaux lumineux) permettent des mesures très stables au long terme.



Figure 2.16-2: Installation dans le béton. Le capteur est attaché à une barre d'armature.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Les capteurs à fibre optique sont sensibles aux variations de température. Une fibre de référence non tendue est donc nécessaire pour obtenir des mesures significatives en cas de variations de température. Certains systèmes intègrent une fibre de référence dans le capteur même. Les systèmes de mesure basés sur la mesure d'intensité de la lumière sont plus sujets aux dérives de mesure à long terme.

En général les capteurs à fibres optiques ne permettent pas de mesurer des déformations de plus de 1-2% de leur longueur. Au-delà de cette limite, une rupture de la fibre optique peut survenir.

Les connecteurs optiques demandent un nettoyage régulier avant d'être re-connectés. Les câbles de connexion endommagés peuvent être réparés par une épissure.

4. Exigences techniques

Les extensomètres à fibres optiques adaptées à l'utilisation dans les barrages sont fournis dans une

forme qui permet une installation relativement simple. Leur intégration dans la structure peut se faire par trois modalités : installation avant le bétonnage, installation en surface ou installation dans un forage. Dans le cas de l'installation avant le bétonnage, les capteurs sont fixés sur des barres d'armature ou des tiges pour les placer à l'endroit



Figure 2.16-3: Installation dans un forage. Seuls les câbles de connexion ressortent du forage même et sont acheminés dans un boîtier de connexion.

désiré, la mise en place du béton doit se faire avec soin pour éviter de déplacer les capteurs ou de les endommager. Les points de sortie des câbles du béton sont souvent des points délicats et doivent être étudiés en détail. En cas de montage en surface, le capteur est fixé à la surface de l'ouvrage ou le long des galeries d'inspection à l'aide d'équerres visées dans le béton. Il est conseillé de protéger les capteurs en les plaçant dans des boîtes ou des caniveaux pour éviter des endommagements accidentels. Dans un forage, le système est placé dans un tube scellé par injection.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Les systèmes de mesures des capteurs à fibres optiques fournissent en général un signal en cas de panne d'un capteur. Seuls les connecteurs optiques demandent un nettoyage en cas de rebranchement (mesures manuelles ponctuelles).

6. Redondance

Même installation à différents endroits ou comparaison avec autres systèmes de mesure indépendants.

7. Remarques

(Photos : SMARTEC SA, Manno)

Variation de longueur et déformée le long de lignes de forages

MICROMETRE DE FORAGE (AVEC OU SANS INCLINOMETRE)

1. Principe de mesure

Le micromètre coulissant est un appareil de mesure mobile qui permet de déterminer, par troncçons successifs de 1 m par exemple, des variations différentielles de longueurs le long d'un forage.

Le micromètre coulissant équipé d'un inclinomètre est un appareil de mesure mobile qui permet de déterminer des déplacements selon 3 directions orthogonales le long d'un forage vertical par troncçons continus de 1 m.

Le forage est équipé d'un tube plastique rainuré muni de repères qui est solidarisé avec son milieu environnant (rocher, béton, sol) par injection.

Il peut être employé dans des forages d'une longueur de 150 m.

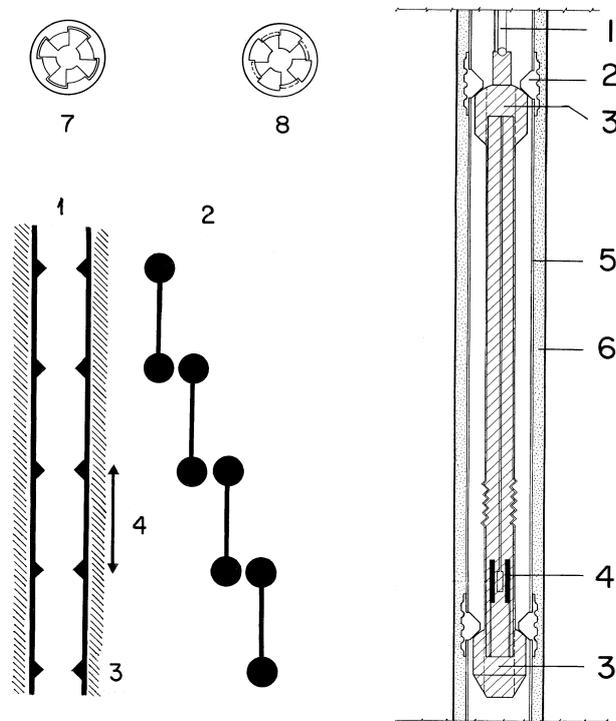


Figure 2.17-1: Micromètre de forage ISETH
(Ecole polytechnique fédérale de Zurich)

- 1 tige
- 2 sièges coniques de mesure
- 3 tête sphérique
- 4 capteur de mesure par induction
- 5 tube en HPVC
- 6 coulis d'injection
- 7 position de manœuvre
- 8 position de mesure (rotation de l'instrument de 45°)

2. Appréciation

Cet appareil rend possible la mesure avec grande précision (supérieure à 1/100 mm/m) de variations de longueurs dans le rocher et le béton. Principalement, les mesures permettent de localiser dans le corps du barrage ou dans les fondations d'éventuelles fissures et diaclases ainsi que de mesurer leur mouvement (par exemple en fonction du niveau de la retenue). Sous certaines conditions, il est possible de définir au moyen de 2 lignes de mesure parallèles (2 forages) l'allure de la déformée. La sensibilité et la précision des mesures dans une direction horizontale (inclinomètre) sont inférieures à celles obtenues par la mesure dans une direction verticale (micromètre).

Les mesures peuvent être effectuées par une personne. L'enregistrement des valeurs et leur dépouillement se fait de façon opportune au moyen d'un ordinateur et d'un programme d'application spécial.

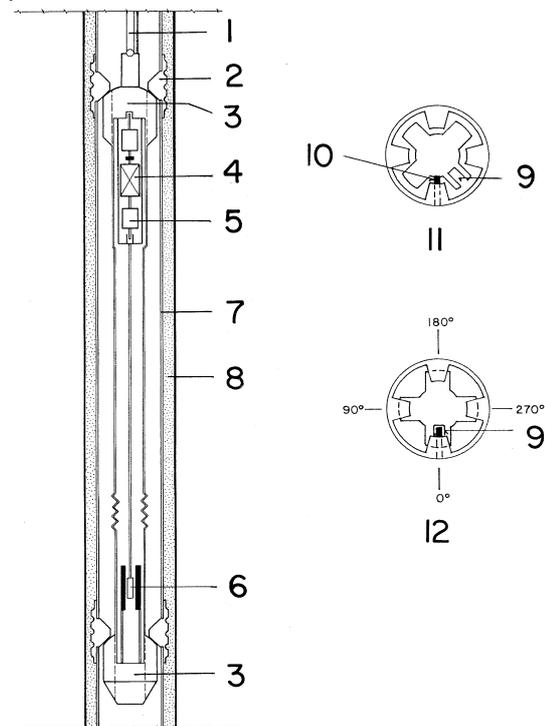


Figure 2.17-2 : Trivec micromètre de forage combiné avec un inclinomètre

- 1 tige
- 2 sièges coniques de mesure
- 3 tête sphérique
- 4 clinomètre
- 5 moteur de positionnement
- 6 capteur de mesure par induction

- 7 tube en HPVC
- 8 coulis d'injection
- 9 rainures
- 10 boulons
- 11 position de manœuvre
- 12 position de mesure (rotation de l'instrument de 45°)

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Des saletés sur la sonde et dans le tubage peuvent influencer la précision des mesures. La sonde et le câble doivent être maintenus propres. Aucune saleté ne doit pénétrer dans le tubage; en cas de fort encrassement, son nettoyage est nécessaire.

Fixation insuffisante des repères.

Enrobage du tubage dans le forage trop rigide ou trop souple ("effet de pieu").

Blocage de la sonde en cas de mouvement important perpendiculairement à l'axe du forage.



Figure 2.17-3 Exécution d'une mesure avec micromètre de forage muni d'une sonde à induction sans contact

4. Exigences techniques

Exécution robuste et résistant à l'usure de tous les éléments de l'appareillage.

Sonde et câble doivent être étanches (pour pression d'eau de 1,5 MPa au minimum).

Le câble doit être armé, afin de pouvoir reprendre l'effort de traction.

Sonde et tubage doivent résister à la corrosion.

La mise en place ainsi que l'injection entre le tubage et la paroi du forage doit être exécutée très soigneusement par un personnel qualifié.

La lecture et l'analyse des résultats de mesures par le personnel du propriétaire sont possibles après formation adéquate.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

La grande précision exige une mesure d'étalonnage avant et après chaque série de mesures. Le dispositif d'étalonnage doit faire partie de l'équipement de mesure (la mesure d'étalonnage indiquera tout de suite l'état de l'équipement de mesure et sa fiabilité).

Il est recommandé, mais pas indispensable, de procéder à une révision périodique de l'appareil.

6. Redondance

La redondance peut être atteinte par la mise en place de 2 ou plusieurs lignes de mesure (forages) dans la zone observée.

7. Remarques

Pour observer un point particulier (fissure, joint), un micromètre de conception particulière peut être installé de manière fixe dans cette zone. L'automatisation et la télétransmission sont dans ce cas possibles.

Variation de longueur et déformée le long de lignes de forages

INCLINOMETRE

1. Principe de mesure

Appareil de mesure mobile pour connaître essentiellement le long d'une ligne les déformations horizontales d'un barrage en remblai ou d'une fondation. L'installation comprend un tube rainuré en PVC ou en aluminium posé verticalement en continu jusqu'au couronnement pendant la mise en place des remblais. Les éléments isolés de tube ne devraient pas avoir une longueur de plus de 6 m (mieux 3 m). L'emploi de tube télescopique peut être envisagé si l'on s'attend à d'importants tassements du remblai. La mise en place d'un tube peut également se faire dans un forage. Pendant et à la fin des travaux, une sonde (munie d'un pendule relié à un potentiomètre) est introduite dans le tube et l'inclinaison est toujours lue au droit des même points situés le long du profil de mesure. La sonde mesure un angle dans 2 plans verticaux perpendiculaires. Les différences d'inclinaison entre 2 mesures permettent de calculer les déformations horizontales. Il est opportun de rattacher la tête du tube à un réseau de mesure géodésique. Ceci est d'autant plus nécessaire, si le pied du tube ne peut pas être

2. Appréciation

Appareil de mesure précis et flexible pour le contrôle des déformations d'un remblai et de sa fondation. Par la mise en place systématique d'une telle instrumentation dans différents profils, tout un réseau de lignes de déformation du remblai peut être établi. La combinaison dans un même tube d'un inclinomètre avec un repère de tassement permet une surveillance intégrale des déformations spatiales. Il faut prévoir un tube plastique si l'inclinomètre est utilisé comme repère de tassement.

La pose de tubes inclinés pendant la mise en place des remblais n'est pas recommandée. Elle peut par contre se faire par la suite dans un forage.

La précision et la sensibilité sont plus faibles que celles du micromètre coulissant avec inclinomètre utilisé dans le béton et le rocher. Par ailleurs, la précision de mesure dépend de la qualité du système de guidage.

L'automatisation et la télétransmission sont possibles. Les données peuvent être directement transférées de l'instrument de mesure dans un ordinateur pour être traitées.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Endommagement et perte du tube au cours des travaux. Mesures de protection efficaces sont indispensables.

Une torsion du tube autour de son axe pendant la mise en place (par exemple, en raison du rayonnement solaire) peut entraîner des mesures imprécises. Les rainures doivent être orientées selon la direction des déformations attendues.

Immobilisation de la sonde en cas de rainures encrassées ou en cas de coude au point de liaison de deux tubes consécutifs. Dépassement du domaine de mesure en raison de fortes déformations horizontales, principalement pour des remblais de grande hauteur constitués de matériaux plastiques.

Mesure influencée par un champ magnétique ou gravimétrique régnant à l'emplacement ou dans le corps du barrage.

4. Exigences techniques

Exécution robuste, résistante à l'usure et étanche de tous les éléments de l'appareil.

Construction soignée du mécanisme de roulement avec une bonne suspension des roues.

Longueur suffisante de la sonde: environ 50 cm de distance entre les roues supérieures et inférieures.

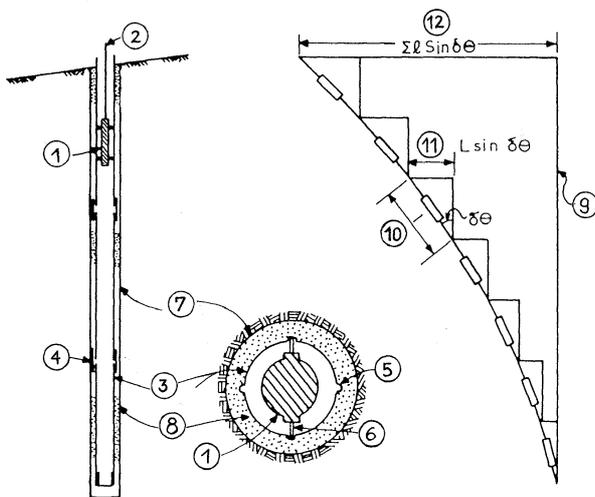


Figure 2.18-1: Principe de mesure de l'inclinomètre placé dans un forage

- 1 sonde
- 2 câble
- 3 tube rainuré
- 4 manchon
- 5 rainure
- 6 roues de la sonde
- 7 forage
- 8 remplissage étanche
- 9 mesure de référence
- 10 tronçon de mesure
- 11 déplacement horizontal du tronçon mesuré
- 12 déplacement horizontal total

Plus la base de mesure est grande, plus la précision des mesures augmente, mais le risque d'immobilisation de la sonde dans le tube s'accroît.
Câble de la sonde armé afin d'éviter un déchirement ou une rupture du câble; emploi d'un système de guidage à l'entrée du tube.
Recouvrement des joints des tubes avec une bande collante; les joints doivent être munis de manchons.
Définir soigneusement l'orientation du plan de mesure.
Mesures aller-retour dans les deux positions et dans chaque plan de mesure.
Avoir à disposition un appareillage complet de réserve, y compris câble et appareil de lecture.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Une mesure de comparaison avant et après chaque emploi est recommandée.
Révision périodique de la sonde et de l'appareil de mesure auprès du fournisseur.

6. Redondance

Mesures géodésiques de la surface du remblai, combinées avec des extensomètres.
Une redondance effective peut se faire en prévoyant plusieurs lignes de mesure.

7. Remarques



Variation de rotations locales

CLINOMETRE, TILTMETRE

1. Principe de mesure

Les clinomètres et les tiltmètres sont des appareils de mesure d'inclinaison qui se subdivisent en 2 groupes:

- Systèmes avec liquide
 - Niveau hydrostatique L'inclinaison est mesurée selon le principe du niveau d'eau.
 - Niveau hydrostatique électronique La bulle d'air se déplace en fonction de la variation de l'inclinaison ce qui entraîne une diminution de la résistance entre l'électrode centrale et une des électrodes latérales.
 - Surface de liquide avec mesure optique de l'inclinaison L'horizon artificiel d'un liquide sert de plan de référence. Selon la pente, l'angle entre le capteur de lumière et l'horizon absolu varie. Cet angle est mesuré électro-optiquement (mesure selon 2 axes possibles).
- Système avec masse pendulaire
 - La lecture de la position de la masse pendulaire s'effectue au moyen d'un voltmètre (mesure selon 2 axes possibles).

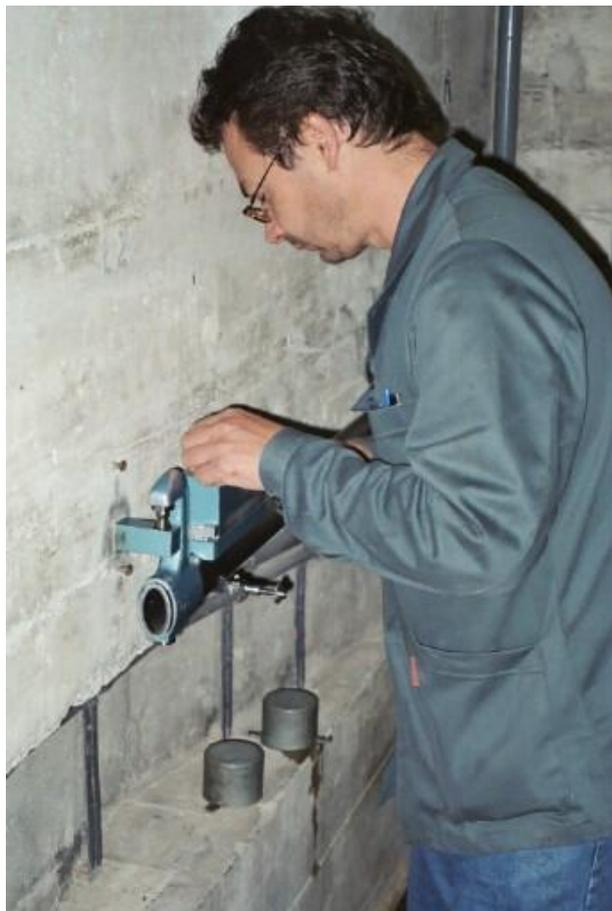


Figure 2.19-1: Mesure d'inclinomètre avec lecture digitale

Afin d'améliorer la précision, les mesures sont effectuées dans les 2 positions de l'appareil portable.

La longueur de base de ces instruments varie entre 10 et 120 cm environ.



Figure 2.19-2: Ajustement mécanique d'un inclinomètre en vue de l'exécution d'une mesure

2. Appréciation

En effectuant les mesures soigneusement, ces instruments fournissent des résultats précis et fiables. On ne doit cependant pas oublier que des variations d'inclinaison à proximité de galeries et de niches de mesure sont influencées par le flux local des forces. Là où les conditions locales le permettent, la fiabilité des résultats peut être améliorée en installant une chaîne de mesures constituée par 4 à 6 points-repères. Le clinomètre ou le tiltmètre ne devrait normalement pas être utilisé comme mesure unique pour la surveillance d'un barrage.

L'équipement se prête à l'automatisation et à la télétransmission. C'est la règle pour les instruments de mesure électriques.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Le dispositif de mesure est très sensible à des sources de chaleur (chaleur du corps humain, rayonnement solaire, etc.).

L'indication de l'instrument peut être faussée suite à l'effet d'un coup.

Un point-repère peut être déplacé sous l'effet d'un coup.

Des points-repères sales peuvent conduire à des écarts de mesures.

En cas d'utilisation d'instruments électriques, des résultats erronés peuvent apparaître sous l'effet de

courants vagabonds, de dérive du point zéro, de défaut de linéarité de même de sensibilité. Des pertes d'instruments suite à des surtensions (foudre) ne sont pas rares.

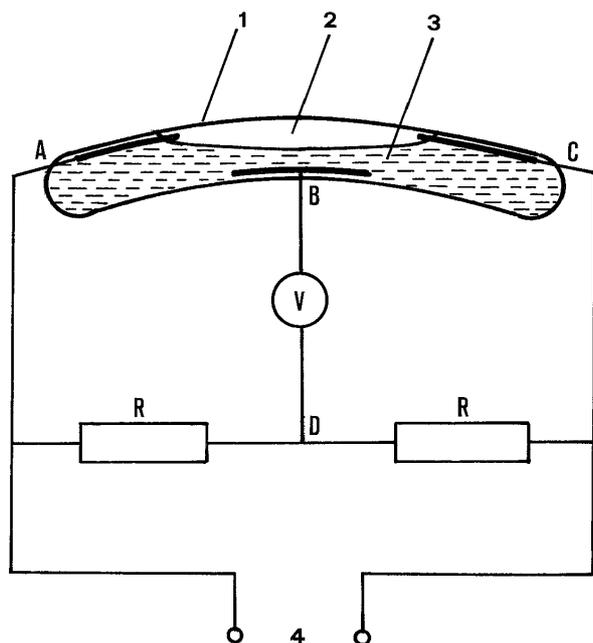


Figure 2.19-3: Principe du niveau à bulle électrolytique

- 1 Niveau d'eau
- 2 Bulle d'air
- 3 Liquide électrolytique
- 4 Alimentation électrique
- A Electrodes A, B, C
- R Résistance
- V Voltmètre

Une modification de l'inclinaison entraîne la bulle d'air et modifie la résistance entre A, B, C, ce qui peut être mesuré selon le principe du pont de Wheatstone

4. Exigences techniques

Les points-repères doivent être nettoyés et graissés régulièrement et être protégés constamment par un couvercle de protection.

Avec les instruments portables, on doit toujours mesurer dans les deux positions de l'instrument.

En cas d'utilisation d'instruments électriques, il faut vouer une attention particulière à la protection contre la surtension.

Il ne faut utiliser que des appareils éprouvés et utilisables in situ (résistant à l'humidité).

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Instruments portables:

Comme contrôle grossier, vérifier si la somme des lectures effectuées dans les deux positions de l'instrument reste constante, pendant des périodes prolongées.

Si cela est possible, prévoir une station de mesure de contrôle, laquelle ne subit pas de rotation ou uniquement des rotations minimales. Toutefois, cette condition ne peut souvent être remplie que d'une manière insuffisante.

Faire vérifier et réviser de temps en temps l'instrument par le fabricant. Il y a toutefois lieu de remarquer que la somme des lectures effectuées dans les deux positions de l'instrument change souvent après une telle révision ce qui conduit à un saut dans les résultats de mesure.

Pour les instruments fixes, effectuer un contrôle grossier périodique de l'inclinaison de la plaque de base de l'instrument à l'aide d'un clinomètre portable.

Pour les instruments électriques, procéder à un contrôle périodique de la sensibilité, de la linéarité et de la dérive du point zéro.

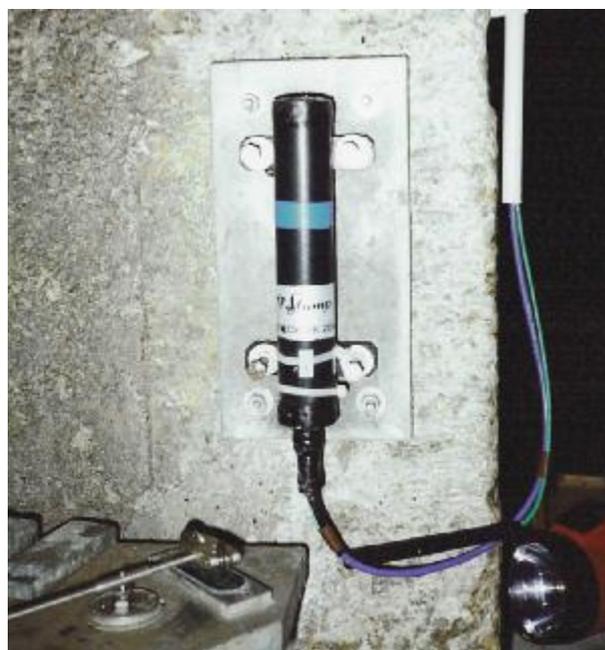


Figure 2.19-4: Tiltmètre électrique pour la mesure de l'inclinaison dans deux directions

6. Redondance

La redondance est en règle générale indispensable. Elle est obtenue normalement par comparaison des résultats de mesure avec les tangentes aux déformées le long des sections verticales du barrage (pendules).

Dans des cas particuliers la redondance peut aussi être obtenue par nivellement de deux points judicieusement choisis.

7. Remarques

Mouvement de fissures et de joints

MICROMETRE, DEFORMETRE, DILATOMETRE, DEFLECTOMETRE

1. Principe de mesure

Tous les instruments cités sont basés sur le même principe et permettent de mesurer de façon mécanique avec précision la longueur entre deux points-repères scellés dans une surface en béton, perpendiculairement et parallèlement à une fissure ou à un joint. Suivant la marque et le type d'instrument, la longueur de base représente quelques centimètres jusqu'à environ 120 cm.

En principe les 3 dispositions de mesure suivantes sont possibles:

Type 1 : Mouvements perpendiculairement à un joint ou à une fissure.

Type 2 : Mouvements perpendiculairement et parallèlement à un joint (fissure).

La mesure consiste à mesurer les 3 côtés d'un triangle équilatéral dont un côté est parallèle au joint (voir figure).

Type 3 : Mouvements dans 3 directions orthogonales (le moins utilisé aujourd'hui).

A l'aide d'un dispositif spécial on peut mesurer les mouvements parallèles à une paroi en béton (perpendiculairement et parallèlement à un joint) et normalement à cette face.

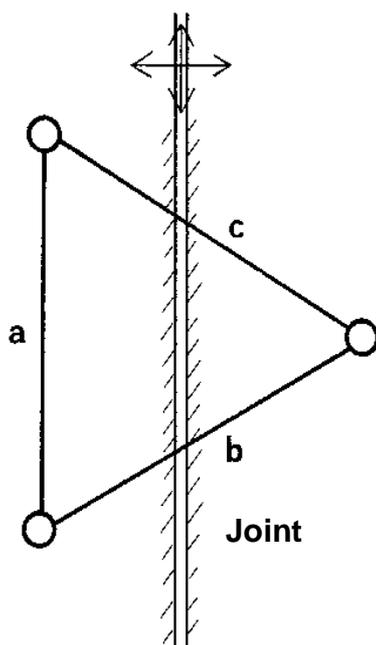


Figure 2.20-1: Disposition des points de mesure

2. Appréciation

Mesure précise, laquelle, dans des cas particuliers, est très importante et intéressante. Les résultats doivent être interprétés avec prudence. Les

résultats sont influencés par le flux local des forces à proximité d'une galerie et que les résultats ne sont pas absolument représentatifs pour le comportement global d'une partie de l'ouvrage. La mensuration de chaînes de mesure longues, par exemple dans des galeries en rocher ou dans un barrage, demande un travail important, comparé à la valeur des résultats obtenus.

L'automatisation et la télétransmission sont possibles en employant des appareils spéciaux.



Figure 2.20-2: Appareil de la mesure d'un dans 3 directions qui chacune peut être mesurée des 2 côtés du joint (mesure digitale)

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Un point-repère peut être déplacé sous l'effet d'un coup. L'ancrage d'un repère se descelle à cause d'une qualité déficiente du béton (par exemple, nids de gravier) ou à cause d'une distance insuffisante entre points-repères et joint/fissure (arête de béton qui saute).



Figure 2.20-3: Mesure analogique du mouvement d'un joint dans 3 directions

Indication erronée de l'instrument suite à une manipulation peu soignée.

Une pose imprécise de l'instrument sur les points-repères conduit à des écarts dans les mesures.

Une manipulation pas absolument régulière au dispositif de réglage et de mesure conduit à des résultats irréguliers.

La plage de mesure est dépassée.

4. Exigences techniques

Il est indispensable que les points-repères, ou les ancrages de dispositifs de mesure spéciaux, soient placés à une distance suffisante du joint (fissure) et qu'ils soient ancrés solidement.

Pour la protection des points-repères ceux-ci devraient être placés dans une niche (à tout le moins, en retrait par rapport à la surface de la paroi) et être protégés par un couvercle.

Les points-repères doivent être nettoyés et graissés périodiquement.

Chaque instrument de mesure doit être complété par un équipement de contrôle (par exemple une base de contrôle en invar).

En cas de doute relatif à l'ordre de grandeur des mouvements présumés, il y a lieu d'utiliser, si possible, des repères spéciaux qui permettent d'étendre la plage de mesures normale de quelques millimètres, en cas de besoin.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Vérifier le fonctionnement correct de l'instrument de mesure à l'aide de l'équipement de contrôle lors de chaque mesure.

Faire réviser de temps en temps l'instrument de mesure par le fabricant. Toutefois, une telle révision conduit souvent à un saut dans les résultats de mesure.

6. Redondance

N'est en général pas nécessaire. Souvent en plus d'un comparateur digital, un instrument mécanique est employé.

7. Remarques

En règle générale donner la préférence à des instruments d'une précision moins bonne et présentant une plage de mesure plus grande plutôt qu'à des instruments très précis généralement avec une petite plage de mesure. Une précision de l'ordre du 1/10 mm est généralement suffisante.

Dans certains cas, une telle mesure peut aussi être remplacée par des témoins judicieusement placés.

Des mouvements de fissures et de joints peuvent au besoin aussi être surveillés à l'aide de dilatomètres électriques (voir feuille explicative 2.20).

La largeur des fissures peut être aussi contrôlée au moyen d'une loupe ou d'un chablon avec graduations.

Déformation ponctuelle

DEFOMETRE ELECTRIQUE NOYE DANS LE BETON

1. Principe de mesure

Ces instruments, généralement noyés dans le béton lors de la construction, permettent de mesurer localement à la fois l'allongement spécifique dans une direction donnée et les variations de température subies par le béton. Chaque capteur de mesure de 20 à 30 cm de long est relié par un câble électrique à une boîte de connexion sur laquelle se branche l'appareil de mesure. Les capteurs sont basés soit sur le principe de la résistance ohmique soit sur le principe de la fréquence propre d'une corde vibrante, toutes deux variant en fonction des allongements spécifiques subis par le béton.

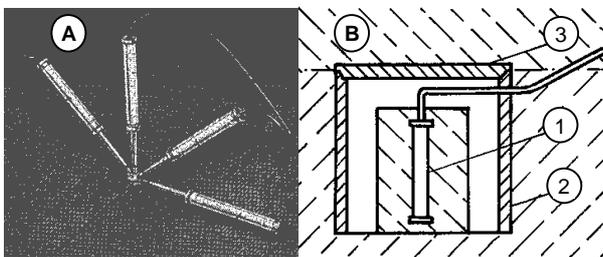


Figure 2.21-1: Mise en place d'un télédéformètre

- A Rosette avec 4 télédéformètres
- B Mode de mise en place d'un télédéformètre de référence
- 1 Télédéformètre dans un cylindre en béton
- 2 Tuyau en ciment
- 3 Couvercle en béton

2. Appréciation

Les calculs des déformations spécifiques et des contraintes correspondantes dans le béton sont longs, compliqués et délicats. Ils exigent une compensation thermique des valeurs mesurées ainsi que la connaissance de l'évolution au cours du temps du module d'élasticité et de fluage du béton. Le principal défaut de ces mesures réside dans le fait que les compensations à appliquer aux résultats bruts sont souvent nettement plus grandes que l'ordre de grandeur du résultat final, de sorte que les résultats obtenus sont assez aléatoires. De plus, les sources d'erreur faussant les mesures sont nombreuses et difficiles à détecter.

Dans le but de pouvoir compenser les déformations spécifiques, indépendantes des sollicitations mécaniques, tels que le retrait et le gonflement du béton et d'observer les dérives électriques éventuelles des résistances ohmiques, on place des capteurs, également noyés dans la masse, mais isolés des contraintes mécaniques. Ces éléments, dits "témoin ou zéro sans contrainte (No stress)"

permettent d'observer la régularité des résultats à long terme.

La fiabilité, à long terme surtout, n'est pas satisfaisante, à tel point que ces mesures ne permettent en aucun cas de surveiller efficacement un barrage. Elles peuvent tout au plus fournir quelques indications supplémentaires intéressantes lors des premières années de service de l'ouvrage. Le dépistage des sources d'erreurs exige des connaissances de spécialistes en mesures électriques. Ces instruments sont donc mieux appropriés aux essais en laboratoire qu'à la surveillance des barrages.

L'équipement se prête à l'automatisation et à la télétransmission.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Ces appareils sont sensibles aux coups de foudre, surtensions et autres courants vagabonds.

Les défauts de contact électrique sont prépondérants.

Lors du bétonnage, le risque d'endommagement et d'intervention des câbles est élevé.

La plage de mesure étant faible et les conditions de mise en place très difficiles, les limites du domaine de mesure sont parfois prématurément dépassées et souvent sans en avoir pris conscience.

Le point "zéro" des appareils électriques dérive dans le temps et des sauts de mesure inexplicables sont fréquents.

Le branchement erroné des fils sur le pont de mesure est très facile.

4. Exigences techniques

La mise en place des appareils doit être extrêmement soignée. L'orientation correcte des capteurs et leur mise en place dans le béton sont essentielles pour obtenir des résultats valables. La granulométrie du béton d'enrobage doit être adaptée.

Les câbles (fils conducteurs et leur gaine) ainsi que le câblage doivent être de première qualité. Les épissures entre capteurs et boîte de connexion doivent être évitées à tout prix. Les câbles doivent en outre résister aux chocs et tractions survenant inévitablement sur un chantier de barrage.

Le tracé des câbles doit être étudié pour limiter les infiltrations d'eau le long du câble et faciliter la mise en œuvre du béton.

Les boîtes de connexion doivent être protégées des poussières, humidité, oxydations et surtensions. Leur entretien régulier est indispensable.

Les capteurs doivent être placés en surnombre afin d'assurer la redondance et la continuité des mesures en cas de défaillance d'un capteur.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

L'appareil de mesure (pont de Wheatstone) ainsi que son ou ses fils de raccordement aux boîtes de connexion doivent faire l'objet d'un contrôle annuel ou bisannuel par un spécialiste, sur toute la plage de mesure.

La vérification de la concordance des mesures entre capteurs placés en parallèle et la régularité des capteurs témoins doit être faite après chaque mesure.

6. Redondance

Elle est essentiellement obtenue par la comparaison des résultats de mesure entre eux et grâce aux appareils placés en surnombre.

La mise en parallèle en un lieu accessible entre un capteur électrique et un comparateur mécanique est souhaitable (en général possible uniquement dans des cas exceptionnels).

7. Remarques

Construits sur la base des mêmes principes, il existe sur le marché des dilatomètres à noyer dans le béton en travers des joints de contraction par exemple. Ils mesurent les variations du joint en millimètres ainsi que la température du béton. Les calculs sont plus aisés, mais les sources d'erreur sont similaires et la fiabilité tout aussi insatisfaisante que celle des déformètres électriques.

Débit des eaux d'infiltration et de drainage

MESURE VOLUMETRIQUE AVEC RECIPIENT TARE ET CHRONOMETRE

1. Principe de mesure

L'eau qui coule dans une rigole ou qui sort d'un forage, d'un joint ou d'une fissure, est collectée dans un récipient taré et le temps de remplissage nécessaire est mesuré. Il existe aussi des récipients gradués, dans lesquels l'eau est récoltée durant un temps donné. Sur la base du volume, l'échelle donne directement le débit.

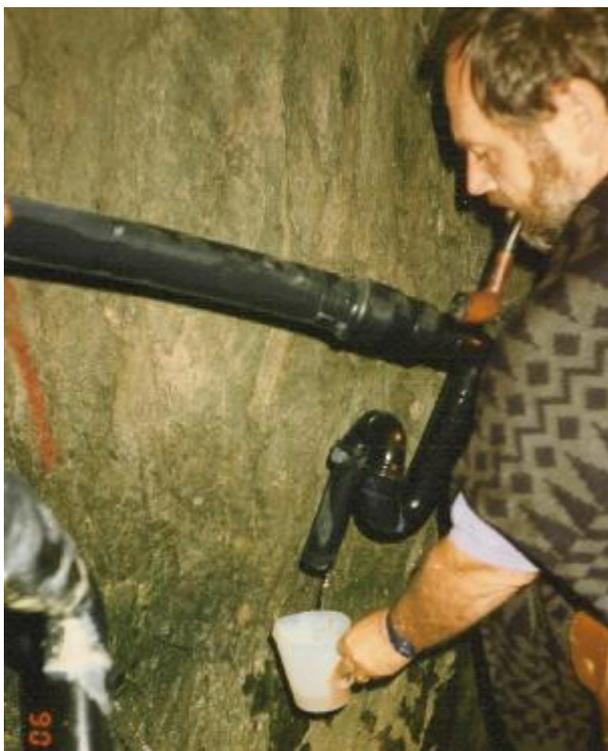


Figure 3.01-1 Exécution d'une mesure volumétrique chronométrée avec un récipient

2. Appréciation

Mesure simple et fiable, qui a fait ses preuves. L'automatisation et la télétransmission ne sont pas appropriées (voir canal de mesure).

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Chronomètre défectueux ou pas disponible.
Récipient trop petit pour effectuer une mesure correcte du temps de remplissage.
Collecte de l'eau imparfaite et incomplète.
Disposition inadéquate pour l'introduction de l'eau dans le récipient de mesure.

4. Exigences techniques

Les stations de mesure doivent être adaptées aux conditions locales, de manière à amener l'eau dans le récipient de mesure sans aucune perte. La dimension du récipient de mesure doit être adaptée au débit, de sorte que le temps de remplissage soit au moins de 10 secondes, voire si possible plus de 20 secondes.

En présence de débits importants, il y a lieu d'installer un réservoir fixe muni d'une adduction et d'une dérivation d'eau adéquates et lequel peut être vidangé.

Les différentes zones (ou secteurs) de barrage ou de galeries d'où provient l'eau, doivent être délimitées clairement les unes des autres.

Si possible, évacuer et mesurer séparément les eaux d'infiltration et les eaux de drainage.

Écarter si possible les eaux météoriques des eaux d'infiltration et de drainage.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Nettoyer le récipient et la station de mesure ainsi que les rigoles.

Contrôler périodiquement si toute l'eau est collectée par la mesure.



Figure 3.01-2 Mesure volumétrique d'un débit important au moyen d'un tuyau pivotable

6. Redondance

La redondance n'est pas exigée. Une possibilité de contrôle existe toutefois par comparaison de la somme de débits sectoriels avec le débit global du barrage. De cette façon, des eaux de percolation éventuelles et des infiltrations non captées peuvent être décelées.

7. Remarques

Pour l'interprétation des résultats de mesure il y a lieu de tenir compte des conditions météorolog-

ques (précipitations et fonte des neiges), lesquelles peuvent considérablement influencer les débits.

Lors de faibles débits sortant de forages dirigés vers le bas, la méthode de refoulement de volume peut être appliquée. Pour cela, il faut clairement définir le volume d'eau retiré ou refoulé et ensuite mesurer le temps de remplissage nécessaire.

Débit des eaux d'infiltration et de drainage

DEVERSOIR, CANAL DE MESURE

1. Principe de mesure

Le débit est mesuré dans un canal, soit à l'aide d'un déversoir calibré de forme triangulaire ou trapézoïdale, soit à l'aide d'un venturi calibré. Dans les deux cas, on relève le niveau d'eau à l'amont de la zone d'influence directe du déversoir ou du Venturi. La mesure peut se faire à l'aide d'une échelle limnimétrique, d'une aiguille de mesure, d'une sonde à ultrasons, d'une sonde pneumatique ou de pression.



Figure 3.02-01: Déversoir avec aiguille de mesure

2. Appréciation

Mesure simple et précise pour débits de plus de 0,05 l/s. Pas indiquée pour des débits plus faibles, car elle n'est pas suffisamment précise.

Automatisation et transmission à distance sont possibles et sont d'un intérêt réel pour une surveillance permanente. Elles peuvent être éventuellement combinées avec un signal en cas de dépassement d'une valeur limite.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Si le système collecteur de l'eau présente des inétanchéités, une partie de l'eau peut éventuellement contourner la station de mesure.

En cas de dépôts de carbonates, dans le canal et sur l'arête du déversoir, la mesure est faussée.

En cas de mesure du niveau d'eau à l'aide d'une balance à pression, la conduite de mesure peut se boucher.

La sonde à ultrasons est un appareil sensible aux surtensions.

En présence d'un remous d'eau juste à l'aval de la station de mesure, les résultats de mesure sont erronés.

4. Exigences techniques

Les dimensions du déversoir et du canal doivent être adaptées au débit et doivent présenter une réserve suffisante.

Un remous d'eau juste à l'aval du profil de mesure doit être évité à tout prix.

Canal et déversoir doivent être nettoyés périodiquement (souvent mensuellement ou hebdomadairement).



Figure 3.02-2: Déversoir avec sonde à ultrasons

En cas d'une surveillance à distance, la mesure doit absolument pouvoir être vérifiée sur place à l'aide d'une mesure volumétrique du débit ou d'une mesure du niveau d'eau à l'aide d'une échelle limnimétrique ou d'une aiguille de mesure. Les buses des balances à pression doivent être accessibles et si possible démontables, pour qu'elles puissent être nettoyées facilement.

Les sondes à ultrasons doivent pouvoir rester en fonction en milieu humide et doivent être protégées contre les surtensions.

Les différentes zones (ou secteurs) de barrage ou de galeries d'où provient l'eau, doivent être délimitées clairement les unes des autres.

Si possible, évacuer et mesurer séparément les eaux d'infiltration et les eaux de drainage.

Écarter si possible les eaux météoriques des eaux d'infiltration et de drainage.



Figure 3.02-3: Canal de mesure avec Venturi. Mesure avec entraînement de bulles d'air

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Contrôler le débit périodiquement à l'aide d'une mesure volumétrique.

Contrôler le niveau d'eau périodiquement à l'aide d'une échelle limnimétrique ou d'une aiguille de mesure.

Contrôler périodiquement les buses et conduites d'une balance à pression relativement à leur propre état.

Contrôler périodiquement s'il n'y a pas d'eau qui puisse contourner la station de mesure.

Nettoyer souvent le canal.



Figure 3.02-4: Station de mesure automatique pour débits importants

6. Redondance

La redondance n'est pas exigée. Une possibilité de contrôle existe toutefois par comparaison de la somme de débits sectoriels avec le débit global du barrage. De cette façon, des eaux de percolation éventuelles et des infiltrations non captées peuvent être décelées.

7. Remarques

Pour l'interprétation des résultats de mesure, outre le niveau du plan d'eau, il y a lieu de tenir compte des conditions météorologiques (précipitations et fonte des neiges), lesquelles peuvent considérablement influencer les débits.

Débit des eaux d'infiltration et de drainage

MESURE DU FLUX DANS LES TUBES

1. Principe de mesure

Il existe les systèmes suivants:

- Dispositifs Venturi
- Système électromagnétique ou à ultrasons, sans éléments actifs en contact avec l'eau

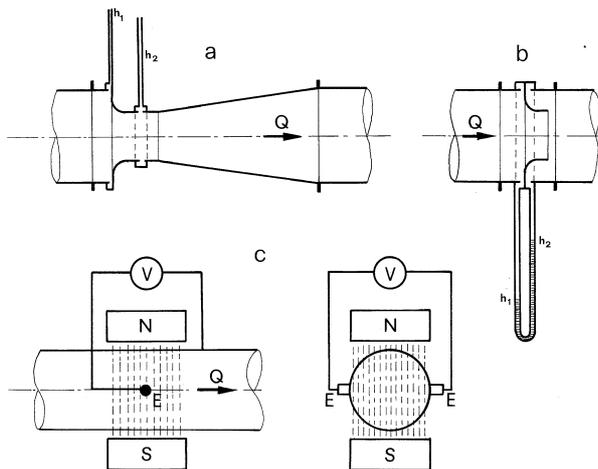


Figure 3.03-1: Principe de mesure

- Venturi
 - Mesure du flux par des buses
 - Mesure électromagnétique de l'écoulement
- N, S Pôles des champs magnétiques
E Electrode
V Voltmètre. La tension se modifie proportionnellement à la vitesse de l'écoulement

2. Appréciation

Systèmes statiques ne demandant que peu d'entretien, une fois qu'ils ont été calibrés. L'automatisation et la télétransmission sont possibles et sont habituelles pour ce système.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Les sédiments et dépôts calcaires peuvent perturber le fonctionnement et fausser les résultats de mesure. Pour éviter le dépôt de sédiments, une pente du tube de mesure doit être au moins de 1 %.

Les systèmes électromagnétiques et à ultrasons sont sensibles aux surtensions.

4. Exigences techniques

Le matériel doit pouvoir aussi fonctionner dans une ambiance humide. Les parties métalliques devront être en acier inoxydable.

Suivant le cas, prévoir une protection contre le gel.

Les systèmes électromagnétiques et à ultrasons doivent être protégés contre les surtensions. Par très faibles débits, les systèmes électromagnétiques peuvent présenter des imprécisions. Ceci peut survenir lorsque les débits ont tendance sporadiquement à se tarir.

Le diamètre du capteur des systèmes à ultrasons doit être choisi de telle façon que la vitesse dans la zone de mesure soit de l'ordre de 2 - 3 m/s. Le système n'est donc pas approprié pour la mesure de débit avec de fortes fluctuations.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Contrôler périodiquement l'étalonnage des appareils, par exemple, à l'aide d'un dispositif volumétrique qui doit être prévu déjà lors de l'établissement du projet.

Les systèmes électromagnétiques ou à ultrasons ne requièrent dans une large mesure aucun entretien.

6. Redondance

Contrôle du débit à l'aide d'un autre équipement de mesure de débit.

Comparaison du débit global du barrage avec les débits mesurés par secteurs.

7. Remarques

Pour l'interprétation des résultats de mesure, outre le niveau du plan d'eau, il y a lieu de tenir compte des conditions météorologiques (précipitations et fonte des neiges), lesquelles peuvent considérablement influencer les débits.



Figure 3.03-2: Appareil de mesure du flux. Le tube de sortie est recourbé vers le haut afin qu'il soit toujours rempli d'eau et qu'un écoulement permanent soit assuré.



Débit des eaux d'infiltration et de drainage

MESURE DU FLUX DANS DES TUBES PARTIELLEMENT REMPLIS

1. Dispositif de mesure

On dispose de systèmes électromagnétiques ou d'installations ultrasons qui permettent tout à la fois de mesurer la hauteur de remplissage et la vitesse d'écoulement. La hauteur de remplissage est détectée par ultrasons, tandis que la vitesse est mesurée par la différence du temps de parcours.

2. Appréciation

Une fois calibrés, ces systèmes fixes nécessitent peu d'entretien. Automatisation et télétransmission sont possibles, et, en général, habituelles pour ce type de mesures. Souvent les données sont enregistrées et l'on dispose d'un signal en cas de dépassement d'une valeur limite.

3. Dérangements possibles et erreurs de mesure

De la vase et des dépôts calcaires peuvent affecter le fonctionnement normal et fausser les résultats des mesures. Afin d'éviter les dépôts de vase il est recommandé de respecter une pente de 1% au moins du tube de mesure. Les systèmes électromagnétiques ou les installations ultrasons sont sensibles aux surtensions

4. Exigences techniques

Les appareils doivent pouvoir fonctionner dans un environnement humide. Les parties métalliques seront obligatoirement en acier inoxydable. De cas en cas, on prévoira une protection contre la formation de glace.

Les systèmes électromagnétiques et les installations ultrasons doivent être protégés contre les surtensions. La largeur du tube doit être choisie de telle sorte que la hauteur d'eau ne dépasse pas

80% de son diamètre nominal, sans quoi le tube risque d'être plein.

Il faut éviter les remous, les tourbillons et les rouleaux (par exemple après un ressaut ou un apport latéral). Pour ce faire on prévoira des tronçons de tranquillisation avant et après l'installation de mesure. Ceux-ci doivent mesurer au moins 5 fois le diamètre du tube avant le système de mesure, ou 3 fois le diamètre du tube après celui-ci. La pente du tronçon de mesure ne doit pas dépasser 5%.

Les systèmes électromagnétiques peuvent présenter des inexactitudes à des taux de remplissage très faibles. Ceci est à prendre en compte pour des écoulements non permanents.

5. Contrôles du fonctionnement et entretien

Contrôler périodiquement le calibrage, par exemple avec une mesure volumétrique, qu'on aura déjà prévue dans le projet de l'installation.

Les systèmes électromagnétiques ou les installations ultrasons ne nécessitent pratiquement pas d'entretien.

6. Redondance

Contrôle du débit par un autre système de mesure. Comparaison des pertes totales d'une retenue avec la somme des mesures faites dans différents secteurs.

7. Remarques

Pour interpréter les résultats de mesure il est nécessaire de considérer non seulement le niveau d'eau de la retenue, mais aussi les conditions météorologiques (précipitations et fonte des neiges), qui peuvent influencer fortement le débit.

Pression de l'eau dans le rocher

PIEZOMETRES: SYSTEMES OUVERTS

1. Principe de mesure

Le niveau de l'eau dans le forage est relevé à l'aide d'un sifflet ou d'un indicateur lumineux. On distingue trois systèmes pour cet équipement

- de mesure:
- a) Forage ouvert
 - b) Tube piézométrique
 - c) Tubes piézométriques avec filtres

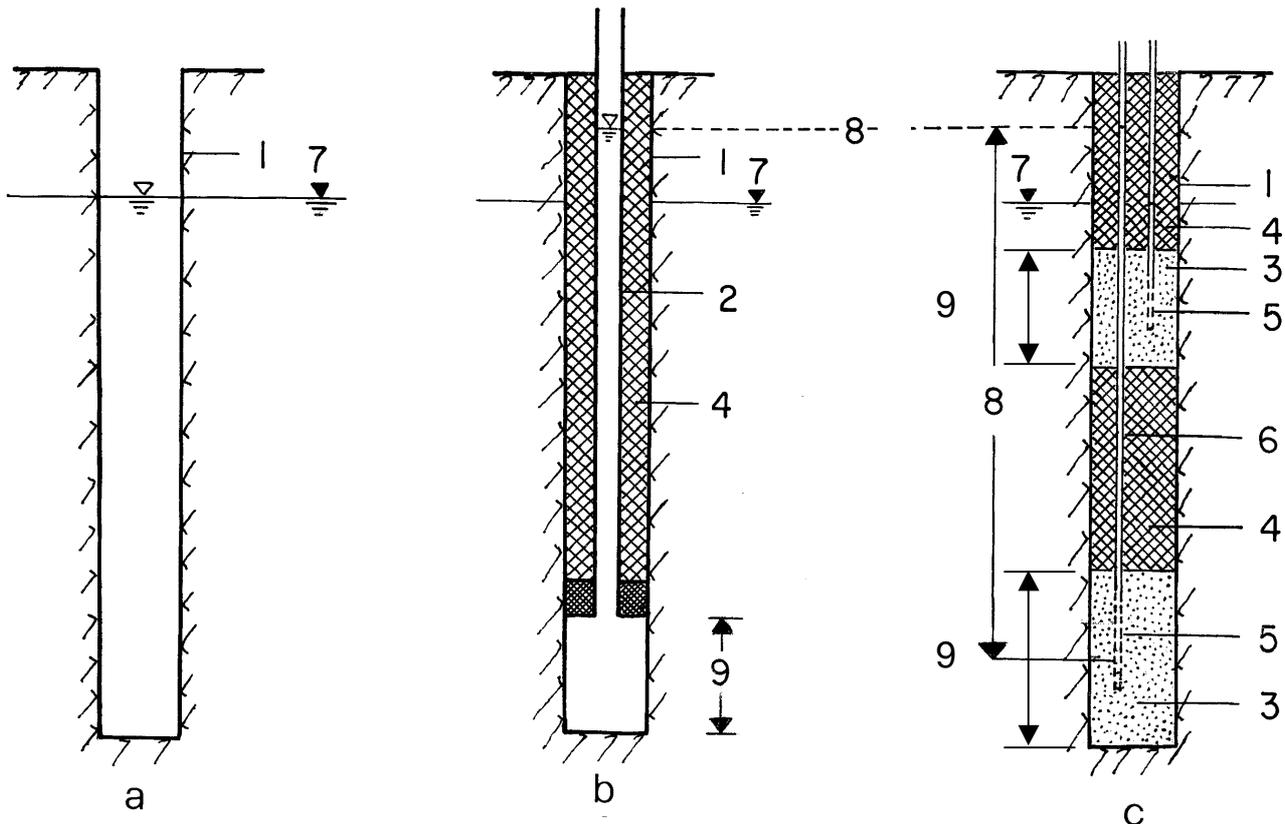


Figure 3.05-1: Trois types de tubes piézométriques ouverts

- 1 Forage
- 2 Tube diamètre 50 - 75 mm
- 3 Sable de quartz
- 4 Coulis d'injection
- 5 Filtre

- 6 Tube diamètre intérieur 8 - 12 mm
- 7 Niveau de la nappe phréatique
- 8 Hauteur des sous-pressions
- 9 Tronçon de mesure

Les forages peuvent être disposés verticalement ou inclinés (l'inclinaison par rapport à la verticale doit être plus faible que de 30° de telle façon que l'appareil puisse glisser).

Le système de mesure a) permet uniquement de connaître le niveau d'eau dans le massif rocheux, tandis que la mesure de pression est impossible. Les systèmes de mesure b) et c) permettent la détermination de la sous-pression dans un tronçon de mesure donné. En règle générale, on devrait renoncer à l'utilisation du système a) pour une mesure de pression.

2. Appréciation

Le système de mesure n'est indiqué que pour des mesures pour lesquelles le niveau d'eau se situe en dessous de la tête du forage. Au cas où le niveau d'eau dépasserait cette dernière, on munira l'équipement d'un manomètre (voir feuille explicative 3.06).

Les équipements de mesure a) et b) ne sont adéquats que pour la mesure de la sous-pression dans un rocher perméable. Dans un rocher moins perméables, ces deux systèmes ne devraient être appliqués que sous des ouvrages pour lesquels les niveaux d'eau amont et aval restent pratiquement constants. Dans l'équipement de mesure c), les

diamètres des tubes de mesure sont petits, de sorte que ce système peut aussi être utilisé dans un rocher moins perméable (temps de réaction réduit).

La mesure est simple et a fait ses preuves.

L'équipement ne se prête pas à l'automatisation et à la télétransmission.



Figure 3.05-2: Mesure du niveau d'eau dans un tube piézométrique au moyen d'un câble avec témoin lumineux

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Le rocher, les tubes, et pour le système de mesure c) également les filtres, peuvent être obstrués au cours du temps par des efflorescences ou de la boue.

En cas d'un tubage non étanche des équipements b) et c) ou d'un mauvais enrobage des tubes avec du coulis d'injection, les résultats de mesure peuvent être faussés suite à une circulation d'eau le long des tubes.

En cas de pénétration d'eau de surface, la mesure est faussée. Après pénétration de boue, de cailloux ou d'autres objets éventuels, dans le système de mesure, l'exécution de la mesure peut s'avérer impossible (du moins pour certains niveaux d'eau).

4. Exigences techniques

La tête des forages ou des tubes doit être protégée contre la pénétration d'eau de surface, de boue, de cailloux et d'autres objets. Si possible, les forages ou les tubes sont fermés à l'aide d'un capuchon. Cette fermeture ne doit pas perturber ni l'aération ni la ventilation du système de mesure.

La géométrie exacte des équipements de mesure doit être relevée (cotes des prises de pression,

cote de la tête du forage, inclinaison du forage, etc.).

Le forage selon système b) doit être tubé de manière étanche jusqu'à la prise de pression. De même, l'enrobage du tube doit être étanche de façon à empêcher une circulation d'eau le long du tube, laquelle fausserait les mesures.

Le montage des équipements de mesures du type c) ne doit être effectué que par du personnel expérimenté. On doit vouer toute son attention à un bon étanchement des différents étages de mesure. Les forages destinés à la mesure de la sous-pression ne doivent être exécutés qu'après achèvement complet de tous les travaux d'injection.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Tous les tubes (forages) doivent être contrôlés périodiquement sur toute leur longueur quant aux dépôts d'efflorescences ou de boue et, au besoin, ils doivent être nettoyés.

Le bon fonctionnement de l'indicateur lumineux (du sifflet) doit être vérifié périodiquement.

6. Redondance

Une certaine redondance résulte de la comparaison des résultats obtenus dans plusieurs points de mesure répartis sur toute la surface de fondation. Il est recommandé de disposer de groupes de points de mesure dans plusieurs sections transversales du barrage.

7. Remarques

Pour l'exécution de tels forages, il y a lieu de tenir compte de l'espace restreint disponible pour l'exécution des forages ainsi que de la position exacte de la surface de fondation (relevé topographique des excavations effectuées pendant les travaux). Lors du choix des tronçons de mesure il y a lieu de prendre en considération les propriétés géotechniques de la fondation rocheuse (une pression d'eau ne peut être mesurée uniquement si des fissures sont traversées).

Les forages doivent être du type rotatif avec prélèvement de carottes. Il est indiqué de mesurer la perméabilité du béton et du rocher avant le montage des équipements de mesure.

Au cas où les pressions diminueraient progressivement au cours du temps, malgré un entretien périodique des systèmes de mesure ou lorsque la pression resterait constante pour un niveau variable du lac, on réalisera de nouveaux équipements de mesure à proximité des anciens. Ceci montrera si la fondation rocheuse entière est soumise à un colmatage ou uniquement une zone à proximité immédiate des prises de pression.

Pression de l'eau dans le rocher

PIEZOMETRES: SYSTEMES FERMES

1. Principe de mesure

Dans les équipements de mesure conçus selon le principe du forage fermé, la mesure de la sous-pression s'effectue à l'aide d'un manomètre relié au point de mesure situé dans la fondation rocheuse ou au contact béton/rocher par un tube de prise.

Le principe de mesure décrit est appliqué dans les cas où la sous-pression présumée dépasse le niveau de la tête du forage.

Normalement, on distingue les systèmes suivants:

- a) Simple tube avec tronçon de mesure en rocher
- b) Tube avec cloche au contact béton/rocher
- c) Tube avec filtre (avec plusieurs points de mesures dans un forage)
- d) Tube avec cellule de mesure rinçable

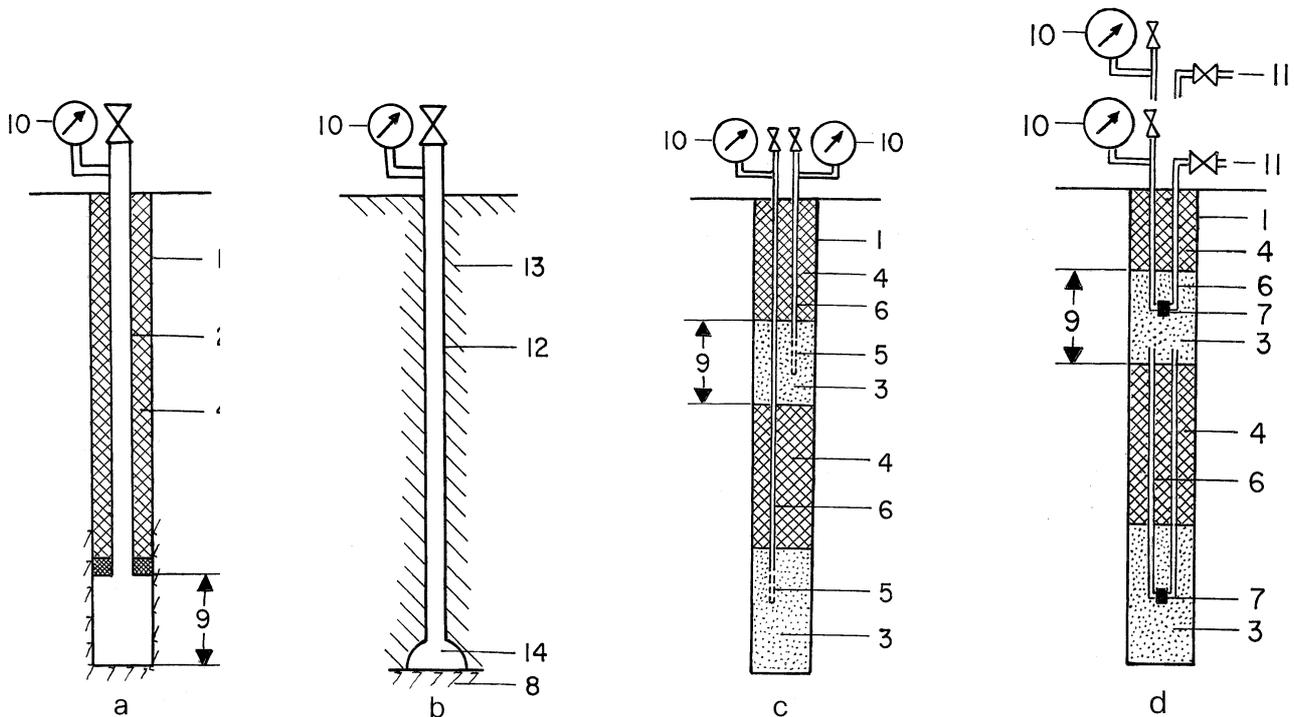


Figure 3.06-1: Quatre types différents de piézomètres

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. Forage 2. Tube (diamètre 50 - 75 mm) 3. Sable de quartz 4. Coulis d'injection 5. Filtre poreux 6. Tube en matière synthétique (diamètre intérieur 8 - 12 mm) 7. Cellule de mesure | <ul style="list-style-type: none"> 8. Fondation rocheuse 9. Tronçon de mesure 10. Manomètre 11. Robinet de purge 12. Tube scellé dans le béton (diamètre 50 - 70 mm) 13. Béton 14. Cloche de sous-pression |
|--|---|

Les forages nécessaires à l'installation des équipements de mesure peuvent être disposés verticalement ou inclinés.

Le type a) permet la mesure de la pression sur la hauteur du forage. Quant au type b), la mesure se limite au contact béton/rocher. Pour les types c) et d), les tronçons entre les zones de mesures sont étanchés par un coulis d'injection. Plusieurs cellu-

les de mesure enrobées par un sable filtrant peuvent être installées dans un même forage.

2. Appréciation

L'équipement de mesure a) est le plus couramment appliqué pour la mesure de la sous-pression. L'équipement b) ne peut pas être installé ultérieurement. Dans la pratique les mesures de sous-pression selon le principe du tube fermé ont fait leurs preuves. La précision de la mesure au ma-

nomètre de 1 % de la plage de mesure est normalement suffisante.

L'équipement ne se prête pas à l'automatisation et à la télétransmission. C'est pourquoi les cellules de mesure sont souvent installées et permettent la prise de données et leur transmission (voir feuille explicative 3.07).

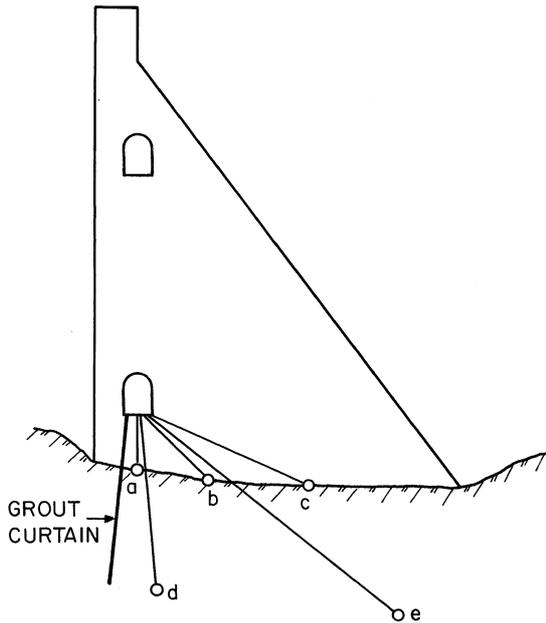


Figure 3.06-2: Disposition typique de prises de pression

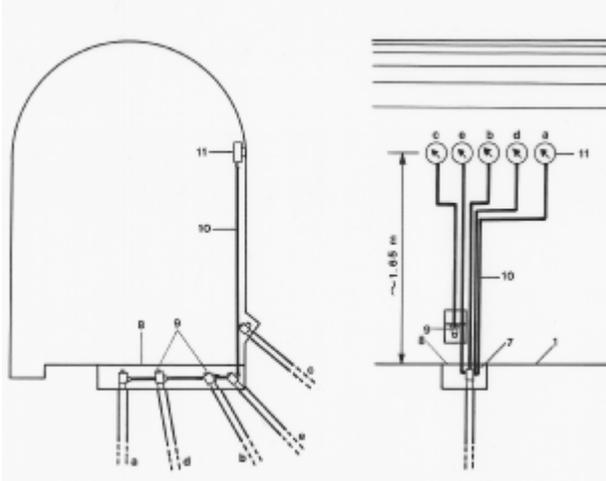


Figure 3.06-3: Raccordement des tubes de prise aux manomètres

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Lors du montage des équipements de mesure du type c) et d), une prise de pression est parfois perdue dès le début, suite aux injections nécessaires dans le forage.

Le tube et le matériau du filtre dans le cas de l'équipement de mesure c) peuvent être bouchés au cours du temps par des efflorescences ou de la boue. Ceci est aussi valable pour le système d) au

cas où les prises de pression ne seraient pas assez souvent rincées.

En cas d'un tubage non étanche des équipements ou d'un mauvais enrobage des tubes avec du coulis d'injection, les résultats de mesure peuvent être faussés suite à une circulation d'eau le long des tubes.

Des inclusions d'air dans le système de mesure peuvent induire des indications erronées.

Suite à des dépôts de carbonates ou à une fatigue du dispositif de mesure, des imprécisions de mesure peuvent apparaître.

Après une éventuelle décharge du système de mesure (par exemple, pour un nettoyage), la pression ne se rétablit parfois que très lentement. Les résultats des mesures après une telle décharge peuvent donc être faussés.

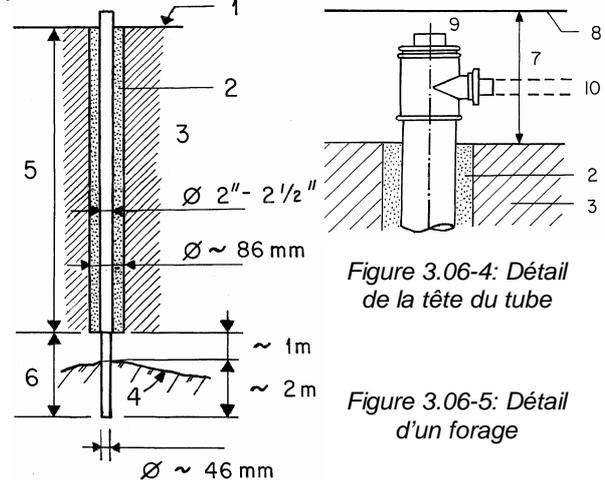


Figure 3.06-4: Détail de la tête du tube

Figure 3.06-5: Détail d'un forage

1. Radier ou paroi d'une niche
2. Coulis d'injection
3. Béton de masse
4. Contact béton-rocher
5. Longueur de forage tubé
6. Forage non tubé
7. Rigole
8. Couverture métallique
9. Pièce à T (par exemple 2" / 1/2") comme fermeture du tube et raccord avec un tube à pression
10. Tuyau flexible ou tube métallique
11. Manomètres

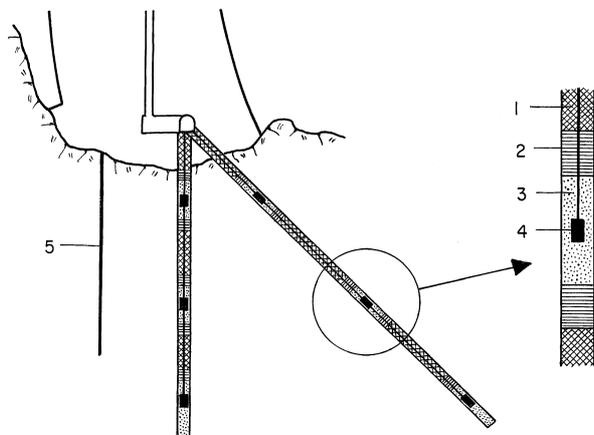


Figure 3.06-6: Disposition typique de prises de pression des types c) et d) dans le massif rocheux sous un barrage en béton

- | | |
|----------------------|---------------------|
| 1 Coulis d'injection | 4 Piézomètre |
| 2 Boules d'argile | 5 Voile d'injection |
| 3 Sable de quartz | |

4. Exigences techniques

Comme manomètres, on n'utilisera que des produits robustes confectionnés avec des matériaux inoxydables.

La plage de mesure du manomètre doit clairement dépasser la pression maximale présumée.

Pour éviter une interprétation erronée des conditions de sous-pression, les tubes de prises et les manomètres ne doivent être déchargés qu'exceptionnellement, par exemple, pour des travaux de nettoyage.

Dans la mesure du possible, les manomètres doivent être installés à proximité des forages.

Les tubes de prises doivent être utilisés exclusivement pour la mesure des sous-pressions. Pour décharger la fondation rocheuse, il y a lieu de prévoir des forages de drainage séparés (lesquels peuvent être éventuellement munis de manomètres).



Figure 3.06-7: Mesure du niveau d'eau au moyen d'une sonde à témoin lumineux ou sonore. Pour des niveaux d'eau supérieurs à la tête du forage, ce dernier est fermé et la sous-pression est mesurée au moyen d'un manomètre

La géométrie exacte des équipements de mesure doit être relevée (cote du tronçon de mesure, cote de la tête du forage, inclinaison du forage, cote du manomètre, etc.).

Le forage contenant des équipements de mesures des types a) et b) doit être tubé de manière étanche jusqu'à la prise de pression. De même, l'entourage du tube doit être étanche de façon à empêcher toute circulation d'eau le long du tube.

Le montage des équipements de mesures des types c) et d) ne doit être effectué que par du per-

sonnel expérimenté. On doit vouer toute son attention à un bon étanchement des différents étages de mesure.

Les forages destinés à la mesure de la sous pression ne doivent être exécutés qu'après achèvement complet de tous les travaux d'injections.



Figure 3.06-8: Mesure de la sous-pression au moyen d'un système fermé avec des points de mesure répartis d'amont vers l'aval. La valeur de la pression du 3^e manomètre depuis la droite est transmise à distance



Figure 3.06-9: Système fermé avec capteurs électriques de pression avec transmission à distance placés en tête de forage pour éviter des pertes de pression

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Les tubes de mesure doivent être contrôlés de temps en temps sur toute leur longueur et, au besoin, être nettoyés.

Le fonctionnement correct des manomètres doit être vérifié périodiquement. Ce contrôle s'effectue de préférence pour différents paliers de pression, à l'aide d'une pompe et d'un manomètre de précision. Provisoirement le manomètre à contrôler peut aussi être raccordé à une conduite d'eau dont la pression est connue (par exemple, pression du lac). Des manomètres défectueux doivent être aussitôt révisés ou au besoin remplacés. Quelques manomètres de remplacement doivent être gardés en réserve.

Les conduites de raccordement entre tube de mesure et manomètre de même que les raccords doivent être contrôlés périodiquement ainsi que lors d'une diminution extraordinaire de la pression quant à leur étanchéité ou à une obstruction éventuelle.

6. Redondance

Une certaine redondance résulte de la comparaison des résultats obtenus dans plusieurs points de mesure répartis sur toute la surface de fondation. Il est recommandé de disposer de groupes de points de mesure dans plusieurs sections transversales du barrage. Éventuellement, prévoir une mise en place de cellules de mesure de pression supplémentaires.

7. Remarques

Pour l'exécution de tels forages, il y a lieu de tenir compte de l'espace restreint disponible pour l'exécution des forages, ainsi que de la position exacte de la surface de fondation (relevé topographique des excavations effectué pendant les travaux).

Lors du choix des tronçons de mesure, il y a lieu de prendre en considération les propriétés géotechniques de la fondation rocheuse (perméabilité, nombre de fissures).

Les forages doivent être du type rotatif avec prélèvement des carottes. Il est indiqué de mesurer la perméabilité du béton et du rocher avant le montage des équipements de mesure.

Au cas où les pressions diminueraient progressivement au cours du temps, malgré un entretien périodique des systèmes de mesure ou lorsque la pression resterait constante pour un niveau variable du lac, on réalisera des nouveaux équipements de mesure à proximité des anciens. Ceci montrera s'il s'agit d'un colmatage global ou uniquement limité à une zone à proximité immédiate des prises de pression.

Pression de l'eau dans le rocher

PIEZOMETRES: CELLULES DE PRESSION (PNEUMATIQUES OU ELECTRIQUES)

1. Principe de mesure

Les capteurs mesurent la pression d'eau dans la fondation rocheuse. Ils sont installés dans des forages, aux niveaux souhaités, et reliés par des tubes de petit diamètre respectivement par câbles électriques au poste de mesure, qui le plus souvent est conçu comme poste central.

Les capteurs mesurent la pression locale de l'eau indirectement, le plus souvent par la déformation d'une membrane.

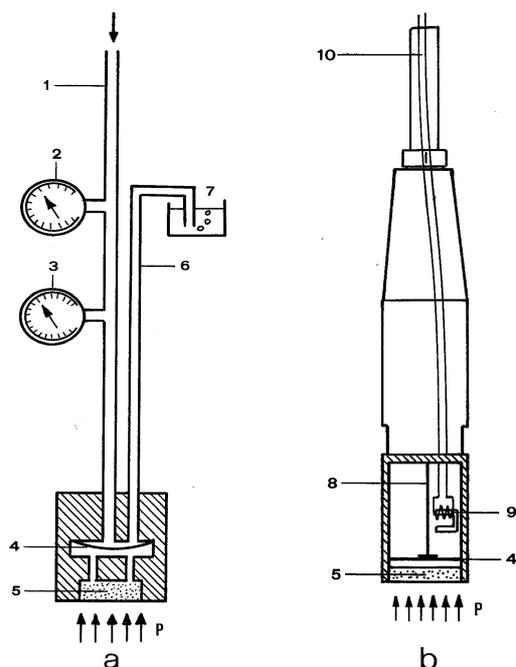


Figure 3.07-1: Deux types différents de cellules piézométriques

- a) piézomètre pneumatique
- b) piézomètre électrique
- 1 Conduite sous pression
- 2 Régulateur du volume de gaz
- 3 Manomètre
- 4 Membrane
- 5 Filtre poreux
- 6 Conduite de retour
- 7 Témoin de circulation de gaz
- 8 Corde vibrante
- 9 Bobine électrique
- 10 Câbles de transmission

Pour les **piézomètres pneumatiques**, la pression dans la cellule est augmentée progressivement à l'aide d'un gaz (par exemple, de l'azote) ou plus rarement à l'aide d'huile, jusqu'au moment où il y a équilibre entre la pression intérieure et la pression extérieure à mesurer. Cet équilibre de pression conduit à l'ouverture d'une soupape et à une indication correspondante à l'appareil de mesure.

Les **piézomètres électriques** reposent soit sur le principe de la mesure d'une résistance ohmique soit sur celui de la mesure de fréquence d'une corde vibrante.

2. Appréciation

Tous les systèmes de mesure ont fait leurs preuves. Ils demandent cependant beaucoup de soins lors du choix des produits et lors du montage des instruments et des conduites (câbles).

Les capteurs cités présentent un temps de réaction court, raison pour laquelle ils sont indiqués pour l'utilisation dans des roches peu perméables. Les cellules électriques sont simples à l'emploi et peuvent être mesurées à grande distance.

Une altération des résultats de mesure ainsi que la perte de capteurs suite à un colmatage des filtres ne sont pas rares et surviennent pour tous les types de capteurs.

L'automatisation et la télétransmission des piézomètres électriques sont possibles.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Lors du montage, un capteur est parfois perdu dès le début suite à un blocage de celui-ci par des injections.

Par un montage peu soigneux, une conduite (ou un raccord) peut être non étanche ou un câble électrique peut être défectueux.

Des piézomètres peuvent tomber en panne suite à des réactions chimiques.

Suivant la constitution chimique de l'eau, les filtres des capteurs peuvent se colmater plus ou moins rapidement, ce qui conduit normalement à la perte du capteur.

Des inclusions d'air dans les filtres conduisent à des imprécisions des mesures.

De l'eau pouvant circuler le long de conduites ou câbles peut conduire à une compensation de pression dans un ou plusieurs étages de mesure, ce qui fausse les mesures.

Par un montage peu soigneux, la mesure pneumatique peut être perturbée par la présence d'eau de condensation ou de corps étrangers dans les conduites.

En ce qui concerne les capteurs électriques, les résultats de mesure peuvent être faussés par différentes influences, comme par exemple, dérive du point "zéro", phénomènes de vieillissement des câbles, oxydation de contacts électriques, déficiences dans l'instrument de mesure. Des pertes de capteurs suite à des surtensions (foudre) ne sont également pas rares.

4. Exigences techniques

Pour **tous les piézomètres**: Le montage est exigeant et ne doit être effectué que par des spécialistes.

Afin d'éviter des inclusions d'air, les filtres doivent être saturés d'eau avant le montage.

Dans un forage donné, chaque capteur doit être logé séparément ou éventuellement conjointement avec un capteur de réserve, dans du sable adéquat, en règle générale un sable de quartz. Pour empêcher une circulation de l'eau le long du forage, les zones de prise de pression doivent être proprement étanchées et les tronçons du forage entre celles-ci doivent être remplis par du coulis de ciment.

Le type de filtre le plus adéquat doit être déterminé en fonction de la constitution chimique de l'eau, avant de procéder aux travaux de montage (il existe des filtres en céramique, en métal poreux, ainsi qu'en sable de quartz cimenté. Pour ces filtres, on utilise soit du sable de quartz naturel, soit du sable de quartz confectionné artificiellement (silice). Comme liant, on utilise différents matériaux.)

Si l'on craint une obstruction des filtres, il y a lieu de prévoir un système de rinçage des capteurs.

Pour compenser la perte d'un certain nombre de capteurs, il y a lieu de placer des capteurs en surnombre. Il est également avantageux de combiner différents systèmes de mesure.

Piézomètres pneumatiques: Pour obtenir la pression intérieure, il faut employer un gaz sec (azote) Pour empêcher la formation d'eau de condensation, il y a lieu d'assécher complètement les conduites lors du montage.

Les conduites doivent être accessibles pour des contrôles sur la plus grande longueur possible. (Recherche de défauts).

Piézomètres électriques: Les câbles doivent être entièrement étanches et présenter une résistance mécanique élevée. Ils ne doivent présenter aucune épissure entre le capteur et le coffret de connexion ou de mesure.

Attacher une grande importance à la protection contre les surtensions (câbles blindés, mise à terre, fusible pour surtensions).

Afin de maîtriser le problème de la dérive du point "zéro", il peut être intéressant d'installer une paire de capteurs par zone de prise de pression (les résultats des deux capteurs se contrôlent mutuellement).

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Tous les piézomètres: Afin d'assurer la longévité des capteurs équipés d'un dispositif de rinçage, ceux-ci doivent absolument être rincés périodiquement avec une eau désaérée. Des capteurs

trop fortement colmatés ne peuvent normalement plus être libérés de leurs incrustations (ce qui permet d'éviter des surpressions).

Piézomètres pneumatiques: Contrôler lors de chaque mesure si la montée de la pression maximale peut être maintenue. Si tel n'est pas le cas, la conduite présente quelque part une inétanchéité et doit (pour autant qu'elle soit accessible) être réparée.

Afin d'éliminer l'humidité dans les conduites, un assèchement périodique peut s'avérer nécessaire.

Piézomètres électriques: Les contacts et l'instrument de mesure doivent être régulièrement nettoyés et protégés contre l'oxydation. Ces piézomètres permettent souvent la mesure de la température dans la région du capteur de pression. On obtient une indication précieuse concernant les percolations et aussi un certain contrôle sur les pressions d'eau mesurées.

L'instrument de mesure doit être vérifié périodiquement à l'aide d'un instrument de tarage ou par le fabricant.

6. Redondance

Une certaine redondance résulte de la comparaison des résultats obtenus en plusieurs points de mesure répartis sur toute la surface de fondation. Il est recommandé de disposer de groupes de points de mesure dans plusieurs sections transversales du barrage.

7. Remarques

Pour l'exécution de forages ultérieurs, il y a lieu de tenir compte de l'espace restreint disponible pour l'exécution des forages, ainsi que de la position exacte de la surface de fondation (relevé topographique des excavations effectué pendant les travaux).

Lors du choix des tronçons de mesure, il y a lieu de prendre en considération les propriétés géotechniques de la fondation rocheuse.

Les forages doivent être du type rotatif avec prélèvement des carottes. Il est indiqué de mesurer la perméabilité du béton et du rocher avant le montage des équipements de mesure.

Au cas où les pressions diminueraient progressivement au cours du temps, malgré un entretien périodique des systèmes de mesure ou lorsque la pression resterait constante pour un niveau variable du lac, on réalisera de nouveaux équipements de mesure à proximité des anciens. Ceci montrera si la fondation rocheuse entière est soumise à un colmatage ou uniquement une zone à proximité immédiate des prises de pression.

Pour des recherches particulières du comportement des sous-pressions, il existe de nouveaux appareils, tels que le piézodex ou le piézofor, lesquels permettent des mesures ponctuelles des



sous-pressions le long d'un forage équipé d'un tube spécial rainuré.



Pression de l'eau les matériaux meubles

PIEZOMETRES: SYSTEMES OUVERTS

1. Principe de mesure

Le niveau de l'eau dans un barrage en remblai et dans une fondation est relevé à l'aide d'un indicateur lumineux ou d'un sifflet (rarement). Les forages nécessaires pour la mise en place du dispositif de mesure sont exécutés depuis la surface ou depuis une galerie les forages peuvent être verticaux ou (rarement) inclinés.

Pour connaître la sous-pression ou les pressions interstitielles en des points donnés d'un barrage en remblai, les piézomètres suivants sont utilisés:

- a) Forage ouvert
- b) Tube piézométrique
- c) Piézomètre avec filtre

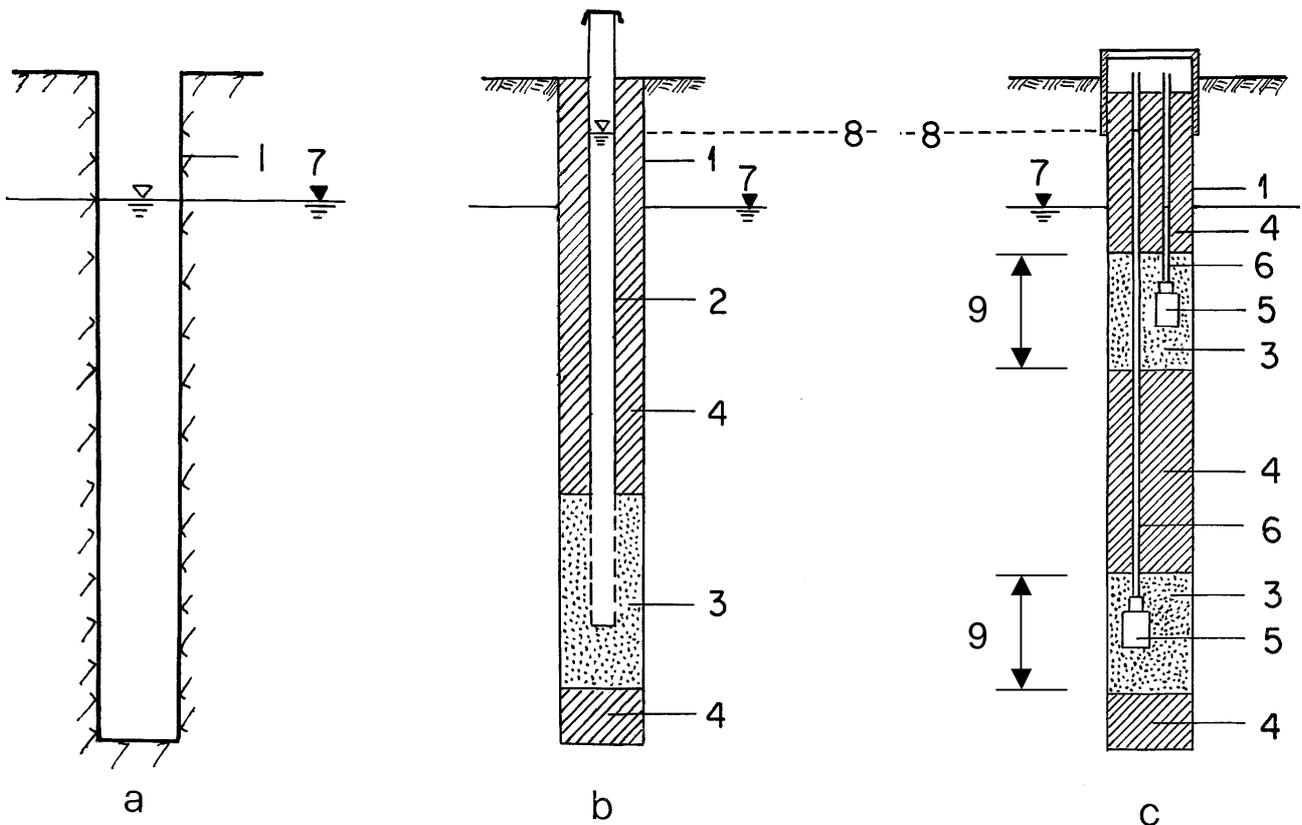


Figure 3.08-1: Trois types différents de tubes piézométriques

- | | |
|--|--|
| 1 Forage | 6 Tube en matière synthétique (diamètre intérieur 8 à 12 mm) |
| 2 Tube perforé (diamètre 50 – 70mm) | 7 Nappe phréatique |
| 3 Sable | 8 Niveau d'eau |
| 4 Coulis d'injection (remplissage étanche) | 9 Tronçon de mesure |
| 5 Filtre poreux | |

Le forage ouvert (type a) ne peut être employé que pour un matériau stable. Il ne permet que la mesure du niveau de la nappe phréatique dans le sous-sol. Pour connaître la sous-pression ou la pression interstitielle en des points donnés du barrage en remblai ou du sous-sol de fondation, des piézomètres de types b) et c) sont utilisés.

Dans le cas du tube piézométrique (type b), on introduit dans le forage un tube d'un diamètre de 2" à 2,5" perforé dans le tronçon de mesure prévu.

L'espace entre le tube et les parois du forage est rempli d'un matériau filtrant au droit du tronçon de mesure et d'un matériau étanche (bentonite, injection ciment/argile) dans la partie restante. Selon le diamètre du forage et du tube, il est possible d'installer jusqu'à 3 piézomètres.

Le piézomètre avec filtre (piézomètre Casagrande - type c) est employé dans des matériaux relativement imperméables. Afin de réduire le temps de réaction, on utilise des petits tubes de mesure

flexibles (diamètre intérieur de 8 à 12 mm), qui sont reliés au point de mesure à une cellule munie d'un filtre poreux. Dans un même forage, on peut prévoir plusieurs points de mesure (jusqu'à 3) situés à différents niveaux.

2. Appréciation

Le système de mesure type a) s'applique plutôt en terrains rocheux.

Le tube piézométrique (type b) se prête bien pour un matériau perméable et aussi peu perméable. Dans ce dernier cas, si les variations de pression ne sont pas trop fortes et trop rapides. Ce dispositif de mesure est robuste et offre une grande sécurité de fonctionnement.

Le système de mesure type Casagrande (type c) s'utilise aussi dans un sol faiblement perméable, car en raison du faible diamètre des tubes de mesure un débit restreint doit s'écouler ou affluer, avant que le piézomètre puisse enregistrer la variation de pression. La mesure est simple et a fait ses preuves.

Le système de mesure se prête pour des mesures pour lesquelles le niveau d'eau se situe au-dessous de la tête du forage. Dans le cas où le niveau d'eau serait plus haut et des venues d'eau sont à prévoir, on munira l'équipement d'un manomètre (voir feuille explicative 3.09).

Le système ouvert ne se prête pas à l'automatisation et à la télétransmission.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Les tubes et les filtres, ainsi que le matériau situé à proximité du tronçon de mesure peuvent être obstrués au cours du temps par des efflorescences ou de la boue. Si le tube n'est pas étanche ou si le remplissage autour du tube est mal exécuté, les mesures peuvent être influencées par des circulations d'eau.

Les mesures peuvent être faussées en cas de pénétration d'eau de surface.

Les valeurs peuvent être faussées si les couches de terrain, qui présentent différentes pressions d'eau, sont reliées par le tube.

Après pénétration de boue, de cailloux et autres éléments dans le système de mesure, l'exécution de la mesure peut s'avérer impossible (du moins pour certains niveaux d'eau).

4. Exigences techniques

On s'assurera que les eaux de surface ou des saletés ne puissent pas pénétrer dans le système de mesure. Pour cette raison, le système de mesure sera fermé à l'aide d'un capuchon. Cette fermeture ne doit pas perturber ni l'aération ni la ventilation du système de mesure.

L'équipement de mesure doit être exactement décrit et documenté (niveau du tronçon de mesure, niveau de la tête du forage, inclinaison du forage, etc.).

Le forage doit être étanche jusqu'au point de mesure, afin d'éviter des circulations d'eau le long du tube qui pourraient influencer les mesures.

Pour la mise en place, on tiendra compte de la position des différentes zones de matériau du barrage en remblai et des couches du sous-sol de fondation.

Lors du montage du tube pendant la mise en place du remblai, on prendra toutes dispositions pour éviter tout dommage par les engins de terrassement (obstacles, signaux, postes de garde). Dans certains cas, la mise en place ultérieure de piézomètres dans les forages est opportune.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Tous les tubes (forages) doivent être périodiquement contrôlés sur toute leur longueur en raison de dépôts possibles d'efflorescences ou de boue. Au besoin, ils doivent être nettoyés. Le bon fonctionnement de l'indicateur lumineux et du sifflet doit être périodiquement vérifié.

La fiabilité du système de mesure doit être vérifiée par des essais par élévation ou par abaissement du niveau d'eau dans le tube, le cas échéant il faut procéder à des purges sous pression.

6. Redondance

Une certaine redondance peut être obtenue par la comparaison des résultats enregistrés pour plusieurs points répartis dans le remblai et la fondation. Il est recommandé de disposer de groupes de points de mesure dans plusieurs sections transversales du barrage.

Mise en place éventuelle de cellules de pressions supplémentaires.

7. Remarques

Les forages doivent être du type rotatif avec prélèvement de carottes. Il est indiqué de mesurer la perméabilité du matériau dans la zone du forage.

Dans le cas où les pressions diminueraient progressivement au cours du temps, malgré un entretien périodique des systèmes de mesure ou lorsque la pression reste constante pour un niveau variable du lac, on mettra en place un nouvel équipement de mesure à côté des anciens afin de voir si la fondation entière est soumise à un colmatage ou uniquement une zone à proximité immédiate des points de mesure.

Pour autant qu'il soit assez robuste, le tube peut être directement foncé dans un terrain meuble qui s'y prête.

Pression de l'eau dans les matériaux meubles

PIEZOMETRES: SYSTEMES FERMES

1. Principe de mesure

Dans les équipements conçus selon le principe du forage fermé, la mesure de la pression d'eau s'effectue à l'aide d'un manomètre qui est relié par un tube de prise au point de mesure situé dans le barrage en remblai ou dans la fondation. Le principe de mesure est appliqué dans le cas où la

pression présumée dépasserait le niveau de la tête du forage.

On distingue les différents systèmes suivants:

- a) Simple tube
- b) Tube piézométrique
- c) Piézomètre avec filtre (type Casagrande)

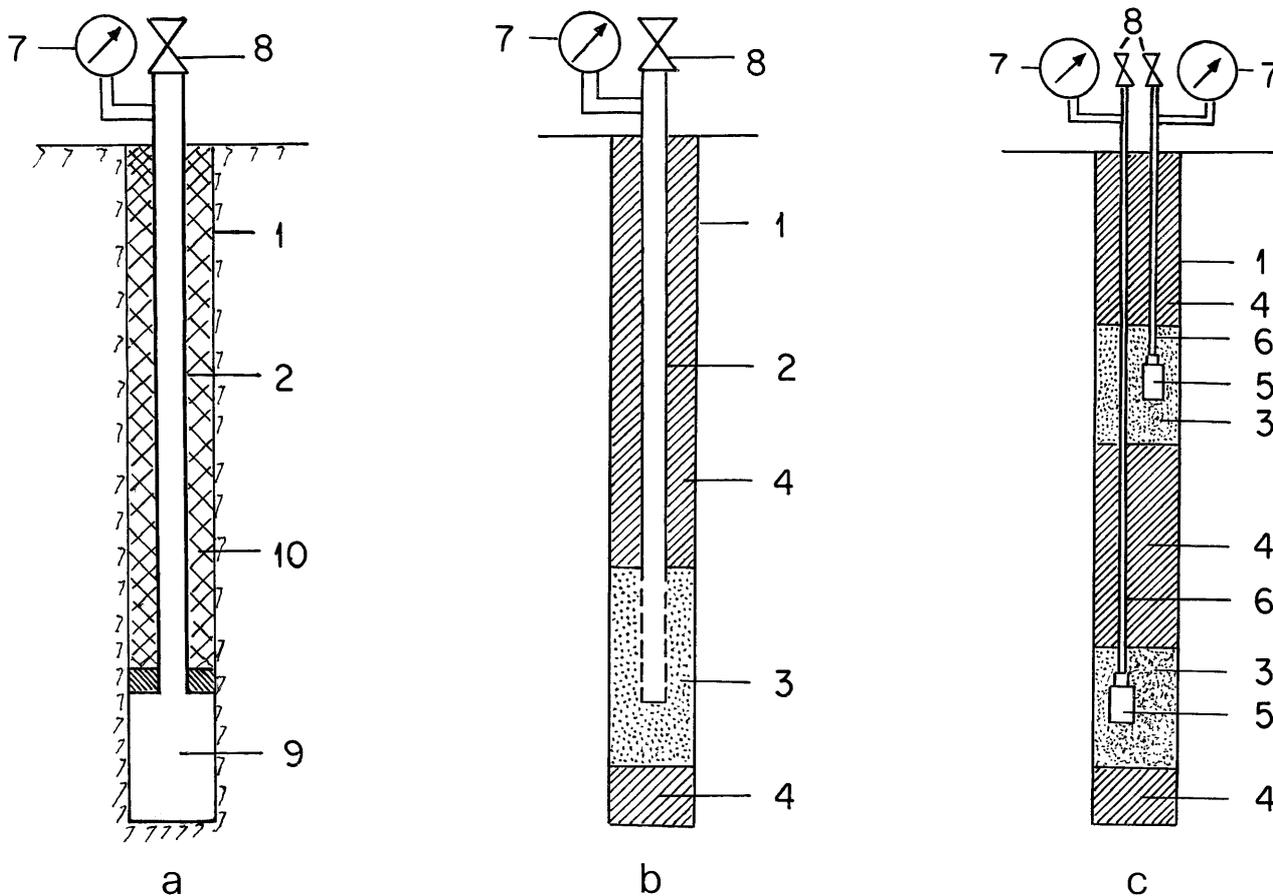


Figure 3.09-1: Trois différents types de tubes piézométriques fermés

- | | |
|------------------------------|--|
| 1 Forage | 6 Tube flexible (diamètre intérieur 8 - 12 mm) |
| 2 Tube (diamètre 50 - 75 mm) | 7 Manomètre |
| 3 Sable | 8 Vanne de purge |
| 4 Remplissage étanche | 9 Tronçon de mesure dans le rocher |
| 5 Filtre poreux | 10 Coulis d'injection |

Les forages nécessaires pour la mise en place du dispositif de mesure sont exécutés depuis la surface ou depuis une galerie. Les forages peuvent être verticaux ou inclinés.

Le système de mesure type a) ne peut être réalisé qu'en rocher. Le tronçon de mesure qui devrait avoir une longueur inférieure à 5 m, est relié au manomètre au moyen d'un tube d'un diamètre de 2" à 2,5". L'espace entre le tube et les parois du

forage sera injecté (prévoir un obturateur à l'extrémité inférieure du tube).

Les systèmes de mesure des types b) et c) peuvent être utilisés tant en rocher qu'en terrain meuble.

Dans le cas du tube piézométrique (type b), on introduit dans le forage un tube d'un diamètre de 2" à 2,5" perforé dans le tronçon de mesure prévu, tandis que dans le cas du piézomètre type Casagrande (type c) on place au droit du point de me-

sure une cellule munie d'un filtre poreux qui est reliée au manomètre par un petit tube flexible (diamètre intérieur 8 à 12 mm). Dans les 2 cas, il est prévu un remplissage de sable au droit des points de mesure et l'espace restant du forage est bourré par un matériau étanche (argile, injection, etc.). Dans un même forage, on peut prévoir plusieurs points de mesure (jusqu'à 3) situés à différents niveaux.

2. Appréciation

Dans ces systèmes fermés les variations de pression sont enregistrées après un court temps de réaction (temps de référence). La mesure est simple, précise et a fait ses preuves.

Les piézomètres types a) et b) sont de construction robuste qui offre une grande sécurité de fonctionnement, dont la précision est toutefois inférieure à celle du type Casagrande (type c). La précision de la mesure au manomètre de $\pm 1\%$ de la plage de mesure est normalement suffisante.

Ce système fermé ne se prête pas à l'automatisation et à la télétransmission. C'est pourquoi, des cellules de mesure, qui permettent une prise de données facile et leur transmission, sont souvent installées (voir feuille explicative 3.10).

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Les tubes et également les filtres du type c), ainsi que le matériau situé à proximité du tronçon de mesure peuvent être obstrués au cours du temps par des efflorescences ou de la boue.

Déjà, à la suite de l'exécution des injections dans le forage, il arrive que des points de mesure soient dès le début inutilisables. Si le tube n'est pas étanche ou si le remplissage autour du tube est mal exécuté, les mesures peuvent être influencées par des circulations d'eau.

Dans le cas de couches différentes de sol, où règnent différentes pressions piézométriques et de plus reliées l'une à l'autre par le système de mesure, les résultats peuvent être faussés. Des inclusions d'air dans le système de mesure peuvent induire des indications erronées.

Suite à des dépôts de carbonate ou à une fatigue du dispositif de mesure, des imprécisions de mesure peuvent apparaître.

Suite à une éventuelle décharge du système de mesure (par exemple lors d'un nettoyage), il se peut selon les circonstances que le rétablissement des pressions s'opère lentement. Les résultats des mesures qui suivent peuvent être erronés.

4. Exigences techniques

Les manomètres doivent être des appareils robustes construits avec un matériel inoxydable.

Le domaine de mesure du manomètre doit aller au-delà de la valeur de la pression maximale présumée.

Pour éviter une erreur d'interprétation de la distribution des pressions, les tubes de mesure et les manomètres doivent être maintenus en pression, sauf en cas de purge.

Par contre, après avoir effectué les mesures, il est possible de décharger les manomètres au moyen d'une vanne pour autant que le système soit tel qu'aucune venue d'eau ne se produit (aucune influence sur les résultats des mesures).

Le système de mesure doit être exclusivement prévu pour la mesure des pressions. Pour réaliser une éventuelle décharge de la fondation, on aura recours à des forages drainants séparés.

La géométrie exacte de l'équipement de mesure doit être relevée (niveau du tronçon de mesure, niveau de la tête du forage, inclinaison du forage, etc.).

Le forage pour les systèmes de mesure des types a) et b) doit être étanche jusqu'au point de mesure. Le remplissage autour du tube doit aussi être étanche afin d'éviter des circulations d'eau le long du tube.

Pour la mise en place du système du type c), on fera appel à un personnel expérimenté. On portera toute attention pour une bonne isolation des différents niveaux de mesure.

Pour la mise en place, on tiendra compte de la position des différentes zones du barrage en remblai et des couches du sous-sol de fondation.

Lors du montage du tube pendant la mise en place du remblai, on prendra toutes dispositions pour éviter tout dommage par les engins de terrassement (obstacles, signaux, postes de garde). Dans certains cas, la mise en place des piézomètres dans les forages à la fin de la construction est plus opportune.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Tous les tubes (forages) doivent être périodiquement contrôlés sur toute leur longueur en raison de dépôts possibles d'efflorescences et de boues. Au besoin, ils doivent être nettoyés.

Le fonctionnement des manomètres doit être périodiquement vérifié. Ce contrôle peut se faire en établissant différents niveaux de pression au moyen d'une pompe et d'un manomètre de précision. Provisoirement, on peut relier le manomètre à vérifier à une conduite d'eau sous une pression connue (par exemple, le niveau du lac). Les manomètres qui présentent des lacunes doivent être de suite révisés ou éventuellement remplacés. Des manomètres seront gardés en réserve.

La conduite de liaison entre le manomètre et le tube, de même que les raccords correspondants seront périodiquement contrôlés au niveau de leur étanchéité et de leur encrassement. Il en sera de



même lors du constat d'une diminution de pression inhabituelle.

6. Redondance

Une certaine redondance peut être obtenue par la comparaison des résultats enregistrés pour plusieurs points répartis dans le remblai et la fondation. Il est recommandé de disposer de groupes de points de mesure dans plusieurs sections transversales du barrage. Éventuellement, mise en place de cellules de mesure de pression supplémentaires.

7. Remarques

Les forages doivent être du type rotatif avec prélèvement de carottes. Il est indiqué de mesurer la perméabilité avant le montage des équipements de mesure.

Dans le cas où les pressions diminueraient progressivement au cours du temps, malgré un entretien périodique des systèmes de mesure ou lorsque la pression reste constante pour un niveau variable du lac, on mettra en place un nouvel équipement de mesure à côté des anciens afin de voir si on est en présence d'un colmatage global ou uniquement limité à une zone à proximité immédiate des points de mesure.

Pression de l'eau dans les matériaux meubles

PIEZOMETRES: CELLULES DE PRESSION (PNEUMATIQUE, ELECTRIQUE ET HYDRAULIQUE)

1. Principe de mesure

Ces cellules de pression (piézomètres) mesurent les pressions de la nappe et les pressions interstitielles dans un barrage en remblai et sa fondation. La pose a lieu au cours de la mise en place du remblai, dès que la digue a atteint le niveau prévu. Dans la fondation, les cellules piézométriques sont installées dans des forages. La liaison des piézomètres avec la station où les mesures sont généralement centralisées, est assurée par des tuyaux flexibles ou des câbles électriques.

On distingue principalement 3 types de cellules piézométriques:

Piézomètres pneumatiques (cellule à membrane fonctionnant comme soupape): La pression à l'intérieur de la cellule de mesure est élevée au moyen d'un gaz (par exemple de l'azote) ou, plus rarement, d'huile, jusqu'à ce qu'elle égale la pression extérieure à mesurer. La soupape s'ouvre

alors provoquant l'égalisation de la pression dans les conduites d'alimentation et de retour reliant la cellule à la station de mesure. La pression ainsi établie est indiquée au poste de lecture.

Piézomètres électriques: La pression interstitielle agit sur une membrane fixée dans la cellule. La déformation qui en résulte est transmise à la station de mesure au moyen d'un câble électrique, en utilisant le principe de la corde vibrante ou celui de la résistance électrique.

Piézomètres hydrauliques: La cellule consiste en un élément poreux (filtre) relié à la station de mesure par deux tuyaux flexibles remplis d'eau désaérée. La pression interstitielle est mesurée soit directement au moyen d'un manomètre, soit indirectement par un capteur de pression avec indicateur électrique.

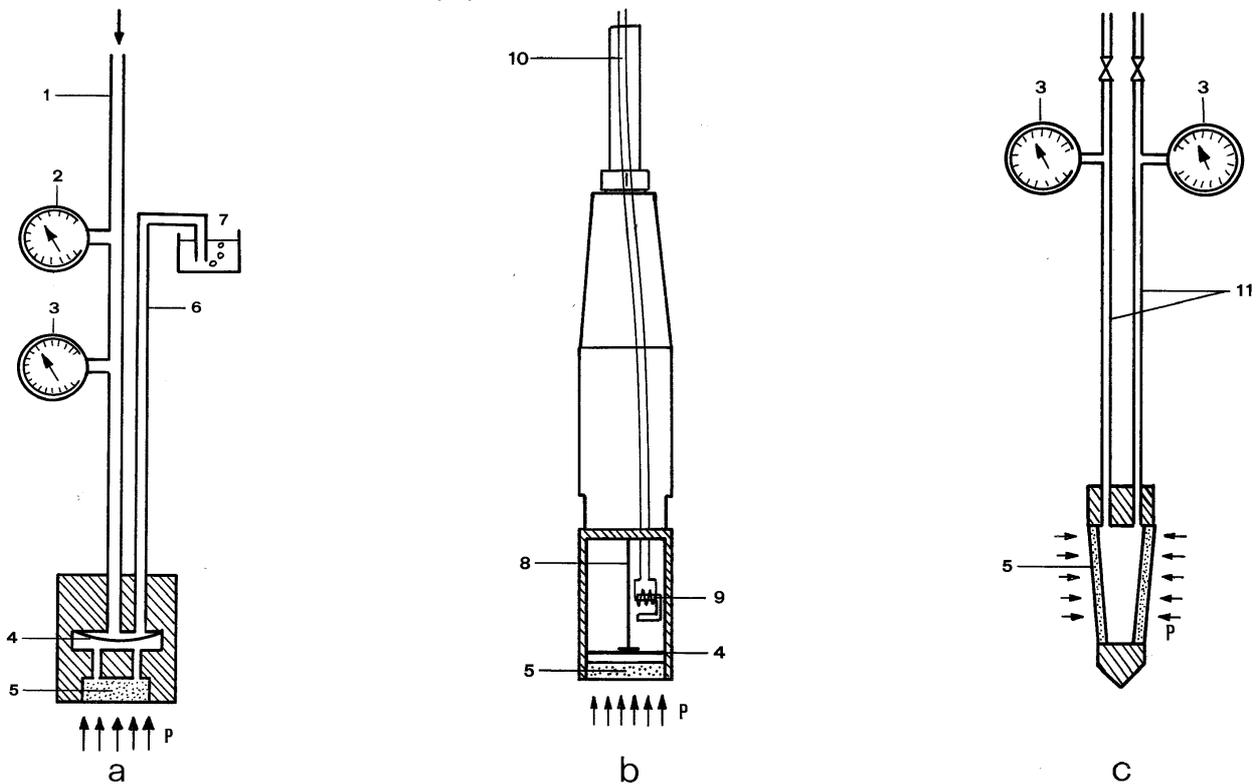


Figure 3.10-1: Deux types différents de cellules piézométriques

- a) piézomètre pneumatique
- b) piézomètre électrique (avec corde vibrante)
- c) piézomètre hydraulique
- 1 Conduite sous-pression
- 2 Régulateur du volume de gaz
- 3 Manomètre
- 4 Membrane

- 5 Filtre poreux
- 6 Conduite de retour
- 7 Témoin de circulation de gaz
- 8 Corde vibrante
- 9 Bobine électrique
- 10 Câble de transmission
- 11 Conduite contenant de l'eau désaérée



2. Appréciation

Les 3 types de cellules fonctionnent de manière fiable et précise, pour autant qu'ils aient été choisis à bon escient et mis en place soigneusement. Ils réagissent en un laps de temps très court et sont par conséquent bien adaptés aux matériaux peu perméables.

Les cellules hydrauliques sont les plus anciennes. Comme elles nécessitent davantage d'entretien que les deux autres types, on tend actuellement à utiliser plutôt les cellules électriques (en particulier celles avec corde vibrante).

Un des avantages des cellules hydrauliques réside dans la possibilité, grâce aux deux tuyaux, de purger le filtre de l'air qui y a pénétré, ce qui est particulièrement utile pour les cellules mises en place dans un matériau argileux non saturé. La nécessité par contre de poser les tuyaux en dessous du niveau de la pression interstitielle constitue un désavantage des cellules hydrauliques.

Les cellules électriques sont simples à l'emploi et peuvent être mesurées à grande distance.

Pour les trois types de cellules, le taux de défaillance n'est pas négligeable.

L'automatisation et la télétransmission des piézomètres électriques sont possibles.



Figure 3.10-2: Chambre de mesure pour piézomètres hydrauliques

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

Suite à une mise en place peu soignée, une conduite ne peut pas être étanche ou un câble peut être endommagé.

Lors du franchissement de la limite entre deux zones de matériaux différents, les tuyaux et câbles peuvent être distendus ou cisailés suite aux tassements différentiels.

En cas de montage peu soigné, la mesure pneumatique peut être faussée par la présence d'eau de condensation ou d'un corps étranger dans les conduites.

Différentes influences peuvent fausser les résultats des mesures effectuées avec des cellules électriques, telles que, par exemple, le vieillissement des câbles, l'oxydation des contacts, un défaut de l'instrument de mesure, une dérive du zéro de l'indicateur. Des surtensions (foudre) peuvent également mettre hors d'usage des cellules électriques.

L'air pénétrant dans le filtre peut altérer la qualité de la mesure.

L'action corrosive de l'eau peut aussi provoquer la défaillance d'une cellule.

Lors de la mise en place dans des forages, une cellule peut être injectée accidentellement lors de travaux ultérieurs et par conséquent être mise hors d'usage d'entrée.

4. Exigences techniques

La mise en place des appareils est délicate et prend du temps.

Dans les barrages en remblai, les piézomètres doivent être posés dans des niches séparées de la tranchée destinée aux tuyaux ou câbles. Les piézomètres seront enrobés soigneusement de matériau fin (ors de la mise en place dans une zone imperméable de l'ouvrage, les cellules ne seront cependant pas enrobées de sable).

Les conduites et câbles seront posés en zigzag dans les tranchées prévues à cet effet de façon à éviter que les déformations de la digue puissent les endommager. Une attention particulière sera vouée aux zones délicates, telles que le franchissement de la limite entre zones de matériaux différents ou l'entrée dans les galeries de contrôle.

Les conduites ne doivent présenter aucun raccord (tuyaux flexibles) ou épissure (câbles électriques) dans les zones inaccessibles (remblai, forage).

Les piézomètres placés en forage doivent être enrobés de matériau semblable à celui de la paroi. Pour éviter toute percolation verticale, un bouchon de matériau étanche sera constitué au-dessus de la cellule et le forage sera remblayé sur toute sa hauteur.

Pour choisir de manière adéquate le type de filtre de la cellule, une analyse chimique de l'eau est recommandée.

Afin de compenser les défaillances probables, il convient de prévoir des instruments en surnombre. Il peut s'avérer également avantageux de combiner des systèmes de mesure différents.

En cas d'utilisation de piézomètres hydrauliques, le système entier doit être posé à l'abri du gel. Le poste de mesure doit se situer au-dessous du niveau des pressions afin qu'aucun vide ne se produise.

Pour produire la pression interne nécessaire aux piézomètres pneumatiques, on utilisera un gaz sec (azote).

Les tuyaux flexibles des piézomètres hydrauliques et pneumatiques doivent être imperméables à l'air et à l'eau. Les câbles des cellules électriques doivent également être étanches, protégés contre les surtensions et présenter une résistance mécanique élevée.

Les piézomètres électriques et pneumatiques doivent être saturés lors de la mise en place de façon que le filtre soit exempt d'air captif.

Lorsqu'on peut craindre que le filtre se bouche, on équipera les cellules d'un dispositif de purge.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

Piézomètres pneumatiques: Lors de chaque mesure, il convient de contrôler si la montée en pression s'effectue normalement et si elle peut être maintenue. Dans le cas contraire, la conduite n'est plus étanche et doit être réparée (pour autant que cela soit possible).

Pour éliminer l'humidité de l'intérieur des conduites, il peut s'avérer nécessaire de souffler périodiquement du gaz à travers la tuyauterie flexible.

De même, on procédera à une purge périodique lorsque les piézomètres sont équipés en conséquence.

Piézomètres électriques: Les contacts à l'extrémité des lignes, c'est-à-dire dans le coffret d'auscultation, et ceux de l'appareil de mesure doivent être nettoyés périodiquement et protégés de l'oxydation.

L'appareil de lecture doit être contrôlé périodiquement soit à l'aide d'une cellule étalon, soit par le fournisseur.

Piézomètres hydrauliques: Les piézomètres et les tuyaux d'alimentation et de retour doivent être

purgés périodiquement à l'eau désaérée de façon que le système reste exempt d'air (on évitera de trop grandes pressions).

Au moyen d'abaissement et d'élévation du niveau d'eau, on s'assurera que les piézomètres fonctionnent correctement. Les indications des manomètres seront comparées périodiquement à celles d'un manomètre étalon.

6. Redondance

Une certaine redondance est obtenue par la comparaison des résultats fournis par les différentes cellules distribuées sur l'ensemble de la digue et du sous-sol de fondation. Il est judicieux de grouper les cellules dans des profils de mesure. Installation éventuelle de piézomètres.

7. Remarques

Il est possible de remplacer les cellules piézométriques défectueuses d'un barrage en remblai en remplaçant d'autres dans de nouveaux forages. On veillera alors à ne pas provoquer de fissures par la pression exercée par la boue de forage.

Lors de la mise en place de cellules dans le sous-sol, il est souhaitable de procéder à des essais de perméabilité lors des forages.

Si, en dépit d'un entretien régulier de l'installation, les pressions mesurées tendent à diminuer au cours du temps ou restent constantes malgré les variations de niveau de la retenue, il est conseillé de placer un nouveau dispositif de mesure proche de l'ancien. On peut ainsi déterminer si l'on a affaire à un colmatage général ou au contraire limité aux seules cellules de mesure.

Relevé des modifications physiques ou chimiques

TURBIDIMETRE

1. Principe de mesure

Cet appareil permet la mesure des matières en suspension dans les eaux d'infiltration en des points définis (point de sortie de venue d'eau importante ou point de récolte du débit total des eaux d'infiltration). Il existe 2 méthodes pour mesurer la turbidité :

- Par comparaison avec une solution standard: La turbidité se mesure à l'aide d'une cellule photoélectrique par la comparaison permanente de la lumière diffuse des eaux d'infiltration au moyen d'une solution standard comme la formazine ou le kieselguhr. La solution standard a plusieurs degrés (concentrations) qui peuvent être introduits sur l'appareil de mesure. Les valeurs de la turbidité (en pour cent de la solution standard employée) sont enregistrées sur une bande de papier.
- Par équivalence optique: La turbidité est mesurée en comparant de façon permanente la lumière diffuse dans l'eau de percolation avec un rayon de comparaison, lequel est conduit à travers l'eau de percolation. La valeur de la turbidité peut être tirée de l'égalisation du rayon de comparaison avec la lumière diffuse (pour cent de la perméabilité). Cette valeur peut être connue digitalement.



Figure 3.11-1: Mesure automatique de turbidité combinée avec une mesure automatique des infiltrations

2. Appréciation

Les 2 méthodes mentionnées utilisent des appareils sensibles, qui demandent un contrôle fréquent. Ces appareils doivent être installés qu'aux endroits où ils sont vraiment utiles et où ils peuvent être protégés de manière efficace.

D'autre part, l'enregistrement donne une information complète sur le développement du processus en cas de pollution éventuelle des eaux d'infiltration (phénomène d'érosion, délavage de produits d'injection, etc.).

L'automatisation et la télétransmission sont possibles et habituelles pour ces systèmes.

3. Dérangements possibles et erreur de mesure

- Obstruction de la conduite d'alimentation
- Saleté sur le miroir réfléchissant
- Ampoule défectueuse
- Interruption de la fourniture de courant électrique
- Entrée d'air dans l'échantillon
- Givrage
- Venue de corps étrangers suite à une inspection de l'ouvrage (par exemple par tourbillons d'eau)

4. Exigences techniques

Un débit de 0,2 à 0,5 l/min des eaux d'infiltration doit être prélevé en permanence. Une alimentation électrique pour le chauffage et la lumière est nécessaire.

La protection contre les perturbations dues à l'eau extérieure (gouttes, suintements, condensation) est indispensable.

Où cela est nécessaire, un décanteur grossier et une ventilation doivent être prévus.

5. Contrôle du fonctionnement et entretien

- Contrôle de l'avancement correct de l'enregistrement
- Contrôle de l'ampoule, changement périodique
- Nettoyage au moins une fois par mois du miroir réfléchissant
- Contrôle du système de ventilation du récipient et de la conduite d'eau et de la pompe afin de prévenir leur obstruction (mensuel)
- Contrôle occasionnel par une mesure de la suspension de référence
- Le travail d'entretien de ce système de mesure est important

6. Redondance

Analyse chimique périodique en laboratoire d'échantillons d'eau d'infiltration.

7. Remarques



Relevé des modifications physiques ou chimiques

ANALYSE CHIMIQUE DES EAUX

1. Dispositif de mesure

Aucun dispositif de mesure particulier n'est requis. Les prélèvements d'échantillons d'eau s'effectuent aux emplacements des stations de mesure de débits des eaux d'infiltration et de drainage, à la sortie des piézomètres ouverts pour la mesure des sous-pressions dans les galeries de contrôle des barrages en béton ou en remblai, ainsi que dans celles des appuis et des versants. Des échantillons de comparaison peuvent être prélevés aux sources situées dans les environs proches, ainsi que dans la retenue (directement ou au robinet d'une turbine de dotation).

2. Appréciation

Les analyses chimiques des eaux permettent de déterminer l'origine des eaux d'infiltration et de drainage: aquifères à savoir un écoulement issu d'un massif rocheux ou d'un terrain meuble, voire de la fondation du barrage ou de la retenue. De plus, elles permettent aussi d'apporter la preuve qu'une interaction (modification chimique) a eu lieu entre les eaux d'infiltration ou de drainage et les bétons ou le matériel d'injection, de même qu'avec le noyau d'étanchéité des barrages en remblai.

Pour évaluer l'origine des eaux d'infiltration et de drainage venant d'aquifères ou de la retenue, des échantillons peuvent être prélevés de la retenue et, selon les possibilités, des sources situées à l'aval.

L'automatisation et la transmission des analyses chimiques des eaux ne sont pas opportunes.

3. Dérangements possibles et erreurs de mesure

Si les échantillons d'eau sont correctement prélevés dans des flacons (contenant parfois un additif, par exemple un acide) mis à disposition par le laboratoire, aucune erreur ne peut se produire. Afin d'éviter de fausses interprétations, il est important d'indiquer au laboratoire d'analyses, la raison et le but de l'analyse chimique. De cette manière, les analyses seront correctement préparées et exécutées.

4. Exigences techniques

Remplir d'eau les flacons mis à disposition par le laboratoire d'analyse.

Doivent toujours être déterminées

- Au lieu de prélèvement:
 - Température (°C), important pour la détermination correcte du pH en laboratoire (voir ci-dessous)

- Aspect de l'eau (claire ou chargée par des sédiments). La turbidité peut être due à des particules naturelles ou de délavage de matériaux provenant du noyau d'étanchéité d'un barrage en remblai.
- Particules de rouille à l'exutoire. Elles peuvent indiquer la présence de fer dans l'eau.
- Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$) au moyen d'un appareil électronique. Cette mesure, pour la plupart, évalue également la température (voir plus haut).
- Au laboratoire :
 - pH (lors de la prise de température de l'eau, voir ci-dessus)
 - Dureté totale (°fH) ou (mmol/l)
 - Teneur en carbonate (°fH) ou (mmol/l)
 - Calcium (mg/l)
 - Equilibre en acide carbonique, libre ou excédentaire, agressivité de l'eau (CO_2 mg/l)

Déterminés de cas en cas:

- En laboratoire concernant l'eau:
 - Sulfate (mg/l), entre autres, en présence de roches avec sulfate
 - Magnésium, sodium, potassium, silice et éventuellement d'autres traces de particules (mg/l) en présence de roches correspondantes (dolomites, roches cristallines telles granite, gneiss, schistes cristallins et d'indices d'eaux profondes (eau minérale).
 - Fer (mg/l). Le flacon de prélèvement doit contenir un additif acide afin d'éviter la floculation du fer, ce qui pourrait fausser les résultats de l'analyse.
 - Carbone (total, TOC) et hydrocarbure, par exemple du méthane provenant de boues putréfiées et organiques dans la retenue à l'amont du barrage (mg/l). Prélèvement dans des flacons spéciaux, si possible avec isolation thermique, selon instructions spéciales.
- En laboratoire sur des sédiments filtrés (pour eau chargée de sédiments):
 - Analyse par un laboratoire spécialisé au moyen de rayons X sur carbonate, argile minérale, silicate, amphibole résultant du délavage de matériel d'injection et d'étanchéité (ciment, bentonite, silicate de potasse) en particulier dans des cas spéciaux concernant les barrages en remblai.

5. Contrôles du fonctionnement et entretien

L'appareil électronique pour la mesure de la température et de la conductibilité électrique doit être comparé avec un second appareil calibré. Le contrôle de fonctionnement des appareils de laboratoire est l'affaire du laboratoire d'analyse. Lors de prises nombreuses d'échantillon sur une longue durée, il faut s'assurer que les points de prélèvement fixés restent disponibles. En cas de colmatage du point de prélèvement, il faut rechercher de le rendre libre à nouveau en le purgeant et en le nettoyant mécaniquement ou chimiquement (acidification). Si cela n'est pas possible, un nouveau point de prélèvement comparable doit être recherché à proximité.

6. Redondance

Aucune redondance pour les analyses chimiques de l'eau n'est requise.

7. Remarques

Les analyses chimiques de l'eau sont indiquées en cas de:

- Constatations particulières
 - Augmentation des infiltrations
 - Augmentation du colmatage
 - Nouvelles venues d'eau
 - Eau chargée en sédiments, alors qu'auparavant elle ne l'était pas
- Questions et doutes particuliers:
 - Fuites par le rideau d'injection ou le noyau d'étanchéité
 - Eaux d'infiltration agressives pour le béton et le ciment
 - Circulation d'eau de la retenue à proximité et sous le site du barrage

Le **programme d'analyse** doit être fixé par des spécialistes (géologues, ingénieurs et experts en barrages).

La **prise d'échantillons** est effectuée par le personnel de l'exploitation selon les indications du spécialiste ou directement par ce dernier.

L'interprétation des analyses est effectuée par le spécialiste sur la base des résultats figurant dans le rapport établi par le laboratoire d'analyses chimiques.

Méthodes géophysiques

METHODES GEOPHYSIQUES

Quelques exemples de méthodes utilisées sont mentionnés dans la liste ci-dessous:

- Sismique de réflexion
- Sismique de réfraction
- Méthodes géoélectriques
- Méthodes électromagnétiques
- Géoradar
- Méthodes microgravimétriques
- Tomographie sismique
- Ultrason
- Thermographie par infrarouge
- Diagraphies (logging)

Le principe de base des **méthodes sismiques** repose sur la vitesse de propagation d'ondes qui se déplacent en surface, le long des limites de couches ou à l'intérieur des corps rocheux (ondes de compression, dites P et de cisaillement dites S). Pour obtenir des renseignements sur la structure de corps de l'ouvrage, on procède à l'analyse du temps de parcours, de la vitesse et du trajet d'ondes provoquées par des explosions ou des vibrations artificielles. On distingue 2 méthodes: **la sismique de réflexion et la sismique de réfraction**.

La méthode de **sismique de réflexion** sert à explorer le sous-sol en général à une profondeur de plus de 20 m. Chaque ébranlement, provoqué par une explosion ou par un "engin vibreur", permet de repérer, dans une zone étroite à la verticale du point d'origine des ondes, des surfaces qui renvoient les ondes à cause d'un changement assez brutal des propriétés physiques (densité, élasticité) du sous-sol, un peu à la manière dont une vitre renvoie un reflet. Des capteurs (sismomètres) disposés à la surface du sol, à proximité du point d'émission détectent les ondes qui remontent en surface. Après chaque mesure, on déplace le site d'ébranlement et les capteurs. En juxtaposant les données obtenues sur une même ligne droite, on obtient un profil sismique.

La méthode de la **sismique de réfraction** est basée sur la détection des premières ondes arrivées (ondes P ou ondes de compression). Chaque ébranlement, provoqué par une explosion ou par un "engin vibreur", permet de repérer des surfaces de discontinuité séparant des roches ou des sols où la célérité des ondes sismiques est différente. Pour ce faire, on dessine un diagramme distance / temps des premières arrivées (dit dromochronique). La propagation des ondes est régie par les lois de l'optique, les angles de réfraction dépendent du contraste des vitesses des terrains. Les résultats obtenus sont complémentaires de ceux de la sismique de réflexion. La méthode est le plus

souvent utilisée pour déterminer la profondeur du substratum rocheux et des zones fracturées peu profondes.

La méthode géoélectrique est une méthode pour distinguer des matériaux présentant un contraste de résistivité. La résistivité du sol est déterminée soit à partir de champs électriques naturels, soit à partir de champs électriques artificiels. Cette méthode est utilisée pour la détection et la localisation des circulations d'eau et du niveau de la nappe, ainsi que pour des mesures de perméabilité.

Les méthodes électromagnétiques sont basées soit sur la conductivité des terrains soit sur la propagation des ondes électromagnétiques dans le sol. **Le géoradar** est un appareil de géophysique et de géotechnique, basé sur le principe de la propagation et la réflexion des ondes électromagnétiques dans divers matériaux et le sol en particulier constitue un outil d'investigation léger et non destructif. Il permet d'effectuer rapidement et en continu des investigations géologiques de subsurface et des auscultations d'ouvrages en général. Depuis la surface jusqu'à quelques mètres de profondeur, il est possible de localiser les limites des couches dans le sous-sol, des petites cavités, ainsi que des objets de faible volume dont la conductivité est nettement différent du milieu dans lequel il se trouve. Le principe du radar de sol consiste à générer des impulsions électromagnétiques d'une fréquence allant de 20 à 2500 MHz. Cette onde va se propager dans le sol en se dispersant et en s'atténuant de manière différente en fonction des propriétés électriques des matériaux traversés (résistivité et constante diélectrique) qui sont influencés par la porosité, la teneur en eau et la conductivité du milieu. Le géoradar fournit un échogramme continu d'intérieur de la structure. Il est alors possible de mettre en évidence des cavités des zones de béton poreux sèches ou imbibées d'eau chargée de sels minéraux, ainsi que des écoulements préférentiels.

Les méthodes microgravimétriques consistent à déterminer des anomalies de la pesanteur dues à la répartition inégale des densités. Elles permettent de localiser des zones décomprimées et surtout de détecter la présence de cavités.

La **tomographie sismique** permet d'analyser la qualité d'un massif ou d'une structure. Un ensemble de sources (chocs, explosifs, ...) déclenche un ensemble capteurs (accéléromètres, capteurs piézo-électriques, ...). Pour chaque couple source - capteur, il est possible d'obtenir le temps du trajet. La vitesse est ensuite déduite. Les vitesses seront très semblables dans un massif homogène. Une zone lente ou rapide produit des anomalies



dans les vitesses. A l'aide d'un algorithme la distribution des vitesses de l'onde de compression dans le plan ausculté sera établie, ce qui permettra de repérer les anomalies.

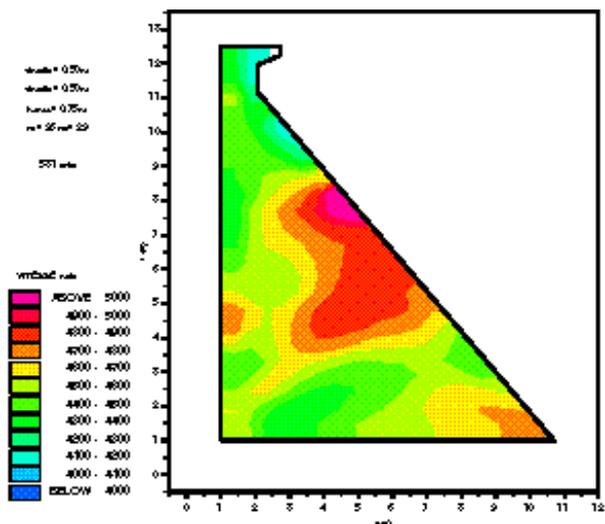


Figure 4.01-1: Coupe tomographique verticale d'un barrage-poids

La **méthode par ultrason** permet par l'envoi d'un signal entre un émetteur et un récepteur d'examiner des parties d'ouvrage en béton accessibles de 2 côtés. Sur la base du temps de parcours et de l'atténuation des amplitudes le long d'une ligne de mesure, il est possible de localiser les défauts d'homogénéité du béton et la présence de vide. Des indications concernant le module d'élasticité et la résistance peuvent aussi être déduites.

La **thermographie par infrarouge** est une méthode d'investigation optique qui permet de mettre en évidence les différences de température de diverses surfaces. Une caméra détecte les niveaux d'énergie d'une surface et la compare au niveau d'énergie d'une autre. Ces niveaux se présentent comme des ondes légères invisibles fai-

sant partie du spectre électromagnétique, communément appelé infrarouge. La caméra convertit ces ondes légères invisibles en une image graphique qui apparaît sur un écran. Sur la base de la répartition des températures en surface, il est possible de détecter des zones humides et des défauts. La température en surface dépend de la conductibilité thermique des matériaux, qui est d'autre part influencée par l'humidité. Cette méthode se prête bien pour une première évaluation et le suivi de l'évolution de l'état d'un ouvrage.

Les **diagraphies dans les trous de forages** sont utilisées pour résoudre des problèmes hydrogéologiques et de génie civil. Ce sont surtout de mesures de la circulation des fluides, de la géométrie du forage et des paramètres de la mécanique des roches qui sont effectuées le plus couramment. Les faibles venues d'eau sont mises en évidence par les anomalies de la conductivité électrique et/ou la température. Le mouvement vertical d'eau plus important peut être étudié par des flowmètres divers. En relation avec des essais de pompage, la répartition des venues d'eau dans un forage peut être déterminée. Les contrôles d'étanchéité (qualité des injections) des massifs rocheux peuvent être effectués par ces diagraphies.

La sonde acoustique (full wave sonic) peut déterminer les vitesses de propagation des ondes S et P le long du forage. Le diamètreur (caliper) met en évidence des zones fracturées et permet de corriger les autres diagraphies.

Remarques

En raison de l'utilisation d'appareils spéciaux, l'exécution des méthodes citées et l'interprétation des mesures sont l'affaire de spécialistes expérimentés.

Inspection par caméra

ROBOT SOUS-LACUSTRE MUNI D'UNE CAMERA

1. Dispositif de mesure

Des moyens subaquatiques peuvent être employés pour inspecter un parement amont (état des joints, repérage de fissures), la liaison béton-rocher, la vidange de fond ou la prise d'eau (état des grilles et des tabliers de vannes) ainsi que les conditions de sédimentation en maintenant un remplissage total ou partiel de la retenue. L'emploi d'un robot subaquatique téléguidé depuis la surface et relié à un câble permet grâce à des camé-

ras et des projecteurs d'effectuer cette reconnaissance indirecte. Le robot est un engin étanche propulsé par des moteurs. Les caméras peuvent être fixes ou avoir une possibilité de rotation. Une observation en temps réel, la prise de photos ou la réalisation d'un film vidéo permettent de juger l'état des parties inspectées et de visionner des dégâts.



Figure 4.02-1: Vue avant et arrière d'un robot sous lacustre

2. Appréciation

L'équipement est relativement peu encombrant et facilement transportable en tout endroit. Ce robot subaquatique est de surcroît maniable. Il peut atteindre plusieurs centaines de mètres en profondeur (300 – 400 m).

Une inspection par des moyens subaquatiques présente l'avantage de n'avoir pratiquement aucune répercussion sur l'exploitation.

Il faut souligner que pour des raisons de qualité de l'eau, le champ de vision peut être limité.

3. Dérangements possibles et erreurs de mesure

La qualité de l'image est fortement influencée par les conditions de visibilité (eau trouble).

Le positionnement de la caméra par rapport au barrage n'est pas aisé, si la caméra ne suit pas un cheminement précis (par exemple un joint vertical). Par contre, la profondeur est bien définie.

L'évaluation de la dimension des dégâts observés est difficile, si l'on ne dispose pas de repères (échelle) sur la prise de vue.

4. Exigences techniques

Il est utile d'effectuer des tests de visibilité avant d'engager une campagne d'inspection.

Il faut s'assurer de la localisation des points observés et un report sur plan de l'emplacement des observations est indispensable.

L'inspection doit être suivie par un spécialiste dans le domaine de la surveillance des barrages.

5. Contrôles du fonctionnement et entretien

Le matériel est mis à disposition par des maisons spécialisées qui assurent le contrôle et l'entretien de son matériel.

6. Redondance

Recours au service de plongeurs, qui implique toutefois une limitation de profondeur et de durée d'intervention.

Inspection au moyen d'une nacelle pour les parties hors de l'eau ou après abaissement total.

7. Remarques



Inspection par caméra

CAMERA DANS UN FORAGE

1. Dispositif de mesure

Une caméra est utilisée pour contrôler l'état d'un forage dans lequel se trouve un pendule inversé, des piézomètres ou un forage drainant en visualisant les fissures, les incrustations, les renflements, les corps étrangers. Il est aussi possible d'effectuer une reconnaissance du sous-sol dans un forage ouvert (type de roche, joints, ouverture des joints, stratification, etc.).



Figure 4.03-1: Caméra de 42 mm de diamètre

Combinée avec un module optique, il est possible d'avoir des informations relatives aux écoulements souterrains (direction et vitesse).

L'exécution de cette inspection indirecte de l'état se fait à l'aide d'une caméra, qui est conduite à la main par un moniteur. On utilise une caméra vidéo couleur munie d'un objectif orientable pour des prises de vue verticales et horizontales.

L'analyse de l'état et le visionnement des dégâts peuvent se faire par observation directe, la prise de photos ou d'un film vidéo.

L'adjonction d'informations complémentaires telles que désignation du forage, profondeur, explication et bande sonore, est aussi possible.

2. Appréciation

L'équipement complet requiert peu de place et est facilement transportable en tout endroit.

La caméra dans un forage est bien manœuvrable. Seules des caméras de 70 mm de diamètre peuvent être employées.

Une profondeur de 500 m peut être atteinte.

Il faut souligner que la visibilité peut être fortement influencée par la qualité des eaux.

3. Dérangements possibles et erreurs de mesure

La qualité des images dépend fortement des conditions de visibilité (turbidité de l'eau).

L'espace disponible dans le forage peut être réduite par les incrustations ou les renflements, de telle façon qu'il ne subsiste plus assez d'espace pour la caméra.

4. Exigences techniques

Avant de commencer une campagne d'inspection, il est recommandé d'examiner les conditions de visibilité et d'espace.

Les inspections de forage doivent être accompagnées par un spécialiste confirmé dans le domaine de la surveillance des barrages.

5. Contrôles du fonctionnement et entretien

L'équipement complet est fourni par une entreprise spécialisée qui en assure également l'entretien.

6. Redondance

Comparaison avec des carottes.

7. Remarques

Les mêmes caméras permettent aussi de contrôler des conduites de drainage.

Caractéristiques des bétons

SCLEROMETRE (MARTEAU DE SCHMIDT)

1. Dispositif de mesure

Le scléromètre (marteau de Schmidt) permet un contrôle non destructif de la qualité des bétons. Un boulon exerce une pression perpendiculairement à la surface du béton après avoir été frappé par un poids percuté par l'action d'un ressort. Après le coup, le poids rebondit et le retour (rebondissement) est mesuré sur une échelle. La résistance à la compression peut être déterminée au moyen de courbes de conversion.

2. Appréciation

Appareil très robuste qui donne la possibilité d'obtenir en peu de temps de nombreuses valeurs.

La précision des résultats est évaluée sur la base d'une analyse statistique. Il existe des appareils qui enregistrent et exploitent électroniquement les mesures.

Outre la résistance à la compression, les mesures donnent une indication relative à la régularité de la qualité du béton.

- 1 Percuteur
- 3 Boîtier
- 4 Indicateur avec tige
- 6 Bouton presseur
- 7 Tige
- 8 Disque de guidage
- 9 Capuchon
- 10 Bague en 2 parties
- 11 Couvercle
- 12 Ressort de compression
- 13 Cliquet
- 14 Marteau
- 15 Ressort de recul
- 16 Ressort de percussion
- 17 Manchon
- 18 Bague de feutre
- 19 Fenêtre en plexiglas avec échelle gravée
- 20 Ecrou
- 21 Contre-écrou
- 22 Bague
- 23 Ressort du loquet

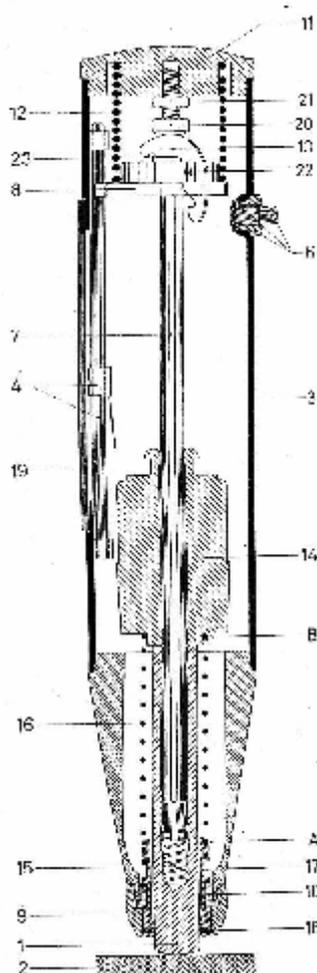


Figure 4.04-1: Coupe au travers d'un scléromètre



Figure 4.04-2: Exécution d'une mesure sclérométrique

3. Dérangements possibles et erreurs de mesure

L'instrument doit absolument être tenu verticalement par rapport à la surface d'essai ou il faut tenir compte de la direction de frappe lors de l'exploitation des mesures. Les surfaces des bétons anciens doivent être préalablement nettoyées (par meulage). De gros agrégats peuvent influencer la mesure. Une moyenne doit être calculée sur la base d'au moins 10 valeurs. Les valeurs extrêmes sont éliminées lors la détermination de la moyenne. Pour la résistance à la compression sur cube de moins de 25 MPa, la précision diminue fortement. Le rebondissement dépend aussi de la nature du matériau.

4. Exigences techniques

Il existe des modèles lourds qui sont utilisés pour les bétons et les bétons de masse. Les instruments légers sont plutôt destinés pour les briques, les pierres artificielles ou les crépis. Les courbes de conversion sont toujours nécessaires.

5. Contrôles du fonctionnement et entretien

Nettoyage périodique et huiler le boulon.
Le contrôle de l'instrument doit être effectué régulièrement sur une sorte d'enclume d'essai.
Les courbes de conversion peuvent être vérifiées sur la base d'éprouvettes dont on a déterminé la résistance en laboratoire.

6. Redondance

L'analyse statistique permet d'avoir une idée relative de la précision et de la dispersion. Contrôle sur échantillons (carottes) prélevés sur l'ouvrage en vue d'essais en laboratoire.

7. Remarques

Cet appareil permet aussi de mesurer la résistance de revêtement en pierre ou du rocher.

Caractéristiques des bétons

ESSAIS EN LABORATOIRE

1. Généralités

Ce qui différencie le béton de barrage des bétons de structure est la taille maximale du granulat associée au volume considérable à mettre en place. Ceci doit être pris en considération lors de l'élaboration d'un programme d'essais. Il faut rappeler que les essais de béton commencent déjà au stade de l'élaboration de l'avant-projet et se poursuivent pendant l'exécution. De même, pendant la période d'exploitation, il s'agit également de procéder à des essais de contrôle destinés à connaître l'évolution des caractéristiques des bétons, à lever une incertitude ou à rechercher une explication à un problème de comportement de l'ouvrage.

2. Type d'essais

- Essai de résistance à la compression
- Essai de traction par fendage ou par traction pure
- Mesure de la densité
- Mesure du module d'élasticité
- Mesure du coefficient de dilatation thermique
- Essai de résistance au gel
- Essai de perméabilité
- Analyses minéralogiques et pétrographiques sur lames minces
- Qualification des granulats relative à l'alcali-réaction
- Essai de comportement du béton à l'alcali-réaction
- Essai de fluage

3. Appréciation

La dimension des éprouvettes est un problème important pour les bétons de barrage du fait de la très grande taille des granulats. Les résultats d'essais sont très sensibles à ces dimensions.

Les effets d'échelle sont en général influencés par les conditions aux limites. On définit l'élément de volume représentatif comme celui dont les dimensions n'influent pas sur les résultats des essais. On admet que l'on obtient le volume représentatif pour des dimensions d'éprouvettes entre cinq et dix fois la dimension maximale des granulats.

En ce qui concerne les éprouvettes de laboratoire, une dispersion plus ou moins grande des résultats est constatée. Ceci signifie que les éprouvettes n'atteignent pas les dimensions de l'élément de volume représentatif. En règle générale, on doit se limiter à des éprouvettes dont les dimensions sont de l'ordre du double, voire du triple, de la taille maximale des granulats.

Ces essais de béton se font sur des carottes extraites de l'ouvrage par forage. Pour les essais de contrôle d'exécution il s'agit en général de forages

au diamètre si possible de 300 mm, afin d'extraire des carottes comparables aux éprouvettes de contrôle du béton des essais de suivi en cours de production. En ce qui concerne les essais d'expertise, les prélèvements sont souvent combinés à des forages liés à l'instrumentation de l'ouvrage. Le diamètre du forage est adapté aux circonstances et aux analyses demandées. Sur certains barrages des prismes et des cubes ont été extraits pour des essais de résistance en flexion, de résistance au gel et de perméabilité (les éprouvettes sont obtenues par découpage au marteau piqueur puis par sciage).

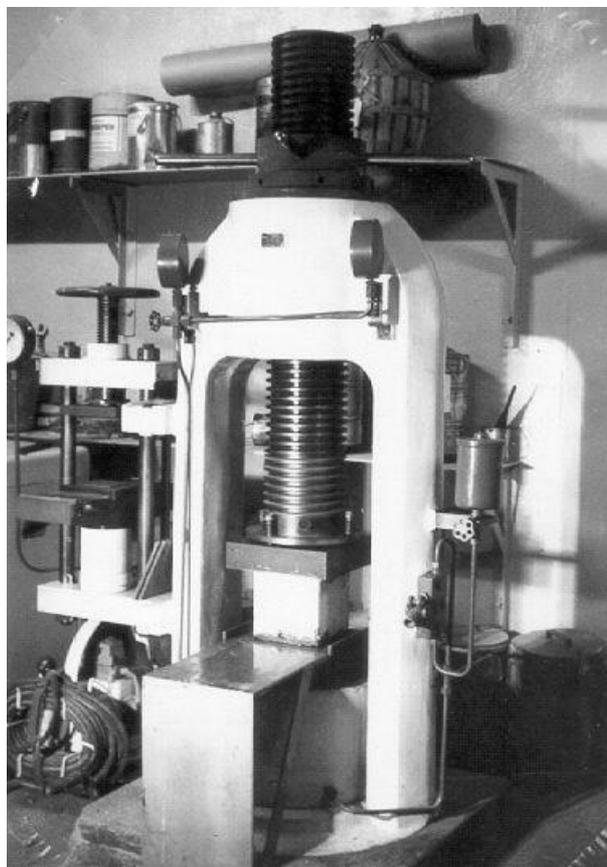


Figure 4.05-1: Essai de compression sur cube dans un laboratoire de chantier

Lors de l'établissement d'un programme d'essais, il faut tenir compte de la dispersion des résultats en prélevant un nombre suffisant d'éprouvettes.

Pour des ouvrages dont les déformations permanentes sont importantes et évolutives, des essais de fluage sont également indispensables. Il s'agit d'essais de longue durée qui mobilisent des moyens de laboratoire importants.

4. Interprétation des résultats

L'interprétation des essais est toujours délicate. Il ne faut pas perdre de vue qu'un essai n'a jamais de valeur absolue. Dans tous les cas, il ne représente qu'un aspect limité d'une réalité que l'ingénieur doit mettre en relation avec le contexte de l'ouvrage et l'ensemble des connaissances antérieures.

Les résultats d'essais sont sujets à dispersion. Ils varient d'une éprouvette à l'autre et doivent donc faire l'objet d'un traitement statistique.

L'interprétation des essais peut se faire par comparaison avec les résultats d'essais de même nature disponible sur le même type d'ouvrage.

Littérature

- Comité suisse des barrages. Le béton des barrages suisses: expériences et synthèse. "wasser, energie, luft – eau énergie air", 92. Jahrgang, 2000, Heft 7/8, pages 205-233.
- Comité suisse des barrages. Le béton des barrages suisses. Août 2001.



Contrôle des ancrages

MESURE DE LA FORCE D'ANCRAGE

1. Dispositif de mesure

Dans le cadre de la surveillance permanente et de l'observation à long terme des tirants d'ancrage monotoron ou à torons, la force d'ancrage en tête des tirants est déterminée au moyen d'une cellule de mesure de force. Il existe des systèmes hydrauliques et électriques. Des cellules de mesure sous forme de bague sont montées entre une plaque de répartition des forces et une plaque de support, cette dernière a pour but d'assurer une répartition uniforme de la charge. Pour les tirants d'ancrage à torons, les cellules de mesure sont habituellement placées directement entre la plaque d'ancrage et la tête du tirant, sans recourir à une plaque de répartition. Outre la cellule de mesure sous forme de bague, il existe aussi une cellule de mesure sous forme de fer à cheval, qui peut être facilement changée en tout temps; ce type est aussi utilisable pour les tirants d'ancrage à torons.

Pour les systèmes électriques, la cellule de mesure de force est constituée d'un cylindre en acier. Une déformation est mesurée sur la face extérieure au moyen d'une jauge de contrainte ou d'une corde vibrante. La mesure est transformée en un signal électrique de telle façon que la force puisse être lue sur un comparateur. Pour les systèmes hydrauliques, une chambre remplie d'un liquide est placée entre 2 disques qui permettent de connaître la pression intérieure.

2. Appréciation

Les systèmes de mesure des forces d'ancrage sont robustes et ont fait leurs preuves dans la pratique.

Les systèmes hydrauliques équipés d'un manomètre permettent une lecture directe de la force sur place. Les systèmes hydrauliques sont légèrement sensibles à la température. Pour la transmission des valeurs de mesure, la pression hydraulique doit être transformée en un signal électrique. Par ailleurs, la lecture d'une mesure hydraulique à distance est aussi possible.

Pour les systèmes électriques, la lecture de la mesure à distance est possible.

3. Dérangements possibles et erreurs de mesure

Les surfaces d'appui entre la cellule de mesure et la plaque de l'ancrage doivent être plates et perpendiculaires à l'axe des tirants d'ancrage. Les mesures faites à l'aide de systèmes électriques peuvent être faussées par une excentricité (les systèmes hydrauliques ne sont, quant à eux, pas sensibles à une excentricité des charges).

Une perturbation de l'appareil peut survenir suite à une défektivité d'étanchéité.

4. Exigences techniques

Une compensation de la température doit être prise en compte pour les appareils électriques dans une plage de température comprise entre -30°C et $+50^{\circ}\text{C}$.

La cellule de mesure de charge doit être étanche et de construction robuste.

La charge permanente doit être inférieure à la charge nominale de l'appareil de mesure.

Les câbles de mesure doivent être blindés (protection contre les surtensions).

5. Contrôles du fonctionnement et entretien

La force d'ancrage doit être périodiquement (intervalles étendus) vérifiée par un essai de mise en tension. Ceci n'est possible pour autant que le tirant d'ancrage soit équipé d'un filetage adéquat. Les appareils de mesure sous forme de bague ne peuvent pas être démontés, du moins pour les tirants d'ancrage à torons, et être testés en atelier sans devoir détendre le tirant qui pourrait disparaître dans le forage. Pour les tirants à monotoron, une prolongation de la barre est possible.

L'appareil de mesure doit être périodiquement testé en atelier.

Les manomètres des systèmes hydrauliques doivent être périodiquement contrôlés.

6. Redondance

Par la comparaison des forces de tirants d'ancrage de contrôle voisins.

7. Remarques

En plus de la mesure de la force d'ancrage, la mesure de la résistance électrique des câbles entre la tête de l'ancrage et la surface de l'ouvrage doit être prévue afin de contrôler la protection contre la corrosion. Cette mesure de résistance électrique peut se révéler défectiveuse en milieu humide.



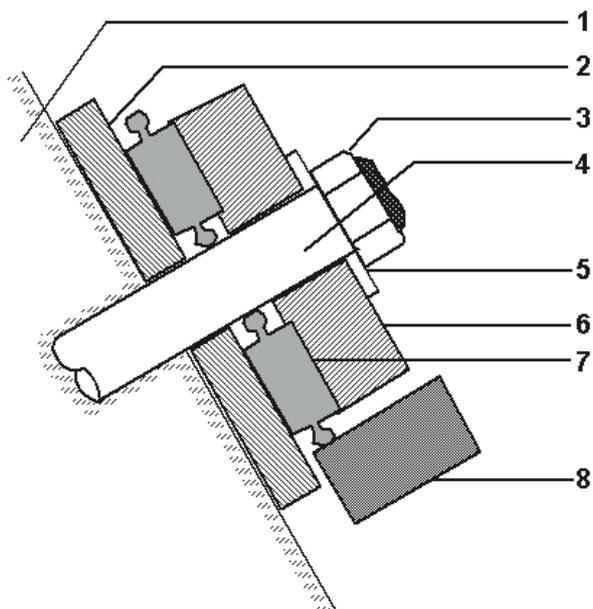


Figure 5.01-1 Cellule hydraulique de mesure de force, type Glötzl

- 1 Surface de l'ouvrage
- 2 Plaque de support (plaque d'ancrage)
- 3 Ecrou de précontrainte
- 4 Ancrage
- 5 Support de l'écrou de précontrainte
- 6 Plaque de répartition
- 7 Cellule de mesure de force
- 8 Manomètre

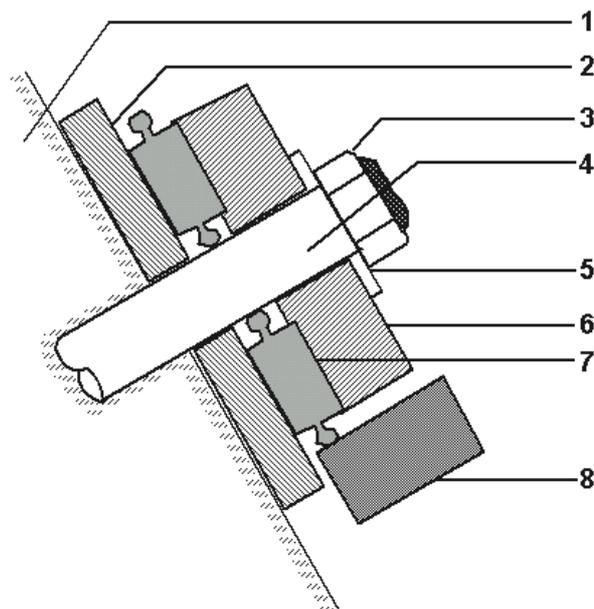


Figure 5.01-2 Mesure en tête d'ancrage AVT type M

- 9 Cellule de mesure
- 10 Plaque d'ancrage
- 11 Câble
- 12 Cellule de mesure de force (coupes)
- 13 Câblage de l'appareil de mesure