

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université
Aboubekr Belkaïd
Tlemcen



جامعة
أبو بكر بلقايد

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

Risk Assessment and Management Laboratory – RISAM

Polycopié destiné aux étudiants en Masters I et II
Filières: Hydraulique et Génie Civil

Auscultation et surveillance des barrages



SMAIL Nadia

ROUISSAT Bouchrit

Avril 2022

Après la première mise en eau du barrage, l'ouvrage n'est pas inerte. Il vit, il travaille et se fatigue comme toute construction. De sa santé, dépend la sécurité des biens et des personnes dans la vallée.

AVANT- PROPOS

Dans le domaine du génie civil, les barrages ont toujours été considérés comme des ouvrages d'art spécifiques. Les raisons se trouvant, d'une part dans le caractère unique de chaque barrage et à la complexité des comportements et des mécanismes mis en jeu.

Le comportement d'un aménagement de barrages n'est pas uniquement lié à la réussite de ses études et de sa réalisation, mais également à l'efficacité de son exploitation et auscultation.

Ces ouvrages présentent des enjeux importants, sur le plan de la sécurité publique, car leur rupture aurait des conséquences catastrophiques, mais aussi sur le plan de l'économie des installations, en raison de l'importance des coûts des travaux de maintien en état.

La surveillance des barrages vise essentiellement à comparer le comportement de l'ouvrage par rapport aux prévisions du projet, que ce soit pour vérifier certaines hypothèses de calcul, pour valider les résultats de ces calculs ou pour vérifier la pertinence de tel ou tel choix technique. La surveillance doit permettre de garantir la détection rapide et précise de tout comportement anormal du barrage et de ses fondations, de tous dégâts particuliers et de conditions exceptionnelles dans les environs. De cette façon, il sera alors possible, en cas de besoin, de prendre à temps toute mesure utile pour parer à un danger éventuel.

Le contrôle de la sécurité consiste à détecter et à maîtriser les mécanismes de dégradation pouvant entraîner la rupture de l'ouvrage si aucune action n'est entreprise (maintenance, confortement, vidange d'urgenceetc).

Le présent polycopié intitulé, "Auscultation et surveillance des barrages" vient compléter les deux polycopiés édités en 2017 et 2021 ayant pour intitulés respectifs tome 1 : éléments fondamentaux pour la conception des barrages en terre et tome 2 : éléments fondamentaux pour la conception des barrages en béton. Ces deux documents ont traité l'ensemble des aspects liés aux critères conceptuels pratiques des barrages en terre et en béton, aux critères de sécurité relatifs aux conditions de leur stabilité ainsi qu'aux conditions de leur comportement en relation avec les différentes sollicitations.

La sécurité des barrages n'est pas uniquement liée à la réussite de leurs études et réalisations mais également à la fiabilité de leur surveillance et auscultation. Ce sont ces aspects qui ont motivés l'élaboration du présent polycopié. Il s'intéresse, d'une manière structurée et cohérente, aux aspects suivants :

- Mécanismes de vieillissement des barrages qui abordent ceux relatifs aux fondations, au corps des barrages en remblai et enfin au corps des barrages en béton.
- La deuxième partie du polycopié s'intéresse aux principes généraux de la surveillance des barrages en détaillant successivement les paramètres et aspects liés aux pathologies rencontrées au niveau des barrages, au concept global de l'organisation de la surveillance des barrages décliné en trois volets à savoir l'inspection visuelle, l'auscultation des barrages ainsi que les essais périodiques
- La troisième et dernière partie du document traite profondément l'auscultation des barrages et mesure des paramètres de comportement. Elle englobe les mesures des conditions et des charges extérieures, les paramètres significatifs et évolutifs des barrages en remblai, en béton et leurs

fondations. Une importante section a été réservée volontairement aux différentes mesures en particulier celles relatives aux paramètres géométriques, paramètres mécaniques, paramètres hydrauliques et aux contraintes. La surveillance des environs proches et éloignées des barrages a été également traitée dans cette partie du document.

Le recours aux mesures automatiques, en des points rigoureusement choisis, ainsi que la télétransmission des résultats permettent une surveillance quasi permanente. Une section a traité de l'automatisation et transmission des mesures d'auscultation.

Le document englobe en dernière section une partie relative à l'analyse et interprétation des mesures d'auscultation qui permettent l'appréciation du comportement général du barrage, le jugement sur son état et la programmation des actions de réhabilitation éventuelle.

Table des matières

GLOSSAIRE – ABREVIATIONS

INTRODUCTION

CHAPITRE I

MECANISMES DE VIEILLISSEMENT DES BARRAGES

1. Introduction.....	16
2. Mécanismes de vieillissement des fondations.....	16
2.1. Manifestations	16
2.2. Dégradation de la fondation	18
2.3. Dissolution et érosion.....	18
2.4. Dégradation des rideaux d'injection et des réseaux de drainage.....	19
2.4.1. Importance des rideaux d'injection et des rideaux de drainage.....	19
2.4.2. Vieillissement des rideaux d'injection	21
2.4.3. Vieillissement des réseaux de drainage.....	21
2.4.4. Signes de la dégradation des rideaux d'injection et des réseaux de drainage	21
2.5. Déformation de la fondation.....	21
2.6. Perte de résistance, augmentation des sous-pressions et modification de contraintes...23	
2.6.1. Perte de résistance	23
2.6.2. Augmentation des sous-pressions	23
2.6.3. Modification de l'état de contraintes.....	24
2.7. Erosion interne des fondations	24
2.8. Instabilité mécanique en fondation	27
3. Mécanismes de vieillissement du corps des barrages en remblai	27
3.1. Déformation du remblai	27
3.2. Perte de résistance.....	31
3.3. Augmentation des pressions interstitielles	32
3.3.1. Pendant la construction	32
3.3.2. Pendant L'exploitation	33
3.4. Erosion interne.....	34
3.4.1. Manifestations et mécanismes	34
3.4.2. Recommandations.....	36
3.5. Glissement du remblai	37
3.5.1. Conséquences directes du glissement	38
3.5.2. Conséquences indirectes du glissement	38
3.6. La submersion des barrages	39
3.7. Erosion externe	40

3.8. Dégradation des masques amont	41
3.8.1. Digue en enrochement avec masque amont.....	41
3.8.2. Digue à masque sur remblai semi-perméable.....	41
3.8.3. Dégradations des masques amont	42
4. Mécanismes de vieillissement du corps des barrages en béton.....	42
4.1. Alkali-réaction	42
4.2. Retrait, fluage	44
4.3. Dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu	44
4.4. Faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées.....	45
4.5. Faible résistance au gel dégel	45
4.6. Vieillessement des revêtements amont.....	46

CHAPITRE II

PRINCIPES GENERAUX DE LA SURVEILLANCE DES BARRAGES

1. Introduction.....	48
2. Les objectifs de la surveillance	50
3. Pathologies rencontrées au niveau des barrages	51
3.1. Barrages en remblais.....	52
3.2. Barrages en béton ou en maçonnerie	52
4. Concept global de l'organisation de la surveillance des barrages.....	57
4.1. Inspection visuelle	58
4.2. Auscultation des barrages.....	60
4.2.1. Introduction.....	60
4.2.2. Conception générale du dispositif d'auscultation	61
4.2.3. Raisons d'être d'un dispositif d'auscultation	63
4.2.4. Choix des profils d'auscultation	64
4.2.5. Choix du dispositif d'auscultation	65
4.2.6. Instruments et moyens de mesure pour les barrages.....	68
4.3. Essais périodiques.....	70
5. Programme et fréquences des mesures	72

CHAPITRE III

AUSCULTATION DES BARRAGES ET MESURE DES PARAMETRES DE COMPORTEMENT

1. Mesure des conditions et des charges extérieures.....	77
--	----

1.1. Mesure de la cote du plan d'eau	79
1.2. Mesure de la température	80
1.3. Mesure des Précipitations.....	81
1.4. Niveau des sédiments.....	82
1.5. Sismologie	83
2.. Paramètres significatifs et évolutifs des barrages.....	83
2.1. Tassements et déformations	84
2.2. Pressions interstitielles et niveaux piézométriques.....	85
2.3. Sous pressions.....	86
2.4. Débit de fuites et de drainage	87
3. Mesure des paramètres géométriques.....	88
3.1. Mesure du déplacement absolu(en surface)	90
3.1.1. Nivellement.....	92
3.1.2. Mesures d'alignement	93
3.1.3. Planimétrie	93
3.1.4. Le système de positionnement GPS.....	94
3.2. Mesure des déplacements internes (en profondeur)	95
3.2.1. Tassomètres	95
3.2.2. Pendules.....	97
3.2.3. Inclinomètres	100
3.2.4. Extensomètres.....	102
3.3. Mesure des déplacements relatifs(locaux)	104
3.3.1. Fissuromètres	104
3.3.2. Vinchons	105
4. Mesure des paramètres hydrauliques.....	106
4.1. Mesure des pressions interstitielles.....	107
4.1.1. Piézomètres.....	108
4.1.2. Cellules de pression interstitielle	111
4.2. Mesure des débits de fuite et de drainage	118
4.2.1. Les drains.....	118
4.2.2. Analyse qualitative de quelques phénomènes irréversibles simples dans un barrage	122
5. Mesure des contraintes - Cellules de pression totale.....	123
5.1. Capteur de pression totale pneumatique	124
5.2. Capteur de pression totale à corde vibrante	124
6. Propriétés physiques et chimiques des eaux	125
6.1. Mesure de la turbidité des eaux	125

6.2. Analyse chimique des eaux	126
7. Surveillance des environs proches et éloignées des barrages	126
7.1. Affouillement au pied aval du barrage.....	127
7.2. Résurgences a l’aval du barrage	128
7.3. Relevée de la nappe phréatique	128
7.4. Sédiments dans la retenue	128
7.5. Chutes de blocs	129
7.6. Zones de terrains instables	129
7.7. Avalanches	130
7.8. Glaciers	130
7.9. Bassin versant	131
8. Automatisation et transmission des mesures	131
9. Analyse et interprétation des mesures	132

Références bibliographiques

Liste des figures

CHAPITRE I

MECANISMES DE VIEILLISSEMENT DES BARRAGES

Figure I.1. L'instabilité par glissement du parement aval

Figure I.2. Evolution type d'une brèche par surverse. Vue en coupe amont/aval

Figure I.3. Evolution type d'une brèche par surverse. Vue en coupe rive/rive

CHAPITRE II

PRINCIPES GENERAUX DE LA SURVEILLANCE DES BARRAGES

Figure II.1. Apparition des zones humides sur le talus aval d'un barrage en terre.

Figure II.2. Apparition des zones humides sur le parement aval d'un barrage en maçonnerie.

Figure II.3. Apparition des sources à l'aval du barrage.

Figure II.4. Glissement du talus amont d'un barrage enterre.

Figure II.5. Présence de végétation sur le talus aval d'un barrage en terre.

Figure II.6. Erosion régressive sur un barrage enterre.

Figure II.7. Signes d'érosion régressive autour de l'ouvrage de prise.

Figure II.8. Conséquence d'une érosion régressive sur un barrage en terre, étape 1

Figure II.9. Conséquence d'une érosion régressive sur un barrage en terre, étape 2.

Figure II.10. Conséquence d'une érosion régressive sur un barrage en terre, étape 3

Figure II.11. Fissures au niveau de la crête.

Figure II.12. Des fissures en mosaïque

Figure II.13. Fissures au niveau de la crête.

Figure II.14. Déformation du masque amont d'un barrage en terre.

Figure II.15. Dégradation du masque amont

Figure II.16. Déchirure du masque amont.

Figure II.17. Erosion par les matériaux charriés et disparition de l'enrobage au niveau de l'évacuateur des crues.

Figure II.18. Dépôt de calcite au niveau du parement du barrage.

Figure II.19. Lixiviation du béton au niveau du parement du barrage.

Figure II.20. Concept global de l'organisation de la surveillance et de l'entretien des barrages

Figure II.21. Présence des fuites au niveau de la galerie.

Figure II.22. Inspection visuelle du barrage.

Figure II.23. Profils d'auscultation au niveau du Barrage Sidi Abdelli, Wilaya de Tlemcen, Algérie

Figure II.24. Profils d'auscultations au niveau du barrage boughrara, Wilaya de Tlemcen, Algérie

Figure II.25. Equipements hydromécaniques concernés par les essais périodiques, barrage Sidi Abdelli, wilaya de Tlemcen

CHAPITRE III

AUSCULTATION DES BARRAGES ET MESURE DES PARAMETRES DE COMPORTEMENT

- Figure III.1.** Sollicitations agissant sur le barrage
- Figure III.2.** Echelle limnimétrique installé au niveau du corps du Barrage Beni Bahdel, Wilaya de Tlemcen, Algérie
- Figure III.3.** Tassement au niveau de la crête du barrage.
- Figure III.4.** Effondrement au niveau du talus aval du barrage.
- Figure III.5.** Influence des infiltrations sur les barrages en terre
- Figure III.6.** Sous pressions à la base du barrage.
- Figure III.7.** Mesure de déformations verticales et horizontales à partir de points de mesures situées sur le parement
- Figure III.8.** Borne sur talus aval servant aux mesures des déplacements Barrage Sidi Abdelli, wilaya de Tlemcen.
- Figure III.9.** Visée de bornes d'observations pour mesure des déplacements.
- Figure III.10.** Points de contrôle géodésique par piliers au sommet et en aval du barrage
- Figure III.11.** Exemple d'un réseau géodésique
- Figure III.12.** Tassement du barrage Sidi Abdelli, wilaya de Tlemcen, Algérie
- Figure III.13.** Configuration des satellites
- Figure III.14.** Détermination de la position au moyen de l'intersection de sphères dans l'espace
- Figure III.15.** Tassomètre installé au niveau du noyau du barrage Boughrara, Wilaya de Tlemcen, Algérie
- Figure III.16.** Mesure de déplacements par pendule
- Figure III.17.** Mesure de déplacements par pendule direct
- Figure III.18.** Schéma d'installation d'un pendule
- Figure III.19.** Installation d'un pendule avec table de lecture dans une galerie
- Figure III.20.** Mesure de déplacements horizontaux par paliers
- Figure III.21.** Pendule, table de lecture des déplacements horizontaux.
- Figure III.22.** Tube inclinométrique avec rainures de guidage
- Figure III.23.** Appareil de lectures brutes inclinométriques
- Figure III.24.** Extensomètre à corde vibrante
- Figure III.25.** Installation au niveau d'un remblai de l'extensomètre à corde vibrante
- Figure III.26.** Saisi des données de mesures
- Figure III.27.** Mesure de déplacements relatifs par fissuromètre
- Figure III.28.** Procédé de mesure des déplacements relatifs par Vinchon
- Figure III.29.** Installation des piézomètres au niveau d'un profil du barrage Sidi Abdelli, wilaya de Tlemcen, Algérie
- Figure III.30.** Piézomètre et sonde pour la mesure du niveau piézométrique
- Figure III.31.** Installation des cellules de pressions interstitielles au niveau du profil du barrage Sidi Abdelli, wilaya de Tlemcen, Algérie
- Figure III.32.** Composantes d'une cellule pneumatique de mesure de pression interstitielle
- Figure III.33.** Mesure de la pression interstitielle au niveau d'une cellule pneumatique
- Figure III.34.** Composantes d'une cellule hydraulique pour la mesure de pression interstitielle
- Figure III.35.** Cellule de pression interstitielle à corde vibrante (Telémac)
- Figure III.36.** Mesure de pression interstitielle par capteur électrique dans la galerie de visite du barrage Sidi Abdelli, Wilaya de Tlemcen
- Figure III.37.** Dispositifs de mesure des débits de fuite
- Figure III.38.** Drainage de la source N° 01, rive gauche, barrage Sikkak, wilya Tlemcen
- Figure III.39.** Mesure de débit par déversoir
- Figure III.40.** Mesure de débit de fuites et de drainage.
- Figure III.41.** Installation d'une cellule de mesure de pression totale au niveau des remblais d'un barrage

Liste des tableaux

CHAPITRE II

PRINCIPES GENERAUX DE LA SURVEILLANCE DES BARRAGES

Tableau II.2. Instruments et moyens de mesure pour les barrages en remblai

Tableau II.1. Instruments et moyens de mesure pour les barrages en béton

CHAPITRE III

AUSCULTATION DES BARRAGES ET MESURE DES PARAMETRES DE COMPORTEMENT

Tableau III.1. Instruments de mesures des charges et des conditions extérieures

Tableau III.2. Paramètres significatifs pour le suivi d'un ouvrage de retenue et de ses fondations

GLOSSAIRE – ABREVIATIONS

Cemagref : Unité de Recherche Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie.

CFBR : Comité Français des Barrages et Réservoirs.

CTPB : Le Comité Technique Permanent des Barrages.

CSB : Le Comité Suisse des Barrages.

CIGB : La Commission Internationale des Grands Barrages.

CSB : Comité Suisse des Barrages

Dégradation : Altération de l'aptitude d'un système à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques

Défaillance : Altération ou cessation de l'aptitude d'un système à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.

Détérioration (des barrages) : Tout comportement défectueux du point de vue de la sécurité et des performances, y compris les accidents et les ruptures.

Diagnostic : Identification de la cause probable de la (ou des) défaillance (s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

DISE : Délégation interservices de l'eau

EDF : Electricité de France.

Expert : Personne disposant d'un savoir et d'un savoir- faire.

Expertise : Ensemble d'activités ayant pour objet de fournir à un client, en réponse à la question posée, une interprétation, un avis ou une recommandations aussi objectivement fondés que possible, élaborés à partir des connaissances disponibles et de démonstrations, accompagnés d'un jugement professionnel

GTPB : Groupe de travail permanent pour les barrages

ICOLD : International Committee on Large dams

Maintenance : Toutes les activités destinées à maintenir ou rétablir un système dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management

MEDD : Ministère de l'écologie et du développement durable,

MWR : Ministry of Water Ressources

Niveau (ou cote) des plus hautes eaux : Cote maximale à laquelle peut arriver le niveau de l'eau dans la retenue au cas ou se produirait le plus important phénomène de crue prévu, à l'exclusion de la surélévation due aux vagues.

Niveau (ou cote) normal de retenue : Cote du niveau de l'eau dans la retenue à laquelle commence le déversement dans l'évacuateur de crues

OFEG : Office fédérale des eaux et de la géologie suisse

P.N.U.D : Programme des nations unies pour le développement

Revanche : Dénivelée entre le niveau de la crête et le niveau des plus hautes eaux.

Pathologie : Science qui a pour objet l'étude des maladies, des effets qu'elles provoquent

Performance d'un barrage : Jugement, à un instant donné, de son aptitude à remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu.

Retenue : Lac ou bassin artificiel dans lequel une certaine quantité d'eau est accumulée

Rupture (d'un barrage) : Rupture ou mouvement d'une partie du barrage ou de sa fondation, tel que l'ouvrage ne puisse plus retenir l'eau. En général, le résultat sera une lâchure d'un volume d'eau important entraînant des risques pour les personnes ou les biens à l'aval.

Sécurité : Aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques

INTRODUCTION

Il n'existe pas de projet de barrage type ou modèle, chaque cas doit être considéré comme un projet singulier et unique mettant en évidence des matériaux plus ou moins caractérisés avec précision, des fondations qui ne peuvent être reconnues que partiellement, des conditions géologiques, géotechniques, climatiques et hydrologiques particulières et trop variables d'un site à un autre.

On définit un projet préliminaire en fonction des données du site et de l'expérience et ce projet, en fonction de l'avancement des études, se verra raffiné, ajusté et adapté en relation avec les concepts techniques et économiques.

Quel que soit le type de barrage et qu'il soit en projet, en construction ou en exploitation, un problème permanent est posé : celui de sa sécurité. Ce thème est sous-jacent à toutes les démarches, plus aujourd'hui que jamais. Il stimule les développements les plus spéculatifs, il passionne les staticiens, il motive les règlements et les cahiers des charges.

Après la mise en eau, un barrage peut enregistrer un comportement ou une déviation non prévu par la conception initiale. Les évolutions dans le comportement des barrages sont en général lentes. Certaines peuvent s'avérer potentiellement rapides, notamment lors de la phase cruciale de première mise en eau.

Pendant son exploitation, et sous l'effet des différentes sollicitations et d'incertitudes dans le projet initial, le comportement des barrages nécessite une surveillance et un suivi permanent. Le rythme de la surveillance est adapté à la nature et à l'état du barrage, mais doit impérativement être renforcée en cas d'anomalies ou de désordres constatés sur l'ouvrage.

La surveillance des barrages vise essentiellement à comparer le comportement de l'ouvrage par rapport à un référentiel et par rapport aux prévisions du projet.

La surveillance des barrages vise principalement à suivre les évolutions du comportement du barrage et permet de décider de la nature et de l'urgence des interventions de maintenance ou de réparation. Elle doit permettre de comparer le comportement de l'ouvrage par rapport aux prévisions du projet, que ce soit pour vérifier certaines hypothèses de calcul, pour valider les résultats de ces calculs ou pour vérifier la pertinence de tel ou tel choix technique. La surveillance doit permettre de garantir la détection rapide et précise de tout comportement anormal du barrage et de ses fondations, de tous dégâts particuliers et de conditions exceptionnelles dans les environs. De cette façon, il sera alors possible, en cas de besoin, de prendre à temps toute mesure utile pour parer à un danger éventuel.

Ces multiples considérations sur la spécificité de ces investigations sécuritaires ont constitué la motivation principale de l'élaboration du présent document. Ce document s'adresse principalement aux acteurs qui abordent des aspects liés à la surveillance et à l'auscultation des barrages. Il cible, particulièrement, l'ensemble des ingénieurs et praticiens en charge des activités liées aux outils et dispositifs de surveillance des barrages.

Sur le plan de la structure, le document est organisé en trois parties qui traitent, chacune, d'une segmentation cohérente et chronologique en relation avec la démarche de la surveillance élaborée dans le domaine professionnel.

- Mécanismes de vieillissement des barrages qui abordent ceux relatifs aux fondations, au corps des barrages en remblai et enfin au corps des barrages en béton.

- Principes généraux de la surveillance des barrages englobant successivement les paramètres et aspects liés aux pathologies rencontrées au niveau des barrages et au concept global de l'organisation de la surveillance des barrages.
- La troisième et dernière partie du document traite profondément de l'auscultation des barrages et mesure des paramètres de comportement, l'interprétation des mesures d'auscultation afin de porter un jugement définitif sur sa sécurité tant sur le plan mécanique que sur le plan hydraulique.

CHAPITRE I

MECANISMES DE VIEILLISSEMENT DES BARRAGES

1. Introduction

Le terme vieillissement désigne toute dégradation du remblai ou des ouvrages annexes en fonction du climat, des conditions d'exploitation, d'événements particuliers ou d'un défaut introduit dès le stade de la conception, de la construction ou l'exploitation et qui tend à diminuer l'aptitude de l'ouvrage à bien remplir sa fonction ou sa sécurité [1].

En effet, les processus de vieillissement peuvent à la longue altérer les fonctions essentielles que sont la stabilité et l'étanchéité, mais également influencer sur les conditions d'exploitation. Les causes possibles de ce vieillissement sont multiples, physiques, chimiques ou biologiques. Il importe d'identifier au plus tôt ces processus de vieillissement et de diagnostiquer leur niveau de gravité et de nocivité [2].

Le mécanisme de vieillissement est assimilable à un ensemble de processus dynamiques tels que le colmatage, l'érosion interne, le glissement qui sont plus ou moins dépendants et agissent sur la performance et la sécurité des barrages.

Un expert qui a étudié de manière approfondie de nombreux cas, est capable d'analyser un ensemble de données provenant de modèles mécaniques, données d'auscultation, observations visuelles, données de conception ou de réalisation, de comprendre le comportement d'un nouvel ouvrage et d'établir un diagnostic grâce à ses connaissances heuristiques [3].

Pour les barrages poids et les barrages en remblai, nous distinguons les mécanismes s'opérant dans le corps du barrage et au niveau de la fondation.

2. Mécanismes de vieillissement des fondations

2.1. Manifestations

Tout d'abord, il faut souligner que les fondations constituent un élément essentiel, car elles servent d'assises aux ouvrages. Elles doivent, d'une part, être capables de reprendre les forces transmises par le barrage et d'autre part, servir de barrière à l'eau sur les flancs et en profondeur [4].

Toutes les charges appliquées à un barrage, y compris le poids propre de celui-ci sont transmises à la fondation. Le mécanisme de ce transfert, de même que la répartition des efforts, varient selon la forme et la raideur du barrage ainsi que selon, la résistance mécanique et la déformabilité des matériaux de fondation. Celles-ci peuvent être influencées par la présence des écoulements souterrains provenant de la retenue, ou par l'introduction de phénomènes dynamiques liés aux séismes [5].

Les caractéristiques des fondations dépendent des qualités physico- mécaniques d'appui, de la stratigraphie du terrain, de la présence éventuelle de fractures, d'inclusion d'argile entre les couches de la roche.

La sécurité de l'ouvrage est essentiellement fonction des bonnes caractéristiques des fondations (la plupart des accidents graves sont dus à une défaillance des fondations). De plus, une bonne connaissance préalable de la nature des terrains de fondation aura des effets positifs sur l'économie du projet puisqu'il sera possible de réduire les terrassements et les imprévus qui sont toujours à l'origine de retards, de complication, de surcharges économiques [6].

La fracturation a plus d'importance. Les fissures, les joints de stratification ou de schistosité, les zones broyées accompagnant les failles, peuvent en effet former des surfaces de glissement préférentielles suivant leur position dans les appuis et en fondation, notamment s'ils sont garnis de matériaux argileux provenant de l'altération de la roche [7].

C'est une vérité de dire qu'un barrage ne peut être plus résistant que sa fondation. Pour cette raison, l'utilisation de critères de projet et de méthodes de calcul très élaborés et très détaillés pour analyser le comportement du barrage proprement dit n'est justifiée que dans le cas où la fondation est introduite dans les calculs comme une partie intégrante de la structure ou comme une extension de l'ouvrage. Ainsi il convient de reproduire la fondation avec le même niveau d'élaboration ou de détail que le barrage, et les critères adoptés doivent traduire les incertitudes dans la connaissance des conditions réelles [5].

2.2. Dégradation de la fondation

Le mécanisme de dégradation de la fondation (fondation meuble) résulte de la modification des caractéristiques des matériaux meubles, telles que la diminution des paramètres de résistance ou l'augmentation de la perméabilité. Il est susceptible d'entraîner, d'une part la perte de résistance au cisaillement de la fondation et d'autre part des processus d'érosion interne de la fondation.

La dégradation des matériaux peut résulter de différents processus physiques ou chimiques : hydratation, dispersion, gonflement, dissolution qui sont tous liés à l'infiltration d'eau dans la fondation [8].

2.3. Dissolution et érosion

Le mécanisme de dissolution et érosion des fondations d'un barrage met en jeu, à l'origine, des réactions chimiques entre les composants de la fondation et les eaux d'infiltration. Ces attaques chimiques se traduisent par la dissolution de la masse rocheuse elle-même, des matériaux de remplissage des discontinuités et des joints ou des rideaux d'injection et des coulis de traitement de sol. Ensuite, la circulation d'eau au sein de la fondation conduit au transport des particules dissoutes qui peut provoquer l'érosion des matériaux et leur entraînement vers l'aval [8].

La réaction de dissolution est principalement influencée par les caractéristiques chimiques des eaux d'infiltration provenant de la retenue. A ce titre, des eaux pures ou très faiblement minéralisées, telles qu'on les rencontre dans les retenues en zone de montagne, sont particulièrement agressives. Egalement, les caractéristiques de la fondation (type roche, qualité des coulis d'injection, etc.) déterminent sa capacité à résister aux réactions chimiques produites par les eaux d'infiltration.

La dissolution et l'érosion des matériaux entraînent une diminution de l'étanchéité de la fondation (c'est-à-dire augmentation de la perméabilité), et par conséquent, une augmentation des infiltrations et des pressions interstitielles. Par ailleurs, l'altération et la perte des matériaux par dissolution et érosion diminuent la résistance mécanique des fondations, pouvant conduire à leur déformation, puis celle du barrage.

Le processus de dissolution peut être détecté et suivi par l'analyse de l'évolution de la teneur en sels dissous dans les eaux de fuite et par la comparaison avec les concentrations naturelles des eaux de la retenue. La mise en place de dispositif de décantation à l'exutoire des réseaux de drainage permet de détecter la présence de particules solides entraînées et de rendre compte du processus d'érosion. Enfin, le mécanisme de dissolution et érosion des fondations se manifeste par une augmentation des débits de fuites et de la piézométrie [8].

Les karsts, vides ou remplis de matériaux meubles, constituent des défis particuliers qu'il faut savoir pressentir et détecter à temps. Les matériaux solubles aussi (gypse) [9].

2.4. Dégradation des rideaux d'injection et des réseaux de drainage

2.4.1. Importance des rideaux d'injection et des rideaux de drainage

Les infiltrations dans le sol de fondation peuvent provoquer des fuites importantes mais aussi des dégradations par entraînement des matériaux (phénomène de renard). Le plus souvent, on dispose un écran d'étanchéité (injections, palplanches, paroi moulée...) en zone amont ou dans le prolongement de la zone d'étanchéité (barrage en enrochement ou à noyau). En arrière de cet écran, on place une zone de drainage permettant d'évacuer les surpressions et les infiltrations éventuelles [10].

L'injection des milieux granulaires est une technique de traitement des sols utilisée dans le domaine du génie civil pour améliorer les caractéristiques mécaniques en vue de l'implantation d'ouvrages de génie civil (barrages, tunnels, ouvrages d'art, etc.) [11].

Le principe des injections d'imperméabilisation est de diminuer la percolation de l'eau à travers la fondation du barrage, réduisant les pertes par infiltration et diminuant les risques d'érosion interne de la fondation [12].

Les Injections ont pour but d'étancher ou de consolider des corps solides, poreux et perméables, tels que des roches fissurées, sables et graviers, maçonnerie défectueuses etc [13].

L'effet principal de l'injection est un gain de cohésion sans modification significative de l'angle de frottement. On observe que la cohésion est proportionnelle à la fraction volumique de ciment réalisée dans le matériau injecté.

Le procédé consiste à faire pénétrer, à partir d'un forage, un coulis de ciment sous pression dans l'espace poreux du milieu granulaire à traiter. Le durcissement de ce dernier suite à sa prise s'accompagne d'une augmentation de la raideur et de la résistance [11].

On remplit les vides avec un produit liquide qui se solidifie plus ou moins avec le temps. On recherche une solidification plus poussée pour la consolidation que pour l'étanchement. Le liquide, ou coulis, est envoyé sous pression dans des forages qui traversent les vides à injecter [13].

Le voile est constitué de multiples forages situés dans un même plan. Ces forages ne sont pas nécessairement parallèles afin d'ajuster leur orientation en fonction de la présence d'une galerie ou pour recouper au mieux certains plans de faiblesse à injecter. On peut aussi concevoir des voiles multilinéaires.

La profondeur du voile est commandée par la nature, l'épaisseur et la perméabilité des terrains sous le barrage. Le voile descend jusqu'au très bon rocher si celui-ci est à une profondeur raisonnable.

On procède habituellement à des forages et injections en plusieurs phases avec des forages primaires entre lesquels sont réalisés des forages secondaires et, si nécessaires tertiaires avec des forages de contrôle.

Les produits d'injection sont identiques à ceux qui sont utilisés en traitement de surface. Il s'agit de coulis de ciment stabilisés, de gels de silicate, de résines.... [14].

La direction, l'inclinaison et le développement des forages d'injection et de drainage sont en partie conditionnés par les impératifs de chantier, mais également par la nécessité de recouper le maximum de fissures.

L'implantation de l'écran d'étanchéité dépend très étroitement du type de barrage. Naturellement, la mise en place d'un organe d'étanchéité va de pair avec une réflexion concernant le drainage aval. Inversement, on peut aussi compléter l'étanchéité en fondation en réalisant un tapis étanche en fond de retenue à l'amont immédiat du barrage qui a pour but de prolonger les chemins de percolation. Il faut alors étancher le joint entre le tapis et le barrage [15].

Les forages réalisés pour injection du coulis ont pour but essentiel d'intercepter les fissures existantes dans la fondation et de recouper toutes les discontinuités tant dans les réseaux d'imperméabilisation que dans la consolidation et de façon à pouvoir colmater toutes les voies d'eau avec du coulis [16].

2.4.2. Vieillissement des rideaux d'injection

Le vieillissement des rideaux d'injections résulte le plus souvent d'un défaut de conception, en particulier d'une mauvaise adéquation entre les matériaux injectés et l'agressivité des eaux, cela conduit alors à la dissolution du coulis d'injection par réaction chimique. Pour limiter ce processus, on améliore la résistance des coulis de ciment par des additifs minéraux appropriés au contexte tels que la bentonite, les cendres volantes, les pouzzolanes, etc. Il est parfois nécessaire de recourir à des résines acryliques ou de silicates. La dégradation des rideaux d'injections peut être également due à une réalisation inadaptée : pression d'injection, volume injecté, densité des injections, profondeur...etc. Cela conduit alors à des percolations à travers la zone de la fondation traitée (entraînant alors des mécanismes de dissolution et d'érosion) ou au contournement du rideau d'injection en profondeur ou en rive.

2.4.3. Vieillissement des réseaux de drainage

Quand au vieillissement des réseaux de drainage, il résulte d'un dispositif inadapté ou mal exécuté (densité de forages, profondeur et diamètre des drains, exutoire, etc..) ou du colmatage des drains par dépôt des produits de la dissolution ou de l'érosion des fondations.

2.4.4. Signes de la dégradation des rideaux d'injection et des réseaux de drainage

Le mécanisme de vieillissement des rideaux d'injection et des rideaux de drainage peut être détecté par une augmentation de la piézométrie dans la fondation, liée aux percolations dans la partie aval du rideau d'injection ou du réseau de drainage. En outre, le vieillissement du voile d'injection va se traduire par une augmentation des débits de drainage, le vieillissement des réseaux de drainage par leur diminution [8].

2.5. Déformation de la fondation

Ce mécanisme de déformation de la fondation concerne essentiellement les fondations meubles, mais peut également affecter le rocher de mauvaise qualité. Les fondations composées de matériaux fins, tels que des argiles, ou des fondations formées de couches alternées de matériaux fins et de matériaux

grenus (alternance de couches de sable et d'argile) y sont particulièrement sensibles. Il débute dès la phase de construction de l'ouvrage.

Le mécanisme physique en jeu est la consolidation et le tassement de la fondation sous l'effet du poids du remblai. Les fondations composées de sols grossiers (alluvions) sont peu sensibles à ce mécanisme. En effet, la compressibilité du sol n'est due qu'à la compression du squelette solide et le tassement du sol est rapide avec l'application de la charge et est indépendant de la teneur en eau car les matériaux sont facilement auto- drainants.

En revanche, pour les fondations composées de sols fins, l'application de la charge sur la fondation est, dans un premier temps, reportée totalement sur l'eau interstitielle car la compressibilité de l'eau est largement inférieure à celle de l'assemblage des grains. La première phase du mécanisme correspond à la dissipation de la surpression interstitielle et à l'augmentation en parallèle de la contrainte effective : c'est la consolidation. Une fois la surpression interstitielle dissipée, le squelette solide du sol continue à se resserrer : c'est la consolidation secondaire. Ces phases sont d'autant plus lentes que le sol est imperméable [17].

La première conséquence de la déformation générale de la fondation est l'affaissement de la crête du barrage, et donc la diminution de la revanche. En outre, les structures rigides au contact du remblai, tels que la galerie de visite, la conduite de vidange ou l'évacuateur de crues, peuvent connaître des désordres importants.

Par ailleurs, les déformations consécutives à la consolidation et au tassement de la fondation se produisent de façon hétérogène, entraînant des tassements différentiels du remblai. Ce type de mécanisme est dangereux car il peut provoquer la fracturation du remblai. Les fissures consécutives peuvent entraîner des glissements de talus mais constituent surtout des lignes d'écoulement préférentiel à partir de la fondation ou de la retenue. Les fuites qu'en résultent sont alors susceptibles de produire des mécanismes d'érosion régressive le long des lignes de fracturation [18].

Aussi, les couches reconnues comme très compressibles à l'étude préalable (terre végétale, tourbe, alluvions non stabilisées) sont à décaper lors des travaux préparatoires afin de minimiser la valeur des tassements potentiels. Si l'enlèvement complet de ces couches n'est pas économiquement possible, des

dispositions constructives particulières doivent être prévues dans le projet (larges risbermes amont et aval) [19].

Les tassements du sol support sont d'autant plus nuisibles qu'ils se produisent tardivement (après la réalisation), et de manière différentielle (les tassements sont plus importants au centre).

Ces tassements peuvent provoquer des fissurations importantes de l'ouvrage. Elles peuvent être traitées par les méthodes usuelles de consolidation, ou en adaptant la vitesse de construction au temps de dissipation des tassements [3] .

2.6. Perte de résistance, augmentation des sous-pressions et modification de contraintes

La perte de résistance, l'augmentation des sous pressions et la modification de l'état de contraintes sont des phénomènes entraînant la diminution de la résistance au cisaillement de la fondation et pouvant conduire à sa rupture par cisaillement. Ils apparaissent généralement de façon combinée.

2.6.1. Perte de résistance

La perte de résistance concerne les fondations meubles. Elle survient généralement à la suite de déformation excessives ou de la saturation des matériaux cohésifs qui la constituent, selon les processus physiques suivants [20] :

- La résistance au cisaillement des argiles est plus élevée à l'état non saturé qu'à l'état saturé ainsi, une argile saturée voit sa cohésion diminuer et ce d'autant plus que son indice de plasticité est élevé,
- Dans les sols argileux lorsque la déformation dépasse la déformation de résistance maximum, la résistance est alors réduite à la résistance résiduelle.

2.6.2. Augmentation des sous-pressions

Les sous-pressions dans la fondation augmentent lorsque l'exutoire normal des percolations vient à s'obstruer ou lorsque le débit de fuite excède la capacité locale de drainage. Plusieurs scénarios impliquant l'augmentation des sous pressions peuvent intervenir :

- Une fondation rocheuse au contact du remblai ou sur les strates de surface peut présenter des fissures ouvertes ou des joints remplis de matériaux érodables (silt ou sable). Sous la charge de la retenue l'eau pénètre dans les joints et fissures, progressant vers l'aval et provoquant des sous-pressions. Eventuellement, les eaux d'infiltration trouvent un passage jusqu'à l'aval de l'ouvrage où une fuite apparaît [21].
- Les eaux d'infiltration dans une fondation meuble peuvent entraîner des fines qui, en l'absence de dispositif de filtres, sont susceptibles de colmater progressivement les drains.

2.6.3. Modification de l'état de contraintes

Les modifications des états de contraintes sont liées aux mécanismes suivants :

- Pour les barrages construits sur des fondations meubles, l'abaissement de la nappe sous le remblai augmente les contraintes effectives, ce qui peut provoquer des tassements importants,
- Pour les barrages fondés sur le rocher, les variations périodiques des charges hydrostatiques provoquent des contraintes de cisaillement cycliques qui peuvent provoquer, par fatigue l'ouverture de joints [21],
- Le remplissage de la retenue provoque une augmentation des pressions interstitielles dans la fondation, donc une diminution des contraintes effectives pouvant conduire à la vidange rapide [8].

2.7. *Erosion interne des fondations*

L'érosion interne est l'une des principales causes de rupture d'ouvrages hydrauliques. Dans ce contexte, on relève à travers l'histoire des barrages des accidents qui témoignent de la violence dévastatrice de l'eau. La seconde moitié du dix-neuvième et le vingtième siècle ont été jalonnés de divers cas de ruptures de barrages catastrophiques [22]. Entre 1970 et 1997, (Frry a recensé en France [23] 71 manifestations d'érosion interne dont 23 cas de renard hydraulique et 48 cas de suffusion [24]. Les phénomènes d'érosion interne ont provoqué quelques accidents majeurs dont la rupture célèbre du barrage de Téton le 5 juin 1976, à savoir renard dans le massif de fondation [14].

Le terme générique d'érosion interne couvre un grand nombre de mécanismes de détériorations du barrage ou de sa fondation qui trouvent leur origine dans l'entraînement des grains constituant un sol sous l'action des forces générées par l'écoulement [14].

L'érosion interne est un mécanisme majeur des instabilités constatées sur les ouvrages en terre de retenue d'eau. Ce mécanisme comporte deux processus principaux : l'arrachement des particules et leur déplacement. Son développement progressif dans le temps et dans l'espace, sa non-homogénéité due à l'hétérogénéité des sols naturels rend ce phénomène complexe et difficile à mettre en évidence et à interpréter [25] et [26]. Le processus d'arrachement des particules se manifeste au niveau de la structure sous la forme d'érosion régressive, de débouillage ou de bouillasse, le phénomène de transport agit lui par développement du phénomène de renard ou de suffusion [27].

L'érosion interne ne se développe que si deux conditions nécessaires sont réunies : l'arrachement des particules et leur transport.

D'après le CFGB, il existe plusieurs modes d'arrachement des particules :

- **L'entraînement** est le détachement des particules à partir d'une certaine valeur de cisaillement engendrée par l'écoulement ;

- **L'érosion régressive** correspond à l'arrachement des particules sous l'effet de la poussée de l'écoulement percolant à travers le matériau. Lorsque le gradient hydraulique local est important, les forces d'écoulement peuvent arracher les grains du sol près de la surface où la résistance du sol est minimale. L'entraînement des grains de sol près de la surface autorise celui des grains situés un peu plus loin, d'autant que, la longueur de percolation diminuant, le gradient hydraulique augmente. Il ya donc ainsi progressivement création d'un conduit depuis l'aval. Le phénomène se propage de l'aval vers l'amont [14].

- **La bouillasse** : sous l'action de la pression d'eau augmentant jusqu'à annuler la contrainte effective, les grains de sol « flottent », ce phénomène peut se produire au pied aval d'un barrage par un écoulement dans la fondation,

- **La dissolution** est la disparition d'une partie des constituants des particules sous une action chimique ou thermique et la défloculation est un phénomène physico-chimique qui tend à diminuer la taille des agglomérats de particules argileuses [28].

- **Le débouillage** est le nettoyage d'une fissure remplie de matériaux terreux (fondations rocheuses).

La nature du transport conduit à distinguer deux catégories d'érosion interne : le renard hydraulique et la suffusion.

Dans le mécanisme de renard hydraulique, le transport est concentré dans un conduit ou un cheminement préférentiel [14].

Le renard hydraulique (piping) qui intervient en stade avancé de l'érosion interne. Il est associé à un écoulement régressif de départ des particules qui commence à l'aval et se propage à l'amont en provoquant la formation d'une cavité au sein du sol. Ce phénomène est difficile à détecter car il est bref, ce qui ne permet qu'un très court temps pour agir contre lui [29].

Le renard représente la formation d'un cheminement préférentiel d'écoulement, le long duquel sont groupés un certain nombre de points faibles, où des courants de filtration commencent à se concentrer. Des particules sont expulsées du milieu, et le volume solide total du milieu décroît. Ce phénomène évolue très rapidement jusqu'à la formation d'un conduit continu.

Dans le mécanisme de suffusion, le transport est diffus au sein du remblai (ou de fondation) ou à l'interface de deux matériaux, et les vitesses d'écoulement sont initialement faibles [14].

La suffusion qui résulte d'une redistribution interne des particules fines contenues initialement dans le sol massif. La distribution granulométrique des particules du sol ne change pas, mais l'homogénéité des sols n'est plus la même et la perméabilité diminue dans certaines régions, là où les particules fines s'attachent. Cette redistribution des particules provoque des pressions élevées, localisées en aval de l'écoulement, qui peuvent conduire au départ des particules de plus grand diamètre. De manière générale, l'évolution de ce phénomène de suffusion est très lente, ce qui permet sa détection [29].

L'action de suffusion commence par le déplacement de particules fines à l'intérieur de la matrice granulaire. Dans cette situation, certaines particules en mouvement peuvent être piégées après une certaine distance dans les vides formés par un squelette de particules plus grossières ; ce qui conduit à une diminution de la porosité et implicitement de la perméabilité du milieu dans la zone de blocage et à une augmentation de ces mêmes paramètres dans la zone d'entraînement. Des études ont montré que la suffusion peut être un mécanisme d'effondrement des sols à condition qu'ils possèdent une structure apte à cet effet.

Les sols les plus vulnérables à la suffusion sont les sols à granulométrie étalée. Dans ces milieux, les éléments fins sans cohésion sont transportés en premier et ainsi le sol s'appauvrit en fines et devient plus perméable. Par conséquent, les vitesses de percolation deviennent de plus en plus agressives et entraînent finalement la déstabilisation des particules cohésives. Le processus peut se poursuivre pendant plusieurs années pour laisser place à un sol squelettique [24].

Cette situation donne lieu à un état dans lequel les débits de fuite deviennent suffisamment importants pour mettre en péril le sol où l'ouvrage en question. Parfois la structure très appauvrie en fines s'effondrera sur elle-même [18].

L'érosion interne englobe ces différents types d'actions qui peuvent avoir lieu au même endroit et en même temps, ce qui rend leur distinction difficile. Notons qu'un tel mécanisme est plus insidieux en fondation que dans le remblai car il est plus difficilement détectable et car on ne maîtrise pas la structure du sol en place [8].

2.8. Instabilité mécanique en fondation

Un barrage en remblai, par nature, sollicite moins sa fondation qu'un ouvrage poids, c'est la raison pour laquelle il est considéré comme le barrage des fondations « meubles ».

Rappelons, néanmoins, que la résistance mécanique de la fondation peut conditionner la stabilité : en effet, des lignes de glissement affectant les talus, peuvent également recouper la fondation.

En outre, dans certains cas particuliers, la présence en fondation d'une couche mince aux médiocres propriétés mécaniques est susceptible de favoriser, sous la poussée du remblai, l'apparition d'un glissement de type plan le long de cette ligne de faiblesse [19].

3. Mécanismes de vieillissement du corps des barrages en remblai

3.1. Déformation du remblai

Les barrages en terre sont soumis à des charges externes qui induisent des déformations de la structure et les fondations. Le poids propre d'un barrage et la pression d'eau du réservoir sont principalement

responsable de l'augmentation des contraintes dans le corps du barrage qui se traduiront ensuite à des déplacements verticaux et horizontaux [30].

Le remblai, même après compactage, reste un matériau compressible, surtout s'il s'agit d'une argile. Les couches de base du remblai sont, en effet, soumises au poids des couches supérieures et sont d'autant plus sujettes au tassement que la hauteur de l'ouvrage est importante [31].

Il s'agit du mécanisme de consolidation et de tassement du remblai, analogue à celui de la fondation, il peut avoir des conséquences particulières sur les remblais.

Pendant la construction d'un barrage en remblai, des déformations du corps du barrage se produisent. Ces déformations sont provoquées par l'augmentation des contraintes effectives lors de la construction par couches et aussi par des effets de fluage [32]. Les déformations de la fondation, le transfert de contraintes entre les différentes zones du barrage et d'autres facteurs influencent les déformations. Après la fin de la construction d'un barrage, des mouvements appréciables de la crête et du corps du barrage peuvent se développer pendant le premier remplissage du réservoir. Pendant le remplissage du réservoir, les matériaux qui constituent l'épaulement, la transition et le filtre amont d'un barrage zoné en remblai sont submergés s'ils sont situés sous le niveau de l'eau du réservoir. La lente percolation de l'eau à travers le noyau sature progressivement les matériaux du noyau situés sous la ligne de saturation correspondant à l'écoulement permanent. Pendant ce processus de submerge et de saturation progressive, les valeurs des paramètres géotechniques des matériaux et, par conséquent, les valeurs des modules de Young (E) correspondants, décroissent. De plus, les matériaux situés à l'amont du noyau sont soumis aux forces et se déjaugèrent. Le noyau est directement soumis à la poussée hydrostatique de l'eau du réservoir. Le remplissage du reservoir a donc pour effet de produire des déformations supplémentaires. Par après, le taux des déformations diminue généralement avec le temps, à l'exception des variations associées aux variations périodiques du niveau du réservoir [33].

Pour un barrage en remblai de type zoné, les variations de contraintes peuvent être provoquées par des tassements différentiels entre le noyau et les zones filtres amont et aval [34]. Si le noyau est plus compressible que les zones filtres amont et aval, il se tasse sous son propre poids et par l'effet de voûte, il s'appuie sur les zones filtres plus rigides, ce qui tend à réduire les contraintes verticales et par

conséquent les contraintes latérales vers la base du noyau. Cette situation peut provoquer un claquage hydraulique et un risque d'érosion des particules fines du noyau [35].

L'objectif est donc de se prémunir de déformations excessives du remblai ou de sa fondation pouvant entraîner :

- Une diminution de la revanche et donc un risque de rupture par érosion externe,
- Une modification du réseau d'écoulement interne (par exemple par cisaillement du système de drainage suite à des tassements différentiels) et donc un risque de rupture par glissement,
- Une ouverture de fissures dans l'organe d'étanchéité (par exemple par fracturation hydraulique pour un barrage à noyau ou par rupture de l'écran d'étanchéité d'un barrage à masque) et donc un risque de rupture par érosion interne,
- Une fissuration ou une rupture des conduites ou galeries passant dans le remblai ou la fondation [36].

L'état-limite de tassement correspond à un critère de fonctionnalité. L'objectif est que l'intégrité des organes d'étanchéité et de drainage soit maintenue. Le risque est que des déformations excessives conduisent à des fissures voire des ruptures sur des galeries ou conduites, ou amènent l'ouvrage dans un état de danger potentiel vis-à-vis des ruptures par glissement, érosion interne et érosion externe [36].

- Les tassements peuvent avoir pour causes :
- L'existence de couches compressibles dans la fondation,
- Une réalisation défectueuse de l'ouvrage (pour digue en terre, défaut de compactage),
- Comportement hydraulique interne anormal.

Il est cependant tout à fait normal qu'un ouvrage se tasse au cours de sa construction et lors des premières années de son exploitation. Il convient seulement de suivre l'évolution de son tassement dans le temps car toute variation brusque pourrait conduire à des fissures.

Les zones les plus sensibles à la fissuration (crête et partie supérieure des parements) devront être inspectées avec soin. Les fissures parallèles à l'axe de l'ouvrage sont parfois l'indice d'un début de rupture du talus suivant un cercle de glissement, les fissures transversales à l'ouvrage sont souvent liées à des phénomènes de retrait dus à la variation de teneur en eau dans des sols argileux ou à des tassements différentiels. Quelle qu'en soit la cause, l'apparition des fissures sur la crête d'un barrage

en terre est l'indice de désordres graves dont il faut surveiller attentivement l'évolution avant d'y apporter éventuellement remède.

Par ailleurs, il faudra aussi noter tout soulèvement du terrain car il peut être l'indice soit de la présence d'argile gonflante particulièrement dangereuse pour les ouvrages en béton, soit l'existence de sous pressions [6].

Les fissures se développent dans des zones en traction au sein du remblai. Ces tractions sont généralement causées par des tassements différentiels intervenant pendant et après la construction, durant les phases de remplissage/ vidange du réservoir et durant les séismes. On distingue trois types de fissures : transversale (verticale et dans une direction amont-aval), horizontale, longitudinale (verticale et dans une direction rive à rive) [36].

- **Transversales** : les fissures transversales dans un noyau imperméable sont très préjudiciables à la sécurité de l'ouvrage puisqu'elles créent des chemins d'eau à travers le remblai (risque de rupture par érosion interne). Les fissures transversales peuvent être causées par des contraintes de traction résultant de tassements différentiels du remblai et/ ou de sa fondation. Les tassements différentiels peuvent apparaître au contact avec des rives très raides, au contact avec des structures en béton adjacentes, là où le compactage du remblai est difficile, ou au dessus de zones compressibles en fondation (anciens méandres de rivières par exemple). Ils peuvent aussi apparaître dans la recharge amont à la mise en eau, par lubrification des contacts entre enrochements [36].

Les fissurations transversales du remblai peuvent aussi se manifester lorsque le terrain de fondation sur lequel repose le barrage présente des discontinuités. Il s'agit d'une discontinuité géométrique avec une rupture de pente importante de la fondation, ce qui a pour effet d'avoir une variation rapide de la hauteur de remblai susceptible de tasser. Ces désordres sont aussi à craindre lorsque, sous le barrage, la fondation n'est pas homogène et qu'elle est susceptible de connaître elle-même, des tassements différentiels [37].

- **Horizontales** : les fissures horizontales dans un noyau imperméable apparaissent quand le matériau du noyau est beaucoup plus compressible que les matériaux adjacents. Le noyau a alors tendance à s'accrocher sur les matériaux plus raides, d'où un transfert de poids vers ces matériaux et par conséquent une réduction de la contrainte effective verticale au sein du noyau. Lors du remplissage du

réservoir, la pression s'installe et peut annuler la contrainte effective verticale au sein du noyau, ouvrant ainsi une fissure. Ce phénomène est appelé fracturation hydraulique. Ces fissures ne sont pas visibles depuis l'extérieur [36].

Le noyau est généralement plus compressible que les recharges. Si la vitesse de construction est plus rapide que la consolidation de la partie inférieure du noyau, la partie haute de celui-ci peut rester « suspendue » aux recharges ; ceci provoque une décompression du matériau constituant le noyau selon un plan horizontal [14].

Lorsque le tassement différentiel et donc la décompression sont importants, des fissures horizontales d'autant plus dangereuses qu'elles ne sont pas visibles sur les parements peuvent s'ouvrir. Les précautions à prendre vis-à-vis de ce risque consistent à choisir, pour le noyau, un matériau suffisamment peu compressible et bien compacté, à épaissir les zones de filtres et à prévoir un filtre suffisant à l'amont pour permettre le colmatage des fissures [37].

- **Longitudinales** : les fissures longitudinales peuvent résulter de tassement excessifs de la recharge amont lors du premier remplissage d'un réservoir (phénomène d'effondrement des enrochements sous mouillage) ou lors d'une vidange rapide. Elles peuvent être causées également par des tassements différentiels entre matériaux adjacents ou sous l'effet d'un séisme. Enfin, des fissures longitudinales peuvent se développer en cas de défaut de portance de la fondation. Ces fissures n'ouvrent pas de chemins d'eau de l'amont vers l'aval et ne créent donc pas le risque d'érosion interne. Par contre, elles peuvent diminuer la stabilité au glissement des remblais, particulièrement si les fissures se remplissent d'eau [36].

Les tassements du barrage sont inévitables, ils doivent être prévus (hauteur de réalisation), limités (compactage, teneur en eau) et surtout homogènes. Des tassements trop importants risquent de provoquer des fissurations du barrage [38]

3.2. Perte de résistance

La perte de résistance du matériau du remblai est un phénomène qui entraîne la diminution de la résistance au cisaillement du remblai, pouvant provoquer des instabilités de talus et des déformations

et pouvant conduire à la rupture par glissement. Trois principaux scénarios sont à l'origine de ce phénomène :

- Le compactage insuffisant des matériaux lors de la phase de construction, cela peut se produire notamment lorsque les matériaux ont été compactés du côté sec de l'optimum d'humidité et avec une énergie de compactage insuffisante pour assurer une réduction suffisante des vides. La mise en eau conduit alors à un effondrement du matériau. Si le sol est de façon uniforme insuffisamment compacté, on constate un tassement général des parties saturées du remblai lors de la mise en eau, a contrario, si les défauts de compactage sont localisés, on observe des tassements différentiels pouvant produire une fracturation du remblai,

- Certains sols ont, à sec, une forte résistance au cisaillement procurée par une cohésion élevée qui peut diminuer sensiblement dès lors qu'ils sont humides ou saturés (Sol fins, argiles). Plusieurs mécanismes peuvent produire des conditions de saturation élevée : un compactage insuffisant, une nappe de versant au contact du remblai, un régime pluviométrique défavorable ou une défaillance du dispositif de drainage ou d'étanchéité,

- Les pertes de résistances peuvent être causées par une modification de l'état de contraintes. A ce titre, les cycles de dessiccation et d'imbibition des matériaux, comme les argiles plastiques des noyaux étanches, peuvent produire des fracturations.

La surélévation d'un remblai peut déformer les matériaux en place au-delà de leur résistance maximum, pouvant conduire à une fissuration du remblai [8].

3.3. Augmentation des pressions interstitielles

3.3.1. Pendant la construction

La construction ne pose pas de réelles difficultés lorsque les matériaux constitutifs sont perméables. En revanche, elle est certainement l'époque la plus critique des barrages en argile. En effet, l'argile doit avoir une teneur en eau moyenne à forte pour assurer la plasticité nécessaire à l'étanchéité. Mais comme l'argile est très compressible, elle reportera les contraintes de la construction sur son eau interstitielle, qui montera en pression sous la charge du remblai. Cette génération de pression a

entraîné plusieurs ruptures de remblai : Mondély en 1981, Mirgenbach en 1982 et Carsington en 1984.

Dans les cas les plus extrêmes, la pression interstitielle atteint le poids des terres, annule la contrainte effective et crée une fracturation hydraulique sur une section horizontale [36].

Pour les zones de faible perméabilité, l'évolution des pressions interstitielles doit être surveillée en cours de réalisation. L'augmentation trop rapide des contraintes (due à la montée de l'ouvrage) provoque une augmentation des surpressions interstitielles qui n'ont pas eu le temps de s'évacuer. Ceci réduit le frottement des matériaux et donc la stabilité de l'ouvrage [3].

Il est alors nécessaire de réaliser une étude en contraintes effectives, afin de déterminer l'apparition et l'évolution des pressions interstitielles en fonction des étapes de la construction. Des essais triaxiaux avec mesures de la pression interstitielle reproduisant le chemin des contraintes permettent de mener à bien ce type d'étude.

L'analyse en contraintes effectives permet également de définir des critères d'alerte afin de ralentir ou d'arrêter temporairement la montée de la digue, si les pressions interstitielles mesurées réellement deviennent trop élevées et mettent en péril la stabilité de l'ouvrage. Le suivi des travaux à l'aide d'une instrumentation adaptée est indispensable car le développement des pressions interstitielles est à l'origine d'un certain nombre de ruptures intervenues en cours de construction [39].

Pour les barrages en remblai, on doit procéder à la mesure continue des valeurs des pressions interstitielles sur les cellules installées dans le remblai au fur et à mesure de sa montée. Les résultats sont comparés aux valeurs déterminées lors du projet, et les paramètres ajustés aux résultats trouvés. Si des écarts importants sont détectés par rapport au modèle initial, ils sont aussitôt analysés, ce qui peut conduire soit à réviser ce modèle, soit, si le risque est confirmé, à prendre les précautions qui s'imposent sur le chantier (réduction de la teneur en eau, diminution de la cadence de mise en place des terres, modification du traitement des surfaces de reprise en fonction des conditions météorologiques,...) [40].

3.3.2. Pendant L'exploitation

Les pressions interstitielles peuvent varier avec le temps, la perméabilité, la charge hydrostatique et les conditions de drainage. Un réseau de lignes de courants et d'équipotentiels permet de connaître

l'intensité et la répartition des pressions interstitielles. Il faut relever qu'en ce qui concerne la stabilité, les pressions interstitielles peuvent réduire la résistance au cisaillement [41].

L'augmentation des pressions interstitielles dans un remblai conduit à la diminution de sa résistance globale au cisaillement, susceptible de provoquer des instabilités de talus et des déformations. Elle est généralement liée à l'ouverture de fissures dans le remblai ou dans le noyau, pouvant provenir de trois mécanismes :

- Des tassements différentiels dans la fondation ou dans le remblai,
- Une dessiccation prolongée du noyau d'argile, liée à un niveau de retenue maintenu bas pendant une période prolongée et provoquant des fissures de retrait,
- Une dégradation du remblai ou du noyau par des mécanismes chimiques.

D'autres scénarios particuliers, liés à des défaillances d'équipements du barrage, peuvent conduire à l'augmentation des pressions interstitielles.

- Le colmatage ou le contournement (par le haut, le bas ou les rives) du dispositif de drainage du remblai ou de la fondation,
- La défaillance du système d'étanchéité, dégradation du masque amont ou du noyau central [8].

3.4. Erosion interne

3.4.1. Manifestations et mécanismes

L'érosion interne est un endommagement progressif qui se produit dans les sols non cohésifs sous l'action de l'écoulement d'un fluide. Ce phénomène présente un vrai risque pour les ouvrages hydrauliques (digues, barrages). Il peut causer la rupture de ces ouvrages et ainsi des inondations [42].

Une analyse des accidents de tous les barrages en remblai construits après 1900, montre que la cause la plus fréquente, soit 38% des accidents, était l'érosion interne ou la formation d'un renard consécutif à l'infiltration [4].

L'érosion hydraulique est l'une des principales causes de rupture des ouvrages hydrauliques. L'enjeu est défini par les zones susceptibles d'être inondées en aval [43]. Elle est liée au Phénomène de détachement et de transport des particules du sol soumis à un écoulement [44].

L'érosion interne est produite par la filtration progressive des particules fines qui sont arrachées et transportées par le fluide à travers le milieu poreux. Ce qui conduit à une augmentation de la porosité du sol et à la détérioration de ses propriétés mécaniques. Les mécanismes d'érosion interne sont complexes et dépendent de plusieurs paramètres qui interagissent mutuellement [29].

Sous l'action d'un écoulement interne provenant du réservoir, les particules fines d'un ouvrage hydraulique peuvent être sujettes à des phénomènes d'arrachement et de transport. Cette migration, connue sous le nom d'érosion interne, va influencer sur la granulométrie et sur la porosité des matériaux constitutifs de l'ouvrage, ce qui va provoquer des variations au niveau des caractéristiques mécaniques. Ceci peut engendrer une perte d'étanchéité, un renard, un glissement, un tassement, une surverse et au stade ultime une formation de brèche [45]

L'érosion interne est définie comme une migration de particules engendrée par un écoulement hydraulique souterrain dans un sol ou dans un ouvrage en terre. Cette migration engendre une modification des caractéristiques hydrauliques et mécaniques du matériau constituant l'ouvrage et notamment de la perméabilité. La perturbation de cette caractéristique intrinsèque essentielle peut créer une perte d'étanchéité ou une surpression interstitielle. Une telle modification de ce milieu poreux peut être le facteur déclenchant d'une rupture d'ouvrage.

D'après le CIGB [46] , Ces infiltrations dangereuses, qui finissent par produire une érosion interne du barrage ou des fondations, peuvent avoir des origines très diverses :

- Fissuration due à des tassements différentiels,
- Fruites à travers la fondation, au contact avec le noyau ou le pied de masque,
- Fissuration horizontale due à des transferts de charge de noyau sur les massifs amont et aval et à un claquage ou facturation hydraulique des zones peu comprimées,
- Entraînement de fines à la suite d'élongation et de rupture de tuyaux enterrés,
- Tassements différentiels près d'une faille, d'une fondation compressible érodable .

A ces causes mécaniques peut s'ajouter une cause physico- chimique souvent assez mal connue, la défloculation des argiles dites "dispersives"[34].

Le compactage médiocre des terres du remblai qui favorise les circulations anarchiques et éventuellement concentrées de l'eau à travers le massif, et la rupture d'une conduite de vidange sont à l'origine de ce phénomène [1].

Si les vitesses deviennent trop importantes, les particules solides du remblai sont susceptibles d'être entraînées, notamment au débouche des lignes de courant sur le talus aval. On peut alors assister à la naissance d'un renard sous la forme d'un petit tunnel où l'eau circule de plus en plus facilement, avec l'amplification du gradient hydraulique, et progresse vers l'amont jusqu'à déboucher dans la retenue : on parle aussi d'érosion interne. L'évolution des phénomènes conduisant à la formation des renards peut être très lente (plusieurs années), mais tend à accélérer rapidement dès qu'apparaissent les premières manifestations visibles- dans ce cas, une vidange partielle ou totale du plan d'eau s'impose dans les plus brefs délais [19].

3.4.2. Recommandations

Dans les barrages homogènes, la meilleure méthode de prévention contre les phénomènes de renard consiste à empêcher que les lignes d'écoulement ne débouchent sur le parement aval. C'est pourquoi de nombreux ouvrages de ce type sont équipés de dispositifs de drainage permettant d'abaisser la ligne phréatique dans le remblai.

Des précautions supplémentaires doivent être prises si des conduites rigides traversent le remblai. Le compactage du matériau au contact de la conduite est plus difficile ; le serrage des grains est donc moins important, ce qui facilite l'apparition d'érosion interne [14].

Les règles à respecter pour éviter de telles conséquences sont

- Le choix judicieux des matériaux,
- Le respect des critères des filtres entre les différentes zones de la digue et dans le contact avec le sous sol,
- Le traitement correct des zones de contact de la digue avec le sous-sol et les ouvrages en béton,
- Le traitement approprié du sous sol par injection et/ ou drainage,
- La mise en place des matériaux selon les règles de l'art,

- Le compactage adéquat des conduites, puits et autres parties en contact direct avec le remblai [4].

3.5. Glissement du remblai

L'étude de la stabilité d'un barrage en remblai est fondamentale dans la mesure où elle doit aboutir, pour l'essentiel, à la définition de la géométrie de l'ouvrage (pente des talus, en particulier) et des principes du drainage à appliquer : deux paramètres qui conditionnent, bien sur, le volume et la nature des matériaux à mettre en œuvre et, donc, le prix de revient final de l'aménagement [19].

Le glissement par instabilité désigne le détachement et le déplacement le long d'une pente d'un massif de sol ou de matériaux rocheux sous action des forces de gravité.

L'eau est un facteur-clé du glissement du talus d'un barrage ou d'une digue. Ce phénomène peut survenir lorsque la résistance est médiocre (cohésion, angle de frottement interne), ou diminuée par la saturation du matériau initialement mal compacté ou compacté à une teneur en eau trop faible. Il peut également intervenir lorsque la pression interstitielle est trop élevée, à la suite d'une construction trop rapide, d'une vidange trop rapide, ou d'une déficience du drainage.

La stabilité des talus des barrages en remblai est en général vérifiée en fin de construction, à niveau normal du réservoir et après une vidange rapide. Les glissements par instabilité n'intéressent pas que les talus des barrages, mais aussi les fondations, ainsi que les versants de la retenue, exemple historique du barrage de vajont, Italie en 1963 [47].

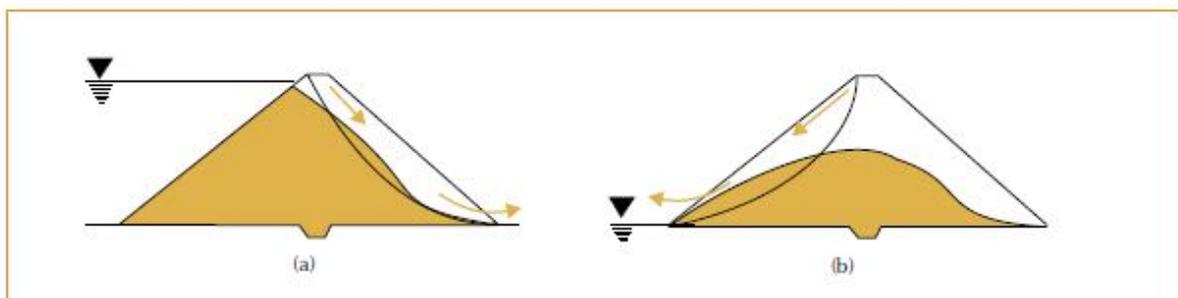


Figure I.1. L'instabilité par glissement concerne le parement aval lorsque le réservoir est plein (a), et le parement amont au moment d'une vidange rapide (b), lorsque les pressions dans le corps de l'ouvrage ne sont pas dissipées [47].

Les principales situations pour lesquelles il convient de vérifier la stabilité sont les suivantes :

- Stabilité en fin de construction,
- Stabilité en cours de fonctionnement, retenue pleine, régime permanent, talus aval,
- Vidange rapide, talus amont [39].

Pour les barrages en remblai, les calculs de stabilité se font par différentes méthodes. Un facteur qui influence beaucoup la stabilité est la pression interstitielle. Les calculs les plus fiables sont ceux qui sont faits avec les contraintes effectives [40].

3.5.1. Conséquences directes du glissement

Dans le scénario le plus grave, le glissement peut entraîner la vidange accidentelle de la retenue si un cercle émanant du talus aval recoupe le talus amont à un niveau inférieur à celui de la cote du plan d'eau ou si un renard se développe après un glissement.

Qu'il soit brutal ou progressif, le mouvement peut provoquer des dégâts irréversibles sur des ouvrages attenants au barrage :

- Déformation ou rupture des dispositifs internes de drainage,
- Rupture des canalisations de vidange ou de prise d'eau,
- Dégâts éventuels à l'évacuateur de crues s'il est sur le remblai,
- Obstruction du fossé aval et /à la destruction de bâtiments annexes par le front du glissement.

3.5.2. Conséquences indirectes du glissement

D'une façon ou d'une autre, l'occurrence du phénomène se traduit par la réduction, à caractère plus ou moins local, de la largeur du remblai –réduction qui est susceptible d'affecter le comportement hydraulique ultérieur de l'ouvrage (interception et remontée de la ligne de saturation par exemple). Un glissement mineur peut engendrer, à terme, d'autres glissements aux conséquences plus graves. Enfin, on imagine facilement de multiples conséquences indirectes engendrées par la ruine ou la rupture d'ouvrages annexes dans ou à proximité du barrage [48].

3.6. La submersion des barrages

La protection des grands barrages contre les crues est un souci majeur des concepteurs et des exploitants qui savent que le tiers des ruptures de barrages est imputable aux submersions [49].

Selon les statistiques de la CIGB, la submersion constitue la principale cause de rupture des barrages en remblai. Ce débordement en crête peut être consécutif à une montée incontrôlée du plan d'eau, à une mauvaise gestion des apports de la retenue ou à une vague provoquée par l'arrivée d'un volume important de matériau dans la retenue. Une réduction de la revanche par tassement suite à un tremblement de terre peut aussi favoriser cet écoulement au-dessus du couronnement [4]. Lorsque le déversoir du barrage ne peut écouler un débit suffisant, le niveau de l'eau dans le réservoir s'élève au-dessus de la crête lors d'une crue exceptionnelle. Une lame d'eau s'écoule alors le long de la crête et du parement du talus aval et érode rapidement le sol constituant le barrage, provoquant ainsi sa destruction [50].

Il convient ce pendant de rester attentif au fait que le dimensionnement des organes d'évacuation des crues a été effectué à partir de règles de calcul de crue très en deçà de ce qui est aujourd'hui appliqué pour les ouvrages neufs. Pour les barrages anciens, un examen des conditions de fonctionnement en cas de crue est nécessaire. Le cas échéant, cet examen peut conclure à la nécessité d'un nouveau dimensionnement des évacuateurs [51].

En effet, le dimensionnement et le fonctionnement des évacuateurs des crues ont constitué depuis toujours une préoccupation sans cesse croissante pour les barrages. Si les aspects liés aux critères quantitatifs sont d'une importance capitale pour la sécurité de l'aménagement, il en est de même pour ceux relatifs aux critères qualitatifs liés aux régimes d'écoulement et aux dispositions constructives [52].

L'un des problèmes les plus importants et en même temps le plus complexe en hydrologie reste le calcul et la prévision des crues. L'estimation des crues rares et extrêmes est liée à une bonne connaissance des pluies rares et extrêmes [53]. De nombreuses études ont été effectuées par les hydrologues, les statisticiens et les ingénieurs sur le débit maximum, le volume et la fréquence des crues sur les cours d'eau les plus divers [54].

3.7. Erosion externe

L'érosion externe est engendrée par des circulations d'eau, même peu importantes, sur la crête des barrages. Le mécanisme d'érosion s'amorce à partir du bord aval de la crête et progresse jusqu'à ce qu'une brèche soit ouverte. Le phénomène peut durer quelques minutes à quelques heures selon la taille des matériaux, leur cohésion, le revêtement de la crête, la hauteur de l'eau qui s'écoule au-dessus du barrage [55]. L'érosion superficielle, bien qu'elle soit très répandue, ne constitue pas un mécanisme de vieillissement grave. Elle concerne les barrages en remblai homogène ou à zones. On distingue les mécanismes s'opérant sur les talus amont et aval et la crête [56], l'érosion superficielle de la crête et du talus est due :

- A l'action directe de la pluie et du ruissellement en résultant,
- A une brève submersion accidentelle de crête.

L'érosion superficielle du talus amont résulte essentiellement de l'action du batillage provenant des vagues de la retenue. La dégradation de la protection du talus amont rip-rap, masque amont sous l'action du gel aggrave l'érosion superficielle [57].

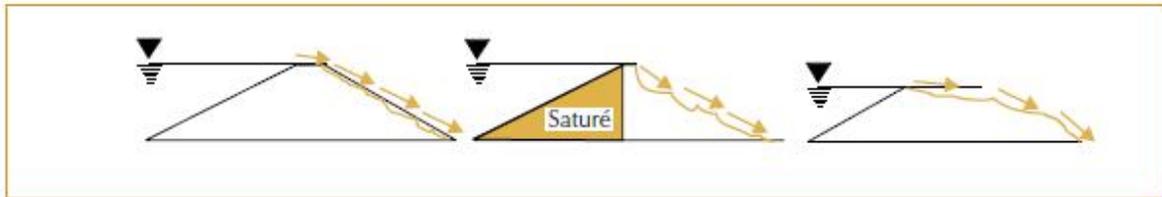


Figure I.2. Evolution type d'une brèche par surverse. Vue en coupe amont/aval [50].

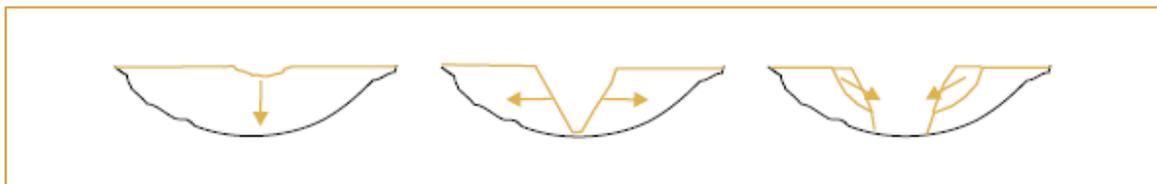


Figure I.3. Evolution type d'une brèche par surverse. Vue en coupe rive/rive [50].

3.8. Dégradation des masques amont

Le barrage à masque présente, à l'instar du barrage à noyau, une dissociation nette entre les fonctions de stabilité mécanique apportées par l'ensemble du corps du remblai et d'étanchéité assurées par le masque proprement dit. Le masque étanche, est constitué d'un organe mince, mis en œuvre sur (ou à proximité de) la ligne de parement amont [58].

3.8.1. Digues en enrochement avec masque amont

Le corps de la digue est constitué par des enrochements de carrière (donc relativement gros par exemple 10 à 100 cm) quelquefois jetés en vrac (mais seulement pour de petites digues) et surtout déchargés en couches horizontales de 1 à 1,5 mètre d'épaisseur qui sont ensuite vibrées. A cause du risque de poinçonnement des enrochements sur le sol, ce type de digue n'est en général adopté que si la fondation offre une certaine résistance à l'enfoncement.

Le dispositif d'étanchéité, à l'amont est en contact avec l'eau. Il est constitué par un masque articulé (plaques de béton armé, en damier) ou par un masque souple (béton ou mortier bitumineux). Le corps de la digue constitue un drain excellent à condition qu'on ait précisément exclu l'emploi de matériaux plus fins que quelques centimètres et que les enrochements ne s'effritent pas pendant leur mise en place. On fait souvent passer tous les matériaux par un crible, qui élimine les «éléments plus petits que 0 à 5 cm par exemple [59].

Pour autant qu'il soit correctement compacté et réalisé avec des matériaux non évolutifs, le barrage en enrochements tassera peu par lui-même, après sa construction : ce qui est un point important compte tenu de la fragilité potentielle de l'organe d'étanchéité à savoir risque de fissuration ou déchirure, en cas de tassement excessif du support [19].

3.8.2. Digue à masque sur remblai semi-perméable

Il peut se présenter le cas où l'on ne dispose pas, en quantité appropriée, d'un matériau suffisamment imperméable après compactage pour former, soit un noyau de barrage, soit un remblai homogène, parfaitement étanche.

On pourra s'orienter, dès lors, vers la conception d'un barrage en remblai homogène à base de matériau « tout venant » compacté (après vérification de son aptitude au compactage) dont le caractère semi-perméable sera compensé par la réalisation d'un masque amont étanche [19].

3.8.3. Dégradations des masques amont

Les premières utilisations de géomembrane pour étancher un barrage remontent aux années soixante. Depuis, la technique s'est largement développée en Europe et aux U.S.A, en particulier.

L'état de l'art (Étanchéité des barrages par géomembranes : technique actuelle – Bulletin n° 78 de la C.I.G.B.) exige, en effet, que la géomembrane repose sur une couche support et soit, en principe, recouverte par une couche de protection : on parle, désormais, de « dispositif d'étanchéité par géomembrane » (D.E.G.) pour désigner un tel ensemble de couches superposées nécessaires à la réalisation, à la mise en œuvre et à la protection de la géomembrane [19].

Ces dispositifs d'étanchéité sont susceptibles de se dégrader sous l'effet de différents agents : action thermiques (températures élevées, gel, dégel), u. v, chocs de flottants..... [60].

Les masques en béton hydraulique comportent des joints qui sont nécessaires pour permettre au béton de se dilater sous l'effet thermique sans se fissurer. Ces joints sont généralement remplis de bitume qui se rétracte et se dilate permettant un bon fonctionnement du barrage et il est nécessaire d'assurer périodiquement leur surveillance et leur entretien.

S'il s'avère que l'un des joints ne joue pas son rôle par l'apparition de fissures à ses alentours, il faut alors d'une part reprendre le joint et d'autre part réparer les fissures par injection [6].

En plus des déformations et des contraintes dans le remblai, il est impératif, d'évaluer les déplacements du masque amont pendant le remplissage du réservoir [60].

4. Mécanismes de vieillissement du corps des barrages en béton

4.1. Alkali-réaction

L'alkali-réaction est une réaction chimique entre les alcalins contenus dans la phase liquide interstitielle du béton et les granulats du béton. Elle correspond à une attaque des granulats par le

milieu basique du béton et provoque la formation de gel de réaction, dont l'expansion peut engendrer un gonflement. Le gonflement met en compression les granulats et en traction le ciment qui finit par se fissurer [62].

La réaction d'alcali-granulats est due à l'influence simultanée de plusieurs paramètres que nous pouvons regrouper en trois ensembles :

- **Les propriétés des matériaux : granulats, ciments :**

Cette réaction nécessite la présence de produits réactifs dans les granulats (minéraux ou roches réactifs). Par ailleurs, la teneur très élevée en alcalins dans la phase aqueuse interstitielle est généralement due à la dissolution des alcalis du ciment ou d'autres liants ou adjuvants.

- **Les effets extérieurs : humidité, température et contraintes de compression**

Une humidité relative importante (80% ou plus) est très favorable à l'alcali-réaction. A un moindre niveau, la vitesse de la réaction chimique augmente avec la température. Enfin, l'expansion et les dommages dus à l'alcali-réaction sont fortement dépendants du confinement et des contraintes, le gonflement du béton étant limité dans les zones comprimées [8].

- **Le temps :**

Les fissures apparaissent à des pas de temps variables. L'expansion du béton être progressive ou se produire tardivement mais alors brutalement.

Les effets du gonflement sur un plot d'un barrage poids sont les suivants :

- **Des déformations**

Un barrage étant confiné selon l'axe de sa crête, il se produit toujours un déplacement en crête vers le haut. Par ailleurs, on observe le plus souvent un déplacement axial, vers l'amont ou l'aval selon la configuration du site et de l'ouvrage. Le gonflement étant d'autant plus rapide que le béton est humide, la zone amont est donc la plus exposée

- **La fissuration**

Un premier type de fissures liées au gonflement se produit dans la masse du béton et apparaît en surface sous forme de faïençage à mailles plus ou moins larges ou en étoiles. Ces fissures favorisent la pénétration d'eau et l'action des sous pression.

Ces infiltrations, combinées au confinement, continuent à alimenter le gonflement et peuvent alors entraîner un deuxième type de fissures plus profondes : les fissures structurales.

- **Des exsudats blanchâtres** : Formés de calcite et parfois de gels translucides.

4.2. Retrait, fluage

Le mécanisme retrait, fluage, très connu et dangereux pour les barrages voûtes, n'entraîne pas de conséquences importantes pour les barrages poids. Tout d'abord, les effets du fluage du béton dans un ouvrage poids sont négligeables car les contraintes internes sont très faibles. Seul le retrait du béton peut conduire à certains désordres ne mettant toutefois pas en cause la stabilité du barrage.

Le phénomène de retrait peut avoir deux origines : thermique ou hydraulique. Le retrait thermique est surtout dû à la chaleur d'hydratation et est fortement influencé par le type de ciment choisi et son dosage. Le retrait hydraulique provient de la perte d'eau de gâchage par évaporation dans une atmosphère à faible humidité relative.

Les retraits ou contractions combinés à un confinement latéral du barrage ou à des joints insuffisants (en nombre ou en type) donnent naissance à des fissures verticales traversantes du plot, qui se développent au cours des premiers mois de la vie du barrage après la prise du béton. Dans ce cas, des fuites plus ou moins importantes peuvent apparaître aux sorties des fissures sur le parement aval [8].

4.3. Dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu

Le mécanisme de dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu met en jeu une réaction chimique entre le matériau du barrage et des agents extérieurs, notamment l'eau de la retenue. Ce mécanisme affecte essentiellement les ouvrages en zones de montagne soumis à l'action chimique des eaux pures [20].

Concernant les ouvrages en béton ou en maçonnerie de ciment, les eaux pures attaquent le béton en dissolvant l'hydrate de calcium du ciment durci. Ensuite, par réaction avec l'anhydride carbonique de l'atmosphère ou dissous, il se forme alors du carbonate de calcium. La capacité des eaux pures à dissoudre les composés calciques est fonction de la granulométrie et de la perméabilité du béton, mais

aussi de la résistance intrinsèque du ciment à ce type d'attaque chimique. Ce mécanisme se manifeste par des granulats apparents sur le parement amont, des dépôts et des efflorescences blanchâtres de carbonate de calcium dans les galeries, sur le parement aval et le long des joints [8].

4.4. Faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées

Pour les barrages poids, les sollicitations sont essentiellement d'origine hydraulique et sont liées au niveau de la retenue, qui fixe les intensités des pressions hydrostatiques et des pressions interstitielles. Lorsque le dimensionnement de l'ouvrage est insuffisant, ces sollicitations peuvent provoquer l'apparition de contraintes de traction dans le plot cote amont, dépassant la résistance en traction des matériaux et entraînant une fissuration plongeante dans le corps du barrage ou l'ouverture de reprises de bétonnage. Les sections ainsi fissurées sont alors le siège d'infiltrations et de la pleine sous-pression amont, et la résistance au cisaillement des matériaux sont diminuées [63].

4.5. Faible résistance au gel dégel

Le mécanisme de faible résistance au gel dégel concerne essentiellement le parement amont qui est directement en contact avec la retenue et , à un moindre niveau, la crête et le parement aval qui sont soumis aux intempéries. Il conduit à des dégradations de ces composants restant le plus souvent superficielles et ne mettant pas en jeu la stabilité des barrages.

Depuis la retenue, des eaux d'infiltration pénètrent à travers le parement amont dans la couche superficielle du corps du barrage. Lorsque le niveau d'eau baisse, les eaux infiltrées sont susceptibles de geler sous de faibles températures, et d'exercer alors des sollicitations provoquant la fissuration et l'éclatement du béton ou de la maçonnerie. Pour la crête et le parement aval, c'est la stagnation des eaux pluviales combinées au gel qui engendre la fissuration. Dans les deux cas, la perméabilité des matériaux des parements et de la crête est déterminante. Si aucune intervention n'est réalisée, les désordres peuvent progresser plus profondément dans les structures impliquant des réparations lourdes [8].

4.6. Vieillessement des revêtements amont

Les principaux agents extérieurs susceptibles de conduire au vieillissement des revêtements amont sont :

- Le gel-dégel
- Les gradients thermiques : les fortes et rapides variations de température ambiante provoquent des contraintes élevées sur le revêtement amont. Ces sollicitations thermiques peuvent entraîner la déformation du revêtement amont en membranes souples ou la fissuration d'un masque amont en béton. Ces phénomènes se produisent sur la partie non immergée du barrage, qui n'est pas protégée par l'eau de la retenue.
- Les eaux pures : Ce processus chimique correspond à l'attaque des revêtements amont, en béton, par les eaux agressives. Les dégradations des revêtements par les eaux pures se produisent sur toute la hauteur du parement, y compris la partie immergée [8].

CHAPITRE II

PRINCIPES GENERAUX DE LA SURVEILLANCE DES BARRAGES

1. Introduction

Dans le domaine du génie civil, les barrages ont toujours été considérés comme des ouvrages d'art spécifiques. Les raisons se trouvant, d'une part dans le caractère unique de chaque barrage et dans la complexité des comportements et des mécanismes mis en jeu d'autre part.

Le comportement d'un aménagement de barrages n'est pas uniquement lié à la réussite de ses études et de sa réalisation, mais également à l'efficacité de son exploitation et auscultation. La surveillance des barrages vise essentiellement à comparer le comportement de l'ouvrage par rapport à un référentiel et par rapport aux prévisions du projet [64].

Les barrages remplissent un rôle essentiel pour l'alimentation en eau, l'irrigation, la protection contre les crues et la production d'énergie électrique, mais ils peuvent aussi présenter de graves dangers en cas de rupture. C'est pourquoi, leur conception, construction et sécurité en exploitation font l'objet de soin attentif de la part des responsables, qui doivent se tenir constamment informés des progrès respectifs.

De toutes les réalisations humaines, les barrages sont parmi celles qui peuvent à certains égards induire un potentiel de risques très significatif. La construction d'ouvrages de retenue impose un risque aux populations avoisinantes, aux biens et à l'environnement naturel et humain.

Bien que les conséquences d'un dysfonctionnement ou d'une défaillance d'un barrage soient mesurables, quantifiables et bien souvent importantes, elles sont toutefois très hypothétiques. En effet, la probabilité de leur occurrence est très faible.

La surveillance des barrages vise à gérer ce risque et réduire au mieux ses probabilités d'occurrence, en mobilisant les moyens nécessaires à l'identification précoce d'événements indésirables susceptibles d'engendrer une éventuelle défaillance ou rupture.

Toute organisation d'un processus de surveillance devrait donc viser à faire en sorte que l'on réduise au maximum les probabilités de défaillance par :

- L'identification des modes de rupture et leur prise en compte dans un programme de surveillance,

- La détection précoce de phénomènes initiaux et évolutifs qui pourraient mener à ces mécanismes de ruptures,
- La connaissance, via des paramètres physiques, du comportement du barrage et de ses composantes [65].

Le maintien de l'état et de la sécurité des barrages, dans des limites d'acceptabilité définies préalablement, est une préoccupation majeure des concepteurs, des propriétaires et des exploitants [66]. Cette maîtrise passe classiquement par la mise en place d'une boucle « mesure- évaluation- décisions/ actions » qui permet de replacer le système dans son état de fonctionnement standard et en tout cas non dangereux. Cette boucle met en œuvre des modèles mathématiques qui lient les mesures à une évaluation globale de l'ouvrage et l'évaluation globale aux décisions d'actions [67].

La sécurité des barrages en service repose sur trois concepts généraux :

- Une conception adéquate pour éviter le pire,
- Une réflexion préalable sur les conséquences et l'organisation des secours au cas où le pire arriverait,
- Une surveillance constante, en temps utile et les mesures correctives qui s'imposent.

La surveillance d'un barrage commence dès le début de la mise en eau (et même pendant la construction). Les statistiques de rupture montrent qu'il s'agit d'une des phases les plus critiques de la vie d'un barrage. Elle se poursuit pendant toute son exploitation [14].

La surveillance des barrages vise à déceler, par observation visuelle et par auscultation, tout phénomène pouvant compromettre l'intégrité structurale et fonctionnelle d'un ouvrage [49].

L'objet de la surveillance est de s'assurer en toutes circonstances d'un état et d'un comportement satisfaisants de l'ouvrage de retenue (barrage) et de ses fondations.

La surveillance englobe également l'observation de la zone du bassin d'accumulation et de celle située directement à l'aval de l'ouvrage de retenue.

La surveillance doit permettre de garantir la détection rapide et précise de tout comportement anormal du barrage et de ses fondations, de tous dégâts particuliers et de conditions exceptionnelles dans les environs. De cette façon, il sera alors possible, en cas de besoin, de prendre à temps, toute mesure utile pour parer à un danger éventuel [41].

Le comportement d'un aménagement de barrages n'est pas uniquement lié à la réussite de ses études et de sa réalisation, mais également à l'efficacité de son exploitation et auscultation. La surveillance des barrages vise essentiellement à comparer le comportement de l'ouvrage par rapport aux prévisions du projet [64].

La pérennité et la garantie du bon fonctionnement des ouvrages nécessitent qu'un minimum d'entretien soit effectué. En effet, les ouvrages réagissent aux sollicitations auxquelles ils sont soumis : poussée de l'eau, variations thermiques, tassements, action du gel et des eaux agressives, etc.

En un mot, les ouvrages vieillissent au fil des années. Ainsi, le propriétaire devra établir, ou faire établir, un manuel d'entretien qui définira la nature des interventions et leur périodicité [68].

La surveillance d'un ouvrage a pour but essentiel de connaître, et si possible de prévenir, toute dégradation afin de le conserver en bon état de sécurité et ainsi être apte à remplir ses fonctions.

On cherche principalement à détecter les anomalies et désordres et à évaluer leurs éventuelles évolutions. Ces anomalies peuvent être dues à des mécanismes de vieillissement du barrage. Ils sont généralement lents mais une évolution rapide n'est pas exclue en particulier les premières années [69].

Le dispositif d'auscultation est un système de mesure judicieusement conçu de telle façon qu'il soit possible de mesurer tant les charges qui sollicitent l'ouvrage (causes) que les différents paramètres (grandeurs) qui caractérisent le comportement d'un ouvrage de retenue (conséquences) [4].

2. Les objectifs de la surveillance

Un ouvrage de retenue construit et en exploitation ne peut pas rester sans surveillance, ni entretien réguliers. Dans ce sens, il est tout d'abord primordial que l'exploitant de l'ouvrage mette sur pied une organisation adéquate de son personnel pour assurer des différentes missions de surveillance et d'entretien. L'objectif est de pouvoir mettre en évidence dans les meilleurs délais toute anomalie concernant le comportement et l'état de l'ouvrage afin de prendre toute disposition utile pour parer à un danger éventuel [4].

En matière d'objectifs, la surveillance des barrages intéresse plusieurs phases :

- **Pendant la construction et la première mise en eau** : on cherche essentiellement à comparer le comportement de l'ouvrage par rapport aux prévisions du projet, que ce soit pour vérifier certaines hypothèses de calcul, pour valider les résultats de ces calculs ou pour vérifier la pertinence de tel ou tel choix technique.

La première mise en eau fait l'objet de consignes particulières de gestion de la retenue, de surveillance visuelle et de suivi d'auscultation. En règle générale, la présence permanente de l'exploitant est exigée pendant toute cette phase. Dans les six mois qui suivent l'achèvement de la mise en eau, le propriétaire (ou le concessionnaire) doit rédiger un rapport de première mise en eau qui indique les éventuelles modifications par rapport au projet et analyse le comportement réel du barrage.

- **En phase d'exploitation** : comme déjà indiqué, les objectifs essentiels sont la sécurité de l'ouvrage et la maîtrise des coûts d'exploitation. On cherche donc à déceler tout signe avertisseur de changement dans le comportement de l'ouvrage, ce qui amène à s'intéresser d'une part à l'apparition de phénomènes nouveaux et d'autre part aux évolutions lentes liées au vieillissement. Il faut garder en mémoire que, passée la première épreuve de la mise en eau et en dehors d'événements exceptionnels tels que crues et séismes, la rupture d'un barrage en exploitation est toujours précédée de signes avertisseurs.

Enfin, un dernier objectif, commun aux deux phases ci-dessus est le retour d'expérience pour l'ingénierie, ce retour d'expérience étant valorisé autant sur les futurs projets que sur le suivi des autres barrages d'une même famille ('un phénomène constaté sur un barrage peut se produire sur un autre barrage semblable). Cela concourt à garantir, sur le long terme, d'une part la sûreté des ouvrages, et d'autre part la maîtrise des coûts par une maintenance qui peut être programmée et optimisée. L'aspect sécurité prime avant toute considération, mais il est évident que plus tôt une anomalie détectée, moindres en sont les conséquences en termes de travaux de coût d'exploitation [2].

3. Pathologies rencontrées au niveau des barrages

Les principales pathologies susceptibles d'atteindre un ouvrage doivent être surveillées, cela comprend :

- Apparition de zones humides sur le parement ou pied aval,
- Apparition ou évolution de fuites, y compris dans la zone aval du barrage,
- Obstruction des vannes ou des seuils par des corps flottants,
- Défaut de fonctionnement ou d'étanchéité de vannes,
- Obstruction du coursier de l'évacuateur de crue par de la végétation, des éboulements,
- Etat des appareils d'auscultation.

3.1. Barrages en remblais

- Fuites localisées avec éventuellement entrainement de grains du sol.
- Apparition de bourrelets et /ou fissures en crête ou sur le parement aval (amorces de glissements).
- Tassement, en particulier en crête ou au contact d'ouvrages en béton.
- Creusement de ravines sur les parements amont et aval.
- Points bas sur la crête du remblai.
- Désordres sur la protection anti-batillage (pierres déplacées, désagrégées....)
- Végétation abusive sur les talus et près du pied aval.
- Corrosion et rupture des fils des cages d'ouvrages en gabions.
- Dégâts dus aux animaux fouisseurs

3.2. Barrages en béton ou en maçonnerie

- Dégradation joints en parement amont.
- Décollement de l'enduit amont.
- Fissures (ouvertes ou fermées, avec ou sans fuites, traversantes ou non).
- Dépôts de calcite.
- Apparition ou évolution de zones de fuites ou de suintements.



Figure II.1. *Apparition des zones humides sur le talus aval d'un barrage en terre.*



Figure II.2. *Apparition des zones humides sur le parement aval d'un barrage en maçonnerie.*



Figure II.3. *Apparition des sources à l'aval du barrage.*



Figure II.4. *Glissement du talus amont d'un barrage enterre.*

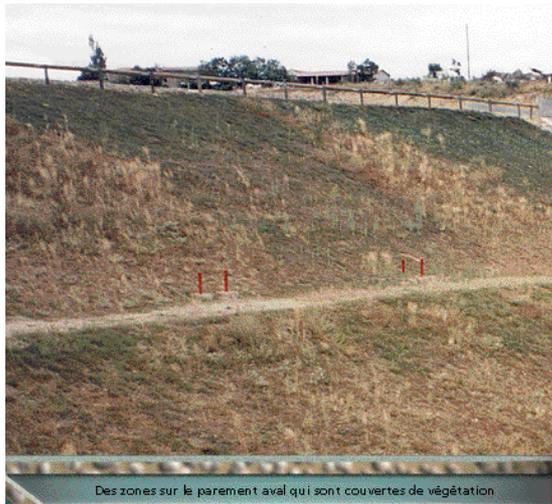


Figure II.5. *Présence de végétation sur le talus aval d'un barrage en terre.*



Figure II.6. *Erosion régressive sur un barrage enterre.*



Figure II.7. *Signes d'érosion régressive autour de l'ouvrage de prise.*



Figure II.8. *Conséquence d'une érosion régressive sur un barrage en terre, étape 1.*



Figure II.9. *Conséquence d'une érosion régressive sur un barrage en terre, étape 2.*



Figure II.10. *Conséquence d'une érosion régressive sur un barrage en terre, étape 3*



Figure II.11. *Fissures au niveau de la crête.*

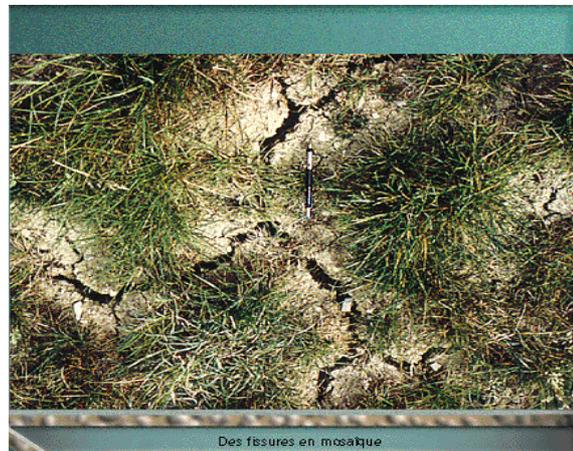


Figure II.12. *Des fissures en mosaïque.*



Figure II.13. *Fissures au niveau de la crête.*



Figure II.14. *Déformation du masque amont d'un barrage en terre.*



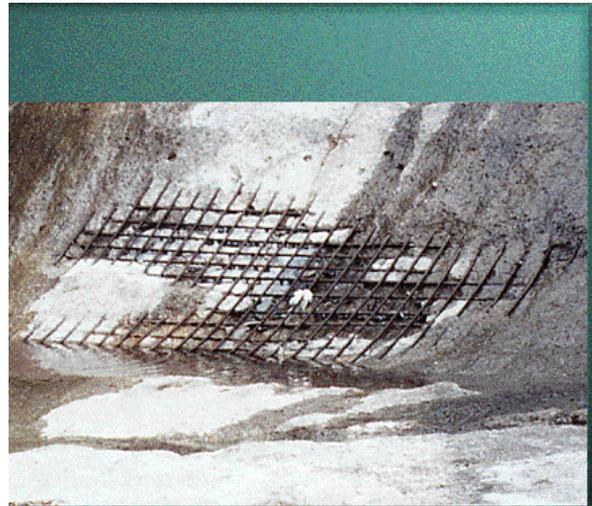
Figure II.15. *Dégradation du masque amont.*



Figure II.16. *Déchirure du masque amont.*



Figure II.17. *Erosion par les matériaux charriés et disparition de l'enrobage au niveau de l'évacuateur des crues.*



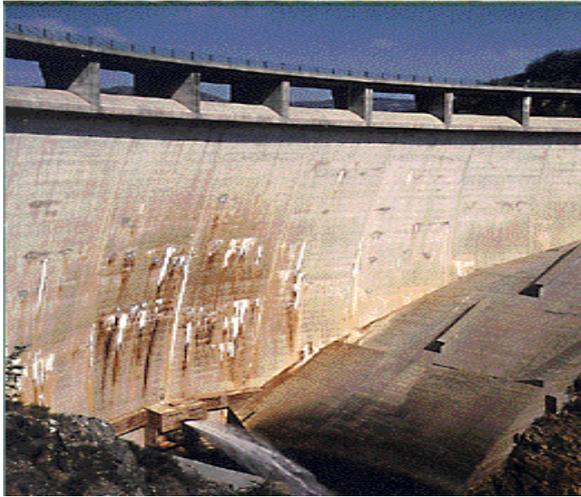


Figure II.18. *Dépôt de calcite au niveau du parement du barrage.*



Figure II.19. *Lixiviation du béton au niveau du parement du barrage.*

4. Concept global de l'organisation de la surveillance des barrages

La surveillance inclut trois composantes complémentaires :

- L'inspection visuelle dont l'objet est de déceler des anomalies perceptibles à l'œil,
- L'auscultation qui permet de mesurer l'évolution de certains paramètres et d'établir une analyse du comportement de l'ouvrage sur le long terme,
- Les essais périodiques de certains organes, les vannes en particuliers, dans différentes conditions de fonctionnement [2].

La figure 20 donne pour tout type d'ouvrage d'accumulation, un aperçu général des composantes de la surveillance et du déroulement des opérations qui lui sont attachées. Elle montre également les buts poursuivis. Les liens entre la surveillance et l'entretien, ainsi que la remise en état sont indiqués dans le détail. La surveillance d'un ouvrage d'accumulation fait conjointement appel aux tâches suivantes :

- L'exécution et l'interprétation de mesures d'auscultation concernant le comportement du barrage, de ses fondations et de ses environs,
- Les contrôles visuels de l'état de l'ouvrage d'accumulation (ouvrage de retenue, ouvrage annexes, fondations, environs),

- Les contrôles et les essais de fonctionnement des installations, notamment celles des organes de fermeture des vidanges et des évacuateurs de crue.

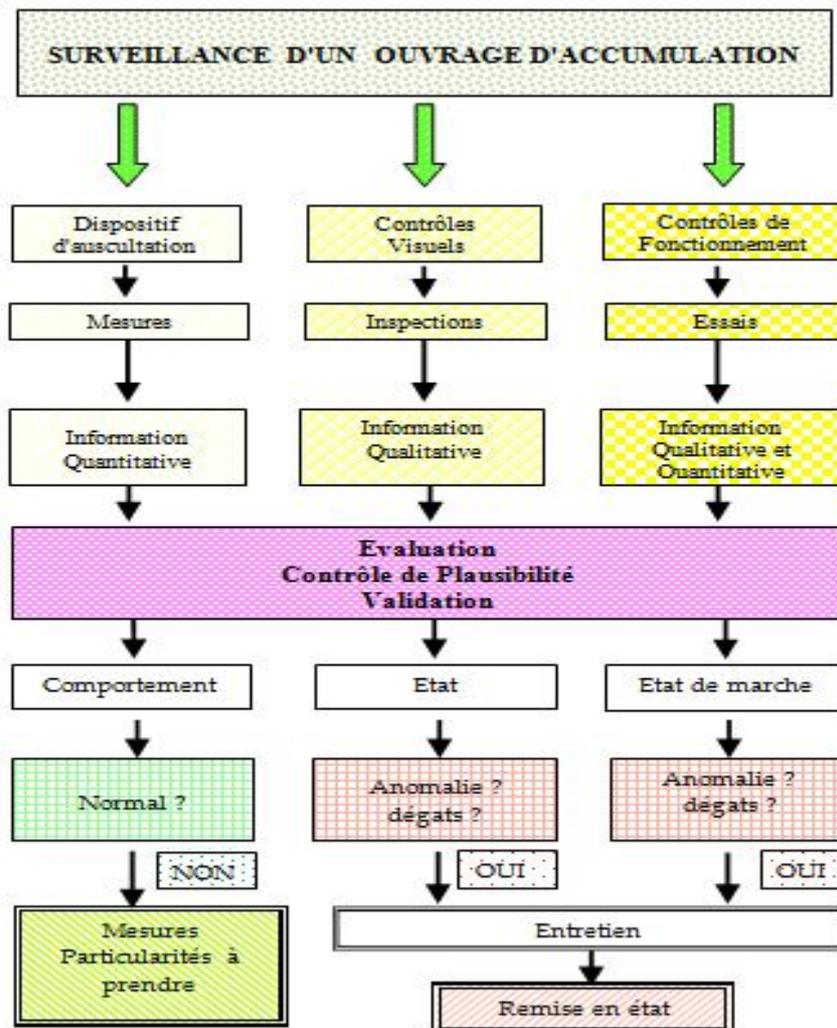


Figure II.20. Concept global de l'organisation de la surveillance et de l'entretien des barrages [70].

4.1. Inspection visuelle

L'inspection visuelle constitue le moyen le plus important de surveiller les barrages. Son objectif premier consiste à détecter tous phénomènes importants susceptibles de les affecter, et à en suivre l'évolution. C'est une source de données pour le suivi du comportement du barrage et l'évaluation de sa sécurité, elle doit suivre des procédures bien établies [28].

Les inspections visuelles ont un caractère essentiellement qualitatif et font appel au bon sens et à la compétence (connaissance des problèmes) de l'agent chargé de les assurer. Leur objectif principal est la détection de toute nouveauté, sans restriction, telle que :

- Nouveau point de fuite,
- Turbidité dans une fuite ou un drain,
- Taches d'humidité sur un parement aval,
- Nouvelle fissure, etc.... [2].



Figure II.21. *Présence des fuites au niveau de la galerie.*

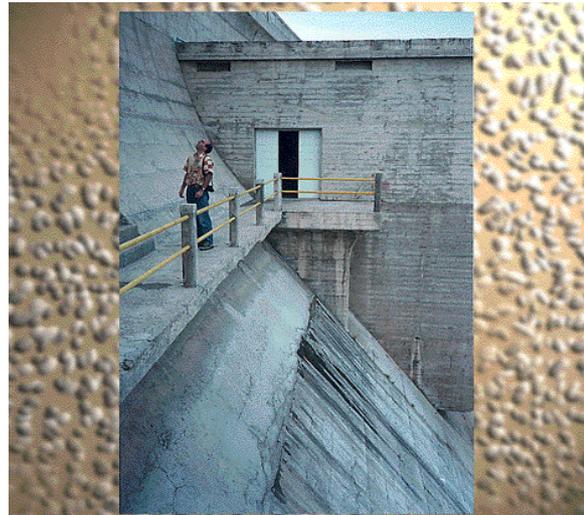


Figure II.22. *Inspection visuelle du barrage.*

La surveillance visuelle est une méthode qualitative, sous la responsabilité du propriétaire, qui intègre de très nombreux paramètres et qui permet de détecter la grande majorité des désordres et anomalies susceptibles d'affecter le barrage, ses ouvrages attenants et son environnement.

On distingue trois modes ou circonstances de visites de surveillance du barrage et ses abords :

- La surveillance visuelle de routine,
- La surveillance spéciale à l'occasion d'une circonstance ou suite à un phénomène extérieur particulier : crue, glissement de terrain, chute de pierres, avalanches séisme..... etc,
- La visite technique approfondie de l'ingénieur ou du cabinet d'ingénierie chargé, par le maître d'ouvrage, du suivi du barrage [71].

Ces contrôles sont essentiels et efficaces. En effet, il est reconnu que plus des deux tiers des événements extraordinaires ont été mis en évidence par des observations visuelles. Même aujourd'hui,

avec les moyens informatiques et les possibilités de l'automatisation, il est indispensable de procéder régulièrement à des inspections visuelles. Les mesures ne permettent pas de déceler des changements d'états. Ainsi, par exemple, l'apparition d'une zone humide ou d'une source à l'aval d'un barrage pour révéler une modification de l'écoulement souterrain, avant même que cela soit perceptible par les instruments [4].

Il importe que les personnes en charge de ses inspections aient une parfaite connaissance de l'ouvrage et soient impliquées sur une longue durée. Elles pourront ainsi déceler une évolution, ou au contraire une stagnation de certains des points observés.

L'inspection visuelle fournit des informations qualitatives sur l'état et le comportement du barrage et de ses fondations. Par ailleurs l'auscultation fournit des mesures quantitatives. Les deux, inspection et auscultation, sont réalisés de manière périodique et complémentaire voire simultanée. Parfois cependant des inspections spéciales sont nécessaires [27]..

Le principe de la visite s'articule autour des démarches ci-dessous :

- Préétablir un circuit
- Noter les points de passage
- Baliser les anomalies
- Faire des photos
- Quantifier les observations

4.2. Auscultation des barrages

4.2.1. Introduction

A coté de l'observation visuelle qui est l'élément majeur de la surveillance des barrages, l'auscultation permet une appréciation quantitative du comportement de l'ouvrage et de son vieillissement. Elle porte, essentiellement, sur des mesures de déplacements et déformations, de piézométrie, et de débits de fuite, couplées avec le suivi de la cote de la retenue. Le dispositif d'auscultation doit être adapté à chaque ouvrage, les mesures doivent être faites avec soin et à périodicité régulière, ces mesures doivent, enfin, être interprétées par des spécialistes [72].

L'auscultation des barrages regroupe tous les dispositifs permettant de mesurer des grandeurs physiques susceptibles d'évoluer dans la vie du barrage, de façon à mettre en évidence son comportement et les phénomènes évolutifs significatifs de son vieillissement [2].

Il s'agit d'une méthode quantitative basée sur la mesure d'instruments choisis et positionnés pour rendre compte de l'évolution du comportement de l'ouvrage. Le dispositif d'auscultation doit donc être conçu en fonction du type, des dimensions et des particularités techniques du barrage.

Le but recherché est de réunir des informations suffisantes, en nombre et en qualité, pour détecter en temps utile les mécanismes évolutif susceptibles de nuire à la sécurité de l'ouvrage [73].

Pour un barrage neuf, quelle que soit son importance, le dispositif d'auscultation doit être prévu et conçu dès l'avant-projet et mis en place pendant la construction [71]. Le dispositif d'auscultation est conçu pour permettre de juger rapidement le comportement du barrage et de ses fondations en regard des charges qui le sollicitent. Le choix des instruments et les techniques de mise en œuvre garantissent que les contrôles peuvent être effectués au cours des différentes phases de construction ainsi que de la phase de remplissage jusqu'à l'exploitation du barrage, en vue de pouvoir détecter rapidement tout comportement anormal.

De manière générale, deux paramètres principaux sont à surveiller : la stabilité et l'étanchéité.

La stabilité est assurée par la digue (caractéristiques mécaniques des différentes zones de matériaux, pression interstitielle).

Le dispositif d'étanchéité comporte le système de drainage et le rideau d'injection.

Le dispositif d'auscultation d'un barrage doit être conçu pour contrôler les paramètres déterminants pour la sécurité de l'ouvrage ainsi que pour suivre le vieillissement. Il convient en particulier de s'assurer que les hypothèses prises en compte dans le projet de l'ouvrage restent bien vérifiées [74].

4.2.2. Conception générale du dispositif d'auscultation

A côté de l'observation visuelle qui est l'élément majeur de la surveillance des barrages, l'auscultation permet une appréciation quantitative du comportement de l'ouvrage et de son vieillissement. Elle porte, essentiellement, sur des mesures de déplacements et déformations, de piézométrie, et de débits de fuite, couplées avec le suivi de la cote de la retenue. Le dispositif d'auscultation doit être adapté à

chaque ouvrage, les mesures doivent être faites avec soin et à périodicité régulière, ces mesures doivent, enfin, être interprétées par des spécialistes [72].

Le dispositif d'auscultation est un système de mesures judicieusement conçu permettant de juger, par le suivi de paramètres représentatifs, le comportement du barrage et de ses fondations en regard des charges qui les sollicitent. Il doit aussi être en mesure de livrer des informations relatives au milieu environnant.

Le dispositif d'auscultation a entre autres les objectifs suivants :

- Exécuter des contrôles pendant la construction et le premier remplissage.
- Exécuter des contrôles pendant l'exploitation.
- Disposer de renseignements complémentaires en cas d'anomalie de comportement.
- Compléter et améliorer les connaissances de l'ingénieur (recherches techniques ou scientifiques).
- Il est primordial d'apporter un soin particulier au choix des instruments de mesure et à leur mise en place afin de garantir une excellente fiabilité des mesures et une interprétation correcte des résultats [41].

L'auscultation des barrages regroupe tous les dispositifs permettant de mesurer des grandeurs physiques susceptibles d'évoluer dans la vie du barrage, de façon à mettre en évidence son comportement et les phénomènes évolutifs significatifs de son vieillissement [2].

Il s'agit d'une méthode quantitative basée sur la mesure d'instruments choisis et positionnés pour rendre compte de l'évolution du comportement de l'ouvrage. Le dispositif d'auscultation doit donc être conçu en fonction du type, des dimensions et des particularités techniques du barrage.

Le but recherché est de réunir des informations suffisantes, en nombre et en qualité, pour détecter en temps utile les mécanismes évolutifs susceptibles de nuire à la sécurité de l'ouvrage [73].

Pour un barrage neuf, quelle que soit son importance, le dispositif d'auscultation doit être prévu et conçu dès l'avant-projet et mis en place pendant la construction [71]. Le dispositif d'auscultation est conçu pour permettre de juger rapidement le comportement du barrage et de ses fondations en regard des charges qui le sollicitent. Le choix des instruments et les techniques de mise en œuvre garantissent que les contrôles peuvent être effectués au cours des différentes phases de construction ainsi que de la

phase de remplissage jusqu'à l'exploitation du barrage, en vue de pouvoir détecter rapidement tout comportement anormal.

De manière générale, deux paramètres principaux sont à surveiller : la stabilité et l'étanchéité.

La stabilité est assurée par la digue (caractéristiques mécaniques des différentes zones de matériaux, pression interstitielle).

Le dispositif d'étanchéité comporte le système de drainage et le rideau d'injection.

Le dispositif d'auscultation d'un barrage doit être conçu pour contrôler les paramètres déterminants pour la sécurité de l'ouvrage ainsi que pour suivre le vieillissement. Il convient en particulier de s'assurer que les hypothèses prises en compte dans le projet de l'ouvrage restent bien vérifiées [74].

L'auscultation d'un barrage dépend de nombreux paramètres tels que le type d'ouvrage, son âge, ses moyens de réalisation et son environnement.

Chaque barrage est unique dans son comportement, il est donc nécessaire d'adapter les moyens d'auscultation à ce dernier en fonction de sa configuration et de ses pathologies. Si chaque ouvrage a un système d'auscultation qui lui est propre, pour chaque type d'ouvrage, on distingue un matériel d'auscultation qu'il est préférable d'utiliser.

4.2.3. Raisons d'être d'un dispositif d'auscultation

Le dispositif d'auscultation est une composante essentielle d'une surveillance adéquate d'un ouvrage d'accumulation. Il est donc incontournable et son étude se fait déjà au stade du projet. Il doit permettre de mesurer de manière fiable, c'est-à-dire contrôlable, les paramètres nécessaires à l'évaluation du comportement de l'ouvrage de retenue et de ses fondations en regard des charges qui le sollicitent. La fiabilité implique la mise en œuvre de différentes méthodes permettant de vérifier par des moyens indépendants les mesures. On parle alors de redondance du système d'auscultation.

La conception du système d'auscultation dépend bien entendu des caractéristiques propres de l'ouvrage : son type, mais aussi ses particularités géométriques et géologiques, les matériaux employés, l'époque de sa construction et les moyens techniques à dispositions. .

Ce système de mesure poursuit fondamentalement les objectifs suivants :

- Exécuter des contrôles pendant la construction et le premier remplissage,

- Exécuter des contrôles pendant l'exploitation,
- Détecter à temps toute anomalie du comportement,
- Disposer de renseignements complémentaires en cas d'anomalie de comportement (le cas échéant, la mise en place d'une instrumentation complémentaire peut s'avérer nécessaire),
- Compléter et améliorer les connaissances de l'ingénieur (recherches techniques ou scientifiques, prévisions analytiques, analyse de risque) [4].

4.2.4. Choix des profils d'auscultation

Il est matériellement impossible de suivre, en tout point, de la structure et de sa fondation, tous les paramètres physiques à tout instant. Le dispositif d'auscultation doit donc être conçu de manière à ne suivre que les paramètres significatifs du comportement en un nombre limité de points et selon des périodicités fixées à l'avance [14].

Dans le corps du barrage en remblai, un dispositif complet comprend plusieurs profil amont/ aval permettant d'évaluer la saturation du corps du barrage, et un ou plusieurs points de mesure de débit dont le rôle est de détecter l'apparition et l'évolution de zones de fuite. La fondation, les appuis, les rives et la plate forme aval doivent également être auscultés [77].

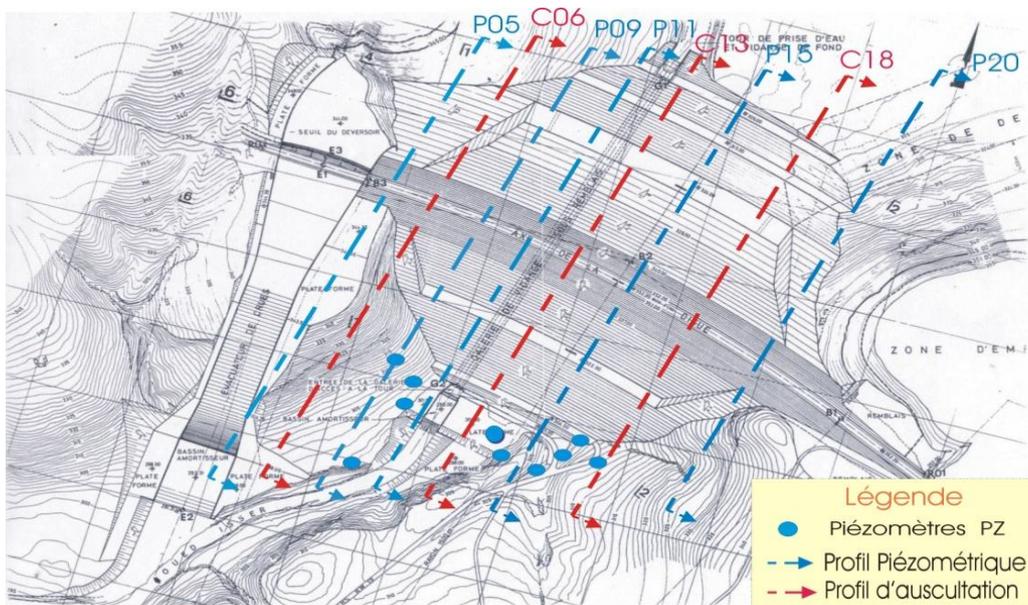


Figure II.23. Profils d'auscultation au niveau du Barrage Sidi Abdelli, Wilaya de Tlemcen, Algérie [70].

Le choix de l'emplacement des profils d'auscultation peut être motivé par les raisons suivantes :

- Les sections caractérisées par une hauteur importante du barrage et dont la fondation immédiate est relativement imperméable. Ceci peut générer d'importants excès de pression interstitielle à la base du barrage,
- Les sections caractérisées par la plus grande hauteur du barrage et peut donc accumuler les plus fortes déformations,
- Les sections caractérisées par une hauteur importante du barrage ainsi que par sa proximité d'un ancrage de génie civil (galerie de dérivation par exemple),
- Les sections caractérisées par interception d'une faille dont le comportement doit être suivi [78].

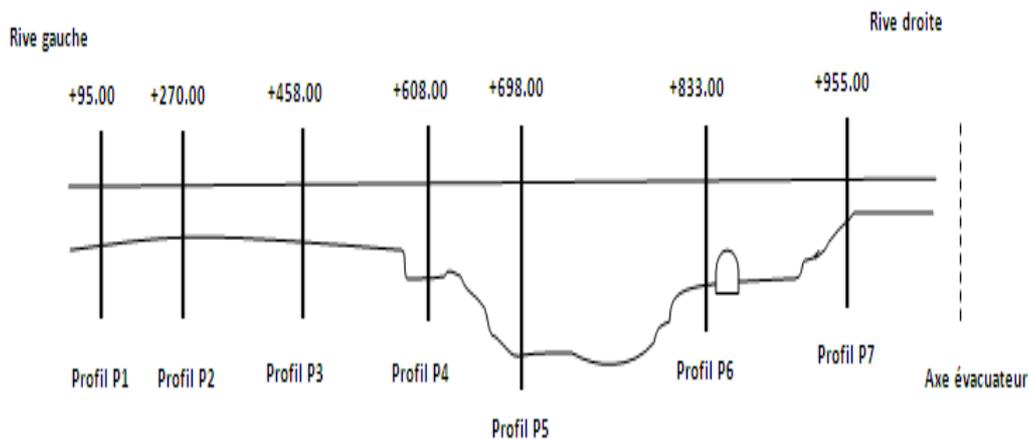


Figure II.24. Profils d'auscultations au niveau du barrage boughrara, Wilaya de Tlemcen, Algérie [79].

4.2.5. Choix du dispositif d'auscultation

Lors de la conception d'un dispositif d'auscultation, il est important de suivre quelques principes de base, entre autres :

- Le barrage et ses fondations constituent un ensemble. Toutefois, le dispositif d'auscultation doit permettre de distinguer clairement le comportement du barrage de celui de ses fondations et de ses environs.
- Le dispositif d'auscultation est adapté aux particularités et à l'importance de l'ouvrage d'accumulation.

- Il n'y'a pas de règle pour définir le nombre d'appareils de mesure nécessaires pour assurer un suivi satisfaisant du comportement ; il est préférable de disposer d'un nombre restreint d'instruments fiables, ce qui facilite aussi l'interprétation des mesures.
- On distingue, d'une part, les instruments permettant de suivre le comportement général de l'ouvrage et pouvant mettre en évidence une quelconque anomalie et, d'autre part, les instruments complémentaires devant faciliter l'explication d'un phénomène particulier.
- Un dispositif d'auscultation n'est pas un système figé. En effet, il est bon d'examiner périodiquement s'il satisfait toujours aux exigences et aux besoins ; si nécessaire, il est complété, adapté ou modernisé. Même si les instruments sur le marché sont de plus en plus nombreux et sont en constante évolution, il faut toutefois remarquer que les paramètres à mesurer restent les mêmes.

Signalons enfin qu'il faut prendre garde, en cas de changement ou de remplacement d'appareil de mesure, à assurer la continuité des mesures [4].

Le problème est de définir les types d'appareillage et leur implantation apportant une garantie satisfaisante pour atteindre cet objectif. En raison de la spécificité de chaque barrage, les dispositifs d'auscultation sont à étudier au cas par cas, le projecteur peut cependant s'appuyer sur quelques principes et sur le retour d'expérience des ouvrages en service [80].

Pour chaque ouvrage, la définition du dispositif d'auscultation, la nature des matériels, les moyens d'investigation, leur densité, leur répartition sur l'ouvrage et à l'extérieur de celui-ci, puis leur mise en place, doivent être assurés par des spécialistes avertis. Une rectification a posteriori est souvent impossible et des résultats inexploitable ou décevants son presque toujours le fait d'erreur de conception ou de montage.

La définition du dispositif d'auscultation sera donc établit par un expert, après une visite détaillée de l'ouvrage, une analyse de son comportement, des risques encourus et des travaux de confortement envisagés à plus ou moins long terme [50]. .

Dans tous les cas, le dispositif d'auscultation d'un barrage doit être déterminé en se posant les deux questions suivantes :

- Quels sont les phénomènes significatifs du comportement du barrage et de ses évolutions ?

- Comment mesurer ces phénomènes ? [81].

Les appareils de mesure doivent être simples d'emploi, suffisamment fiable et précis et apte à fonctionner pendant des dizaines d'année dans des conditions difficiles du fait de l'humidité, de la foudre..... [14].

Le nombre d'instruments, leurs types et leur emplacement dépendent des préoccupations soulevées durant la conception et la construction de l'ouvrage, ainsi que l'expérience et du sens commun, il n'y a pas de lignes directives particulières.

En règle générale, le système d'instrumentation est conçu en tenant compte des facteurs suivants :

- La fonction ou la nécessité d'un instrument particulier,
- Sa fiabilité, tant à court, qu'à long terme,
- Son besoin d'entretien limite,
- Sa compatibilité avec la construction,
- Son faible coût et la facilité avec laquelle il est installé,
- Sa simplicité,
- Sa robustesse [82].

Le choix des appareils de mesure dépend des paramètres à observer, du mode de construction de l'ouvrage et des possibilités d'installation. Le choix doit être adapté à chaque cas spécifique. La priorité doit cependant être donnée aux instruments répondant aux critères suivants :

- Simples dans leur concept et leur exploitation (les mesures sont généralement effectuées par le personnel de l'exploitant).
- Robustes.
- Insensibles aux conditions environnementales : température, humidité, surtensions.
- Durables (la longévité des appareils doit être assurée surtout pour ceux qui sont directement intégrés dans le corps de l'ouvrage lors de la construction).
- Précis et fiables.
- Lecture facile.

Pour autant qu'ils ne soient pas noyés dans le corps de l'ouvrage, ils doivent être :

- Accessibles.

- Remplaçables fiablement (pour assurer la continuité des mesures)

Pour parer à des pannes ou défaillances, il est recommandé de prévoir des mesures redondantes de certains paramètres (par exemple, la mesure des déformations). En ce qui concerne la fiabilité des appareils de mesure, le taux de défaillance est très variable et dépend du type d'instrument. Il faut encore relever que la longévité d'instruments est inférieure à la durée de vie du barrage [4].

4.2.6. Instruments et moyens de mesure pour les barrages

On a intérêt à rechercher des grandeurs physiques directement mesurables, qui constituent d'ailleurs la réponse de la structure aux sollicitations qui lui sont appliquées. Il s'agit :

- Des mouvements et déplacements
- Des déformations et contraintes
- Des inclinaisons et rotations
- De la pression
- Du niveau
- Des charges et forces
- Des températures

Le dispositif d'auscultation mis en place doit permettre de mesurer des déformations, températures, des pressions interstitielles, des niveaux piézométriques et des débits. La détermination de certaines caractéristiques chimiques des eaux permet de compléter l'information.

Les tableaux 1 et 2 donnent les principaux paramètres qui doivent être relevés pour le barrage en béton et en remblai.

Dans le cas d'un système de mesure permanente, les informations sont utiles pour conduire une analyse à distance du comportement. Il n'est pas indispensable de prévoir la saisie automatique de tous les points de mesure. Il est recommandé de se limiter à quelques paramètres définis et caractéristiques. Ce système automatique peut être une aide pour les points difficiles d'accès.

Tableau II.1. *Instruments et moyens de mesure pour les barrages en béton [70].*

Type de mesure	Instruments et moyens de mesure
Déformation de la structure	<ul style="list-style-type: none"> - Pendule direct - Pendule inverse - Alignement par fil - Extensomètre - Réseau extérieur (Nivellement, Polygonale, Mesures d'angle Mesures de vecteur, Alignement)
Mouvements particuliers (fissures, joints)	<ul style="list-style-type: none"> - Fissuromètres - Vinchon
Températures dans le corps du barrage	<ul style="list-style-type: none"> - Thermomètre - Thermomètre électrique
Sous –pressions au contact béton –fondation	<ul style="list-style-type: none"> - Relevé de niveau par câble à témoins - Manomètre - Piézomètre - Cellule de pression hydraulique ou électrique
Débits de percolation et de drainage	<ul style="list-style-type: none"> - Déversoir - Mesure volumique - Venturi
Chimie des eaux de fuite	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse au laboratoire

Tableau II.2. Instruments et moyens de mesure pour les barrages en remblai [70].

Type de mesure	Instruments et moyens de mesure
Déformations horizontales et déformations verticales (tassement)	<ul style="list-style-type: none"> - Géodésie (Réseau extérieur, Nivellement, Polygonale, Mesure d'angle, Alignement) - Inclinomètre - Tassomètre - Repère de tassement hydraulique
Ligne piézométrique	<ul style="list-style-type: none"> - Piézomètres
Pressions interstitielles	<ul style="list-style-type: none"> - Manomètre - Cellules de pression
Débits de fuite et de drainage	<ul style="list-style-type: none"> - Déversoir - Mesure volumique - Venturi
Température de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> - Thermomètre
Turbidité	<ul style="list-style-type: none"> - Turbidimètre
Chimie des eaux de fuite	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse au laboratoire
Température dans le corps du remblai	<ul style="list-style-type: none"> - Thermomètre électrique

4.3. Essais périodiques

L'entretien a pour but premier de prévenir tout défaut de fonctionnement et de réparer les dégâts éventuels. De cette manière, les travaux nécessaires de réfection, de répartition ou de remise en état pourront être entrepris [70].

Ils concernent les vannes et clapets, les capteurs et leurs liaisons avec les portes de commande, les moyens d'alimentation en énergie. La périodicité des essais doit être précisément définie ainsi que

leurs conditions de réalisation. La sécurité en aval du barrage doit être prise en compte lorsque les essais conduisent à relâcher des volumes d'eau significatifs. On vérifie également le fonctionnement en mode dégradé, alimentation de secours en énergie, commande manuelle [2].

Le contrôle des organes d'évacuation ou de vidange constitue une activité primordiale pour la sécurité des barrages. Ces organes d'évacuation jouent le rôle de "soupape de sûreté" pour les différents ouvrages de retenue auxquels ils sont rattachés. L'historique des accidents de barrages nous apprend que leur non-fonctionnement, ou leur mauvais fonctionnement, sont responsables d'une part prépondérante de ces accidents. Le contrôle des organes d'évacuation est constitué de deux activités majeures et complémentaires, qui peuvent se dérouler de manière simultanée ou en des périodes différentes. Il s'agit de l'inspection des organes d'évacuation, et des essais de fonctionnement, ces derniers étant partiels ou complets [28]. Les parties mobiles (vannes) sont régulièrement testées et, en règle générale, les essais de fonctionnement sont faits une fois par an au minimum. Les essais de vannes sont faits avec lâchure et effectués à retenue [4]...

Les dispositifs de vidange doivent être manœuvrés au minimum une fois par an.

Les mesures de protection suivantes doivent être respectées ;

- Assurer la propreté des organes (vanne, accessoires) ;
- Appliquer périodiquement des couches de peinture protectrice ;
- Veiller à l'entretien mécanique tel qu'habituellement défini pour le matériel électromécanique (huilage, graissage) [6].

Au cours des visites techniques, une inspection complète avec manœuvre des organes hydrauliques est réalisée.

Il est important de contrôler attentivement les éléments suivants :

- Les organes mobiles de l'évacuateur de crues.
- Les vannes de vidange et celles de prise d'eau.
- Les appareils d'auscultation : vérification de leur bon fonctionnement ainsi que du mode opératoire utilisé par l'agent responsable de leur relevé .



Figure II.25. Equipements hydromécaniques concernés par les essais périodiques, barrage

Sidi Abdelli, wilaya de Tlemcen [70]

5. Programme et fréquences des mesures

La sécurité des barrages en exploitation repose essentiellement sur leur surveillance permanente, qui est définie cas par cas mais comprend toujours les aspects généraux suivants :

- **Les visites périodiques ordinaires**, effectuées régulièrement (périodicité de 1 jour à 1 mois selon les cas) par l'exploitant lui-même, en vue de détecter les anomalies évidentes,
- **Les visites annuelles décennales** intéressent l'ensemble de l'ouvrage, y participent des représentants de l'autorité de tutelle et tous les spécialistes nécessaires, en particulier, les visites décennales impliquent en principe la vidange du réservoir et la visite des parties normalement immergées du barrage, devant les difficultés d'application de cette règle, notamment en matière de pollution, la visite subaquatique par soucoupe ou caméra téléguidée est maintenant acceptée, ces visites sont l'occasion de vérifier le bon fonctionnement des organes de sécurité, notamment les vannes [75].

Les mesures seront réalisées plusieurs fois par an tout au long de la vie du barrage. Une attention particulière sera portée aux mesures effectuées pendant la construction du barrage, à la première mise en eau et à la première vidange [76].

Le programme de mesures doit être adapté aux dimensions de l'ouvrage. Il sera aussi fonction du niveau de la retenue (on peut faire une distinction entre retenue abaissée ou pleine), la nature du

comportement de l'ouvrage (situation normale ou anormale). Des mesures ponctuelles doivent aussi être effectuées suite à un évènement extraordinaire, comme un séisme, une crue. Par ailleurs, en cas d'anomalie ou de comportement particulier, le rythme des mesures est plus élevé.

Les fréquences de mesures les plus élevées (hebdomadaire, bimensuelle, mensuelle) concernent les paramètres représentatifs du comportement global de l'ouvrage (par exemple, les déformations mesurées ou moyen de pendules, les débits totaux de drainage, les pressions). Il s'agit notamment d'être en mesure de mettre rapidement en évidence une anomalie.

D'autres paramètres complémentaires (par exemple les déformations de joints, les mesures de rotation) sont relevés 1 à 2 fois par an.

Les campagnes de mesures géodésiques complètes, qui sont des mesures particulières, sont effectuées en règle générale tous les 5 ans. Il faut relever que dans le cas des digues, des mesures de nivellement et éventuellement de polygonales, sont exécutées une, voir 2 fois par an pour suivre l'évolution des déformations.

On sauvegardera au moins une valeur par jour (instantanée ou moyenne) pour les paramètres mesurés automatiquement (niveau du lac, température de l'air, paramètres de comportement, tels que déformations, pressions, débits de percolation) [70].

La fréquence de mesures est à adapter en fonction de leur complexité, de l'importance du barrage et des constatations faites lors de son diagnostic ou du suivi de son comportement [50].

Pour un barrage en service, la périodicité est dite normale. Dans une situation particulière (construction, premier remplissage, vidange et remplissage, travaux importants, la périodicité est resserrée. Celles-ci sont toujours spécifiques à l'ouvrage. Il est indispensable de réaliser des mesures de manière continue dans le temps. Plus encore que leur valeur absolue, c'est en effet l'évolution des phénomènes dans le temps qu'il est essentiel de connaître.

L'accélération d'un déplacement ou la montée brutale d'une pression d'eau sont des exemples de comportement qu'il est capital de déceler à temps. Il est également indispensable de réaliser des mesures de manière homogène dans le temps [77].

En définitive, la périodicité de ces mesures dépendra de trois facteurs :

- L'âge du barrage, étant entendu que la phase de « première mise en eau » dont le caractère crucial a déjà été signalé, doit bénéficier d'un protocole de suivi particulier et fin, élaboré et, en principe, dirigé par le maître d'œuvre à la construction.
- Le niveau de remplissage du barrage.
- L'apparition de phénomènes inquiétants.

L'ingénieur spécialiste chargé du suivi de l'ouvrage devra fournir toutes les recommandations permettant d'adapter le rythme des mesures au comportement du barrage.

a) Cas de la crue

Tous les barrages sont soumis aux sollicitations sévères que constituent les crues : cote du plan d'eau élevés, débit importants dans l'évacuateur, ruissellement de la pluie sur les parements. Une observation renforcée s'impose donc dans ces occasions, et à tout le moins lorsque l'on a constaté ou que l'on suspecte que l'évacuateur de crues a fonctionné.

L'observation pendant la crue est riche d'informations mais sera rarement possible car les retenues d'altitude étant situées plutôt en tête de bassin versant, la crue est généralement très brève, elle peut, de plus survenir de nuit. Si cela s'avère possible (crue longue de jour ou crue de fonte). On procède à une mesure sur les principaux appareils d'auscultation à lecture simple (cote du plan d'eau, débits de fuite et de drainage.....)

L'observation après la crue doit être systématique et réalisée le plus tôt possible. On essaie d'abord d'apprécier le niveau maximum atteint par le plan d'eau, en examinant les laisses de crues. L'attention sera particulièrement portée sur l'état de l'évacuateur de crues (indices d'érosion en particulier à l'aval du coursier, de mouvement ou de fissuration de structures, etc.), dont on inspectera en détail toutes les parties. Il convient aussi à cette occasion de faire une mesure sur tous les appareils d'auscultation, afin de détecter d'éventuelles évolutions rapides suite à la crue (augmentation d'un débit de fuite ou de drainage, hausse d'un niveau piézométrique, colmatage d'un drain, etc.)

Toutes ces observations sont consignées dans le registre du barrage et font, le cas échéant, l'objet d'un dossier photographique. Elles conduisent, si nécessaire, à des travaux d'entretien d'urgence ou à des travaux plus importants de réfection. Dans ce cas, il convient d'informer le service de contrôle.

b) Cas du séisme

On recommande une visite aussitôt après un séisme ressenti ou dont on a eu connaissance non loin du site. On procédera à l'inspection de toutes parties observées lors des visites de routine en notant les différentes éventuelles. On surveillera plus particulièrement l'apparition de fissures sur les organes en béton et de mouvements sur les parties en remblai ou déblai (glissement, tassements...). On s'assurera que les vannes fonctionnent correctement sur toute leur plage de manœuvre. En cas de signes suspects, on fera appel à l'ingénieur spécialiste pour une technique approfondie.

c) Cas de l'alea : crue torrentielle, chute de blocs, avalanche, glissement de terrain.

Après un événement de ce type, la première chose à faire est de vérifier si le phénomène a atteint ou concerne une partie de l'aménagement lui-même : barrage, cuvette, talus de déblais évacuateur de crues, prise d'eau, ouvrages ou locaux annexes, etc. Si tel est le cas, il faudra effectuer un relevé extrêmement précis des dégâts sur les parties apparentes du barrage.

Lors de la même visite, on veillera à caractériser le phénomène naturel en cause : date et l'heure d'occurrence ou de constat, nature du phénomène, limites maximales d'extension, volumes en cause, localisation et aspect de la zone de départ, etc. On n'hésitera pas à prendre beaucoup de photographies au cours de ce ou ces premiers contacts.

CHAPITRE III

AUSCULTATION DES BARRAGES ET MESURE DES PARAMETRES DE COMPORTEMENT

1. Mesure des conditions et des charges extérieures

Les charges directes (en particulier la poussée hydrostatique) sont celles qui agissent directement sur l'ouvrage, quant aux conditions extérieures, elles reflètent les conditions atmosphériques (par exemple la température ambiante) sur le site.

La poussée hydrostatique étant une charge importante, les variations du niveau du plan d'eau doivent être relevées et enregistrées, même si le bassin reste vide la plupart du temps (comme c'est par exemple, le cas d'un bassin pour la protection contre les crues). La température de l'eau est également un indicateur à relever. Dans le cas où les dépôts de sédiments seraient importants (modification des charges, diminution marquée du volume utile, risque l'obturation des organes de vidange), il est nécessaire de procéder périodiquement au relevé de leurs niveaux.

Les conditions atmosphériques (température de l'air, pluviométrie, neige) sont également des données importantes. La température ambiante peut avoir une incidence, en particulier sur les déformations d'un barrage en béton.

Il est bon de consigner si les précipitations tombent sous forme de pluie ou de neige. Enfin, il faut relever que les précipitations et la fonte des neiges ont parfois une influence directe sur les infiltrations à travers le sous sol. Dans des cas précis, les conditions sismiques sur le site peuvent être enregistrées [70].

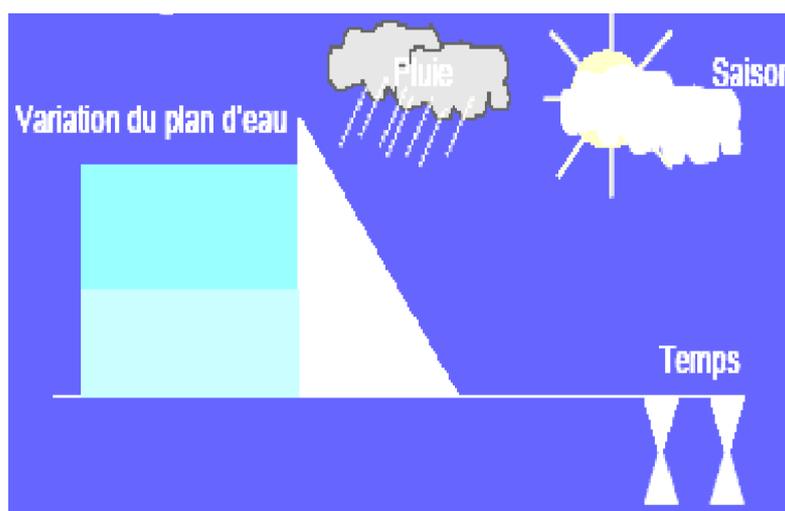


Figure III.1. Sollicitations agissant sur le barrage

Tableau III.1. *Instruments de mesures des charges et des conditions extérieures [70].*

Paramètres	Instruments
Niveau du plan d'eau	<ul style="list-style-type: none">- Echelle limnimétrique- Balance à pression- Manomètre- Câble avec témoin (sonore ou lumineux)
Niveau des sédiments	<ul style="list-style-type: none">- Bathymétrie
Température de l'eau	<ul style="list-style-type: none">- Thermomètre
Conditions climatiques	<ul style="list-style-type: none">- Thermographe, thermomètre- Pluviomètre
Conditions sismiques	<ul style="list-style-type: none">- Sismomètre, accélérographe

En ce qui concerne les sollicitations extérieures, elles peuvent être synthétisées en ce qui suit :

- La charge hydrostatique par la mesure du niveau du plan d'eau,
- La charge des sédiments,
- La température de l'eau,
- Les conditions climatiques (radiation du soleil, température de l'air, pluviométrie, hauteur de neige),
- Les conditions sismiques,
- La poussée de la glace.

Ces charges directes et les conditions extérieures vont engendrer :

- Des déformations et des déplacements,
- Des variations de température particulièrement dans le corps d'un ouvrage en béton,
- Des pressions (sous pressions, pressions interstitielles) et des fuites et des percolations à travers le barrage et les fondations [4]..

1.1. Mesure de la cote du plan d'eau

La mesure du niveau d'eau dans la retenue est indispensable pour permettre l'analyse du comportement de l'ouvrage. Cette mesure est très souvent gérée par l'exploitant de la retenue, pour qui, le volume accumulé derrière le barrage est une donnée importante.

Plusieurs systèmes permettent cette mesure. La plus fiable est sans conteste la balance à pression, dont la plage de mesure permet de couvrir toute la variation du niveau de la retenue avec une précision demandée de l'ordre de ± 10 cm. Le calibrage et la vérification de la balance à pression sont essentiels (redondance, avec d'autres modes de mesure). Parmi les autres moyens, on peut citer l'échelle limnimétrique, qui est une latte calibrée en bois ou en métal avec repères décimétriques, installée le long de la paroi externe de la tour de prise d'eau et visible de la crête du barrage. La précision de la mesure est de ± 1 cm. Il existe aussi la sonde à ultrasons qui détecte la surface par réflexion d'impulsions d'ultrasons.

Pendant un événement de crue, il doit être possible de suivre visuellement sur place l'évolution du niveau du plan d'eau, qui peut le cas échéant atteindre un niveau supérieur à celui du couronnement. A cet effet, il est impératif d'installer des repères et / ou des échelles limnimétriques avec marques visibles. Cette redondance permet aussi de pallier une défaillance du système de mesure automatique [4].

Cette mesure participe à trois objectifs :

- Améliorer la gestion de la retenue par connaissance continue des volumes d'eau disponibles,
- Participer à l'auscultation du barrage en permettant d'examiner l'influence de la cote de la retenue sur les mesures de certains instruments (en particulier débit et piézométrie),
- Enrichir les données hydrologiques par mesure des débits de crue [81].

Seul le dernier objectif justifie, dans certains cas, l'installation d'un limnimètre enregistreur. Dans tous les autres cas, et en particulier pour les besoins de l'auscultation, une échelle limnimétrique convient tout à fait pour la mesure de la cote du plan d'eau.

Deux solutions sont possibles :

- Si le barrage comporte des parties immergées verticales (tour de prise des barrages en remblai ou parement vertical des barrages poids), on y scelle une échelle continue couvrant l'amplitude des variations possibles du plan d'eau.
- Dans le cas contraire, on installe une série d'échelles de 1 m de hauteur, profondément scellées dans le sol et implantées selon les courbes de niveau.

Afin de résister à l'oxydation, ces échelles sont les plus souvent en tôle émaillée. La précision de la mesure est de ± 1 cm .

Par contre, la mesure de la cote du plan d'eau est un complément indispensable pour d'une part la gestion de la retenue et d'autre part l'interprétation des mesures présidentes. Elle se fait manuellement par une échelle limnimétrique scellée sur une partie fixe en béton (tour de prise, parement amont) ou automatiquement par différents type de limnigraphe ou limnimètres numériques. L'enregistrement en continu de la cote de la retenue est parfois une exigence du service de contrôle [2].



Figure III.2. Echelle limnimétrique installé au niveau du corps du Barrage Beni Bahdel, Wilaya de Tlemcen, Algérie [79].

1.2. Mesure de la température

La mesure de la température de l'air et de l'eau de la retenue est facile à mesurer. Ces paramètres interviennent indirectement dans la vérification de la sécurité du barrage. Pour les barrages en béton, par exemple, ce sont plutôt la répartition et la variation des températures à l'intérieur du barrage qui sont à relever.

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. Le thermographe permet la mesure et l'enregistrement en continu de la température ambiante. Le relevé se fait sur une bande de papier fixé sur un tambour.

Quant à la mesure de la température de l'eau, un thermomètre est 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 acquiert 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 [4].

a) Température de l'air et de l'eau

Il y a lieu de prendre en considération les charges thermiques extrêmes, l'influence sur la fonte des neiges. Les instruments y afférents sont facilement remplaçables avec possibilité de mesure automatique et d'enregistrement. On distingue :

- Le thermomètre normal,
- Le thermomètre électrique.

b) Température dans le béton

Charges thermiques internes influençant directement la déformation du béton.

Durant la phase de construction, il s'agit de suivre l'évolution de la température du béton pendant sa phase d'hydratation et du durcissement. Ensuite, en cours d'exploitation, il est utile de suivre les variations des températures afin de déterminer leurs incidences sur les déformations

1.3. Mesure des Précipitations

Les pluviomètres, les pluviomètres totalisateurs et les pluviographes permettent de connaître l'ampleur 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 aussi des données pour les études hydrologiques [4].

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

- **Le pluviomètre totaliseur** : 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). 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.

- **Les pluviographes** sont des appareils qui permettent de relever la distribution des pluies de manière mécanique ou électronique. Le principe d'auge 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.

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 considérable. Par ailleurs, un approvisionnement en énergie pour le relevé des mesures doit être garanti.

Le pluviomètre et le pluviographe sont des appareils pour un relevé direct. De son côté, le pluviographe se prête à la télétransmission des valeurs [83].

1.4. Niveau des sédiments

La mesure du niveau des sédiments déposés dans une retenue peut se faire à partir d'une embarcation, soit par sondage à la perche ou au fil lesté, soit par ultrasons. Pour dresser des profils et la topographie des dépôts, la position du bateau au moment de la mesure doit être déterminée. Elle est obtenue 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 [4].

1.5. Sismologie

De façon générale la répartition des accélérographes à trois composantes dans un ouvrage et à proximité se fait en fonction du type de barrage et des objectifs fixés. L'équipement doit être conçu de telle manière que suite à un tremblement de terre important l'on puisse retirer des renseignements relatifs au comportement dynamiques de la structure et aux mouvements effectifs le long des appuis. L'appareil extérieur permet d'obtenir des informations dans une zone située à proximité du barrage est non influencé par celui-ci [84].

2.. Paramètres significatifs et évolutifs des barrages

On a intérêt à rechercher des grandeurs physiques directement mesurables, qui constituent d'ailleurs la réponse de la structure aux sollicitations qui lui sont appliquées. Les principaux paramètres évolutifs qui peuvent conduire à des désordres, voire des ruptures, sont globalement répertoriées et recensés.

Le tableau III.2 résume les principaux paramètres significatifs qui doivent être relevés et les contrôles à effectuer pour suivre le comportement des barrages en béton et en remblai, ainsi que celui de leurs fondations [4].

Tableau III.2. Paramètres significatifs pour le suivi d'un ouvrage de retenue et de ses fondations [85].

Barrage en béton	Barrage en remblai	Fondations
Déformations de la structure	Déformations du corps de la digue	Déformations Mouvement des appuis
Mouvement particuliers (fissures, joint)	Mouvements particuliers (liaisons avec une structure béton)	Mouvement particuliers (fissures, diaclases)
Température dans le corps du barrage	Température dans le corps de la digue pour la détection de	

	percolation (éventuel).	
Sous-pression (au contact béton-fondation et dans le rocher)	Pressions interstitielles dans le corps du barrage en remblai et niveau piézométrique	Pressions interstitielles Sous-pression au contact béton-fondation Niveau piézométrique
Débit de fuites et de drainage, infiltration	Débit de fuites et de drainage	Débits de fuites, de drainage, résurgences
Chimie des eaux de percolation	Chimie des eaux de percolation	Chimie des eaux de percolation
Turbidité (éventuelle)	Turbidité	Turbidité

2.1. Tassements et déformations

Des tassements nettement plus importants que ceux qui ont été prévus de la crête du barrage en remblai sont à contrôler, ceci entraîne une diminution de la revanche [81].

.Dans les barrages en béton, il est essentiel de connaître les déformées horizontales et verticales de la structure. Selon la configuration du barrage (avec ou sans galeries et/ou puits), les points de mesure sont situés, à différents niveaux, à l'intérieur du barrage ou fixés sur son parement aval. Si possible, les lignes de mesure sont prolongées dans le rocher, pour connaître entre autre le déplacement au niveau de la fondation.



Figure III.3. *Tassement au niveau de la crête du barrage.*

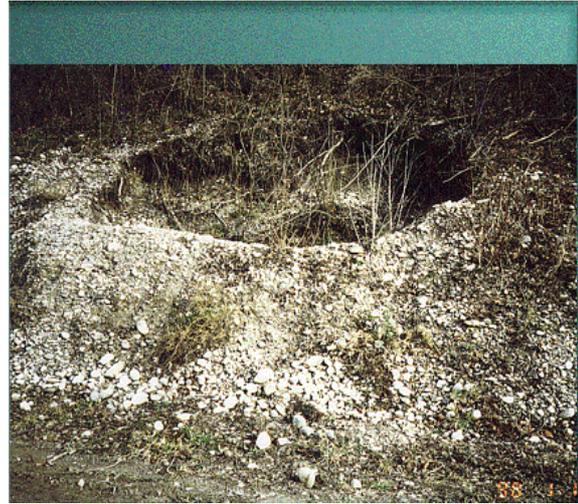


Figure III.4. *Effondrement au niveau du talus aval du barrage.*

2.2. Pressions interstitielles et niveaux piézométriques

Dans les barrages en remblai, un écoulement semblable à celui dans un sol se développe parce que les matériaux de construction utilisés sont plus ou moins perméables. Les écoulements à travers un barrage en remblai et sous celui-ci sont à l'origine de pressions interstitielles qui revêtent une importance primordiale pour la stabilité de l'ouvrage. Les infiltrations doivent donc être étroitement surveillées car chaque déviation de la normale témoigne d'une évolution des pressions interstitielles qui peut mettre en cause la sécurité de l'ouvrage de retenue [86].

Dans un barrage en remblai, il importe de contrôler l'évolution des pressions interstitielles (en particulier dans le noyau et les fondations). Les pressions interstitielles ne doivent pas dépasser les valeurs admises dans le projet. Cela peut se faire par la mise en place de cellules de pression pneumatiques, hydrauliques ou électriques. Le contrôle sera d'autant meilleur que le nombre de profils de mesure ainsi que le nombre de cellules par profil seront élevés. Ce mode de faire garantit une certaine redondance justifiée par un taux de défaillance des cellules souvent important [87].

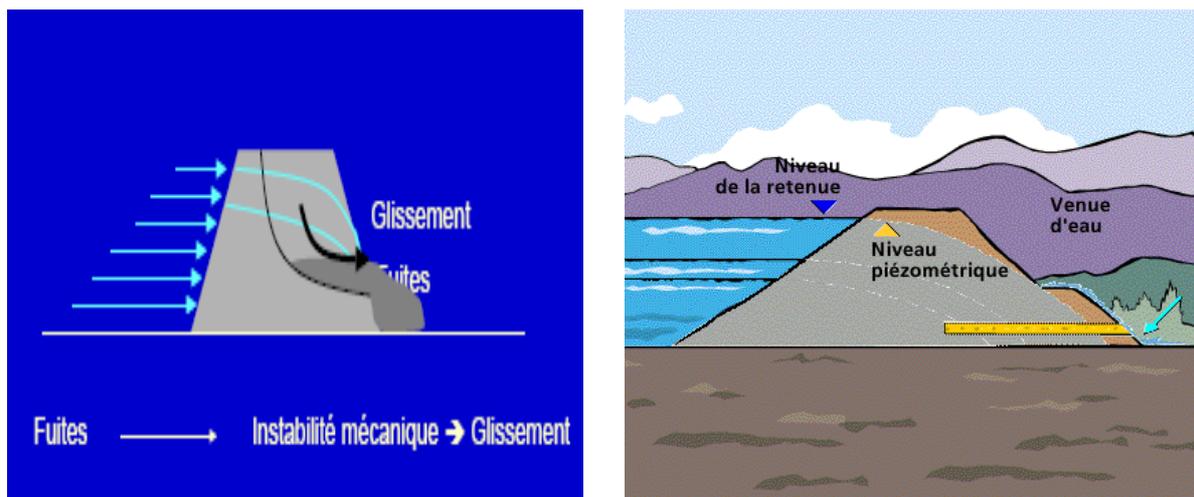


Figure III.5. Influence des infiltrations sur les barrages en terre.

2.3. Sous pressions

Les infiltrations sous un ouvrage de retenue conduisent à l'apparition de sous –pressions. Le relevé des sous –pressions est important, car elles ont surtout une incidence importante sur la stabilité des barrages –poids en venant s'opposer à l'effet stabilisant du poids propre. L'exécution d'un voile d'injection et parfois celle de forages drainant doivent permettre de limiter ces sous –pressions, c'est pourquoi l'efficacité de ces mesures doit être contrôlé. Les sous –pressions, dont les valeurs varient normalement en fonction du niveau du plan d'eau de la retenue, sont mesurées au niveau du contact béton –rocher et, dans certains cas, à différentes profondeurs en fondation.

Pour les sous –pressions variant d'amont vers l'aval, il convient de répartir plusieurs points de mesure le long de la base des ouvrages en béton, si possible au droit de plusieurs sections [88].

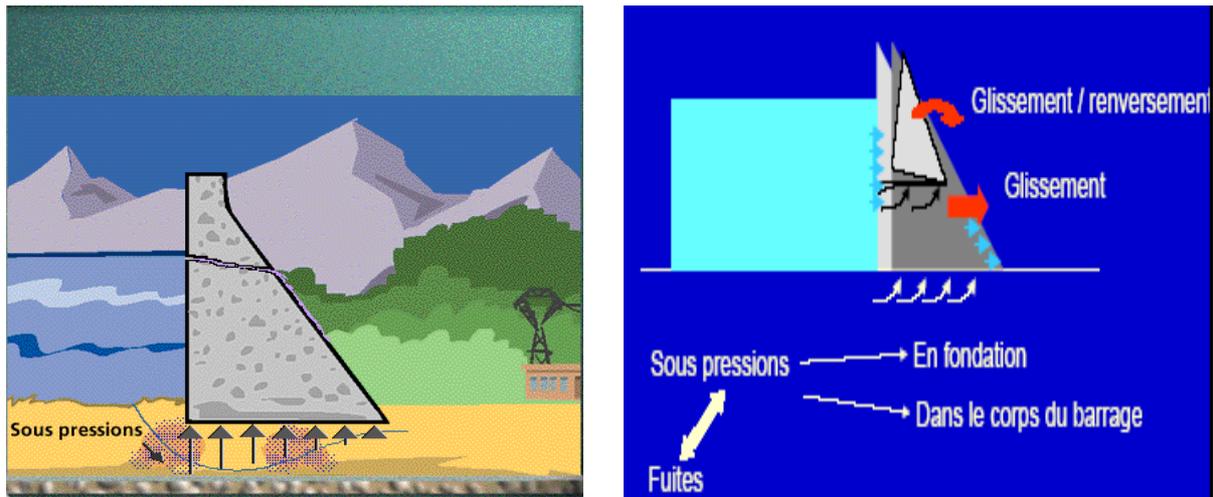


Figure III.6. *Sous pressions à la base du barrage.*

2.4. Débit de fuites et de drainage

La charge hydrostatique provoque des infiltrations à travers un ouvrage de retenue et dans ses fondations. Dans le cas des barrages en béton, les débits d'infiltrations restent généralement concentrés le long de zones les moins étanches du béton. Les écoulements à travers un barrage en remblai et sous celui-ci sont à l'origine de pressions interstitielles qui revêtent une importance primordiale pour la stabilité de l'ouvrage. Les infiltrations doivent donc être étroitement surveillées car chaque déviation de la normale témoigne d'une évolution des pressions interstitielles qui peut mettre en cause la sécurité de l'ouvrage de retenue.

Les débits d'infiltrations varient en fonction du niveau de la retenue. Ils peuvent aussi être influencés par les conditions atmosphériques et la fonte des neiges. Le débit total des venues d'eau donne une indication sur le comportement global des infiltrations. Les stations de mesures sont disposées de telle façon à effectuer des mesures de débits partiels selon zones prédéterminées. Ce procédé permet, en cas d'anomalie, de localiser la zone critique et de faciliter la recherche des causes.

Dans les barrages en béton, les eaux sont conduites dans les rigoles des galeries vers les stations de mesure de débit. Les eaux de percolation des barrages en remblai peuvent être récoltées dans des drainages situés à l'aval d'un noyau ou à l'interface d'une membrane étanche et du corps de l'ouvrage et dirigées vers la station de mesure. Le débit des eaux de percolation et de drainage à l'exutoire peut être mesuré par volumétrie (avec un récipient et un chronomètre), au moyen d'un déversoir calibré,

d'un venturi ou par la mesure du flux dans un tube. Une diminution du débit peut indiquer un colmatage des drains [32].

Pour les barrages en remblai comprenant des matériaux aisément solubles ou érodables ou qui sont fondées sur de tels matériaux, il est aussi souhaitable de procéder au contrôle régulier de la turbidité et à des analyses chimiques périodiques de l'eau. La mesure de la turbidité permet une appréciation concernant l'entraînement de particules fines, quant à l'analyse chimique, elle livre une information relative aux matières dissoutes (par exemple, celles issues du voile d'injection). Ces relevés, conjointement avec ceux des sous –pression, livrent une information relative à l'état de l'écran d'étanchéité et à l'efficacité des drainages.

Une diminution du débit peut indiquer un colmatage depuis la retenue ou aussi du système de drainage. Il est dès lors important de vérifier la répercussion sur les sous –pressions qui peuvent augmenter de manière excessive [87].

3. Mesure des paramètres géométriques

Les techniques modernes de construction et de conception permettent la réalisation de grandes structures d'ingénierie telles que les barrages. Ces structures sont constamment sujettes aux déformations et déplacements sous contraintes des charges internes et externes qui s'exercent sur leurs parois. Pour s'assurer de leur sécurité, prévenir des détériorations coûteuses, vérifier les critères de la construction et suivre leur comportement général, une évaluation précise de leurs déplacements dans le temps est nécessaire [89].

La mesure des déformations dans un barrage permet d'avoir une évaluation de sa stabilité et de sa sécurité. Par exemple, des déformations initiales trop grandes ou inattendues peuvent être les seules indications de problèmes potentiels dans le corps du barrage [90].

On peut distinguer plusieurs types de mesures de déplacements :

- Des mesures de déplacement absolu(de surface) de repères du barrage par rapport à des piliers d'observation fixes implantés dans des zones non susceptibles d'être affectée par des mouvements, on

peut réaliser des mesures altimétriques (tassement) et des mesures planimétriques (sens amont –aval et sens rive-rive) . Ces mesures mobilisent des compétences spécialisées, une fois ou deux par an.

- **Des mesures de déplacement internes (en profondeur)** du remblai, verticaux à l'aide de tassomètres, horizontaux à l'aide d'inclinomètres ou d'élongamètres, ces appareils ne concernent en général que les ouvrages importants,

-**Des mesures de déplacements relatifs**, le long d'un joint ou d'une fissure, quantifiés par des instruments le plus souvent installés à la demande (fissuromètre, VINCHON au droit des joints de la galerie de visite)) [81].

Pour les barrages en remblai, l'objectif est d'abord de connaître l'évolution des déformations verticales (tassement) et horizontales de l'ouvrage en crête, mais aussi si possible à divers niveaux, et en particulier les tassements de la fondation. En règle générale, les déplacements horizontaux des points sont déterminés par des mesures géodésiques telles que les mesures d'angles et de distance (mesure de vecteurs), alignement et polygonales. Quant aux déplacements verticaux (tassement ou soulèvements), ils peuvent être déterminés par des mesures de nivellement ainsi qu'au moyen de tassomètres ou de repères de tassement hydraulique. Le nivellement peut s'effectuer aux niveaux du couronnement et éventuellement d'une berme [4].

Il est essentiel de suivre l'évolution des tassements réels en fonction du temps, pendant et après la construction du remblai.

Au point de vue pratique, ces mesures permettent en outre :

- De prévenir des incidents en cours d'édification du remblai (variation brusque de la vitesse de tassement : remontée ou descente brutale des cellules dans le cas du tassomètre),
- De connaître le volume des matériaux ayant pénétré dans le sol de fondation (règlement objectif à l'entreprise du volume réellement mis en place) [91].

Les résultats des mesures fournies par l'instrumentation géotechnique et les méthodes géodésiques sont complémentaires pour déterminer le comportement d'un barrage en remblai [90].

3.1. Mesure du déplacement absolu(en surface)

La connaissance de déplacements absolus est nécessaire pour obtenir des indications sur l'évolutions des déformations à long terme plus particulièrement dans le cas d'un comportement inhabituel [92].

La géométrie absolue du barrage peut être suivie par topographie de haute précision. Des cibles sont fixées sur le parement aval et, parfois, en partie supérieure du parement amont. Leur position dans l'espace est relevée par topographie directe et triangulation depuis des plots de visées situés suffisamment loin du barrage pour ne pas être influencées par celui-ci. Le dépouillement exige de vérifier la fixité de certains plots de référence (par méthodes de dépouillement statiques). Ces mesures sont longues et coûteuses, elles ne sont réalisées qu'une à deux fois par an. Elles ne sont donc pas utilisables pour la détection de phénomènes rapidement évolutifs [32].

Les méthodes géodésiques permettent de déterminer les déplacements horizontaux et verticaux absolus de points sélectionnés (cibles ou bornes d'observations) situés à la crête ou sur les talus du barrage, par rapport à des points de références stables, en utilisant des techniques de positionnement terrestre ou par satellite [93].

Avec l'avancement actuel de méthodes géodésiques terrestres, les stations totales robotiques qui peuvent reconnaître automatiquement les cibles, sont communément utilisées pour déterminer les coordonnées dans les trois directions à des intervalles de temps présélectionnés [94].

Les mesures topographiques qui permettent de connaître les déplacements de repères matérialisées sur le barrage par rapport à des bases fixes situées autour de l'ouvrage : nivellement pour suivre les tassements, mesures d'alignement pour suivre des mouvements dans la direction amont-aval, planimétrie pour suivre les mouvements dans les deux directions horizontales [95].

Les procédés topographiques constituent un élément important de la surveillance car ils permettent de connaître non seulement les déformations de l'ouvrage mais également celles des fondations et des roches environnantes [50].

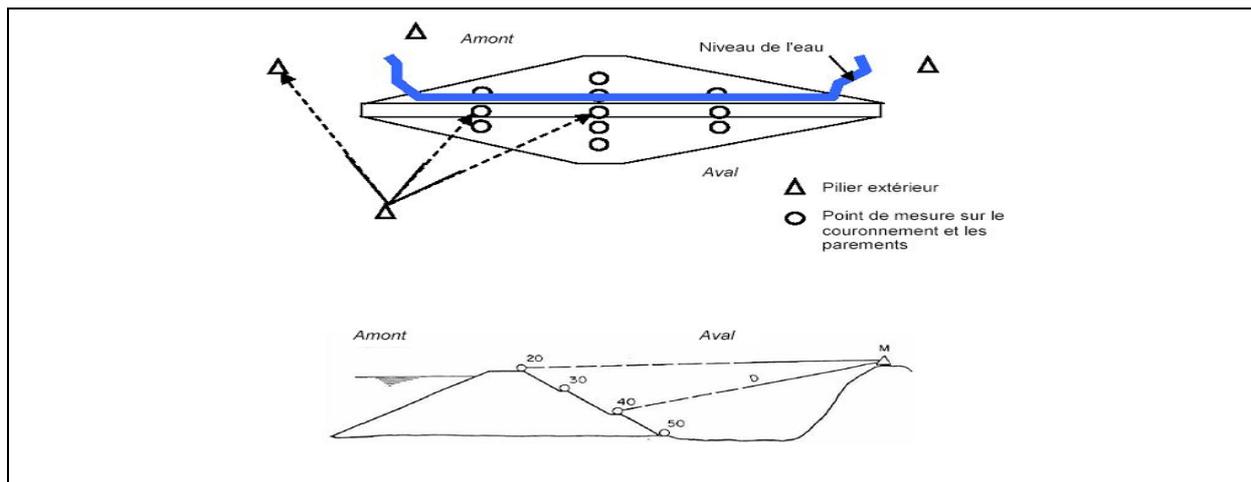


Figure III.7. Mesure de déformations verticales et horizontales à partir de points de mesures situées sur le parement [70].



Figure III.8. Borne sur talus aval servant aux mesures des déplacements, Barrage Sidi Abdelli, wilaya de Tlemcen.



Figure III.9. Visée de bornes d'observations pour mesure des déplacements.

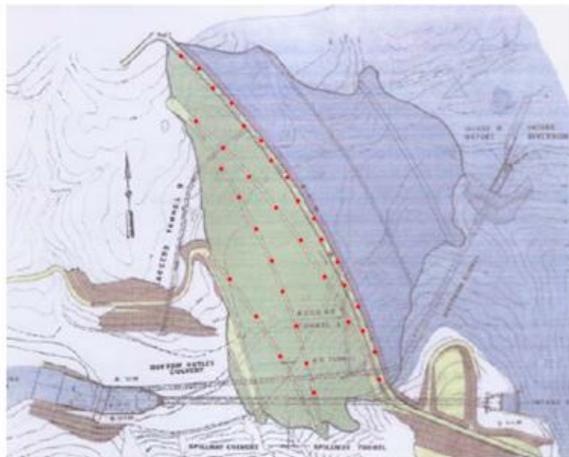


Figure III.10. Points de contrôle géodésique par piliers au sommet et en aval du barrage. [92].

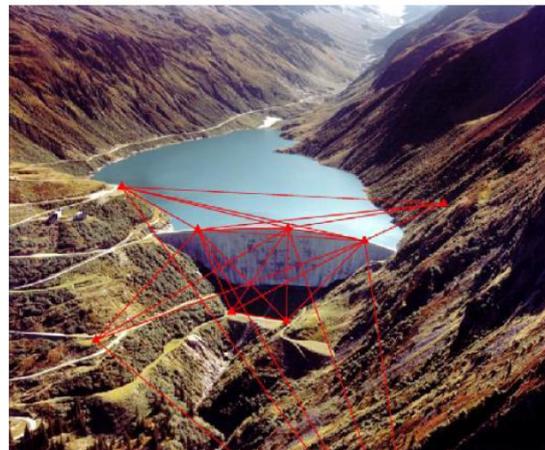


Figure III.11. Exemple d'un réseau géodésique. [92].

3.1.1. Nivellement

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 [92]...

Le nivellement est la méthode topographique la plus simple et la moins onéreuse qui permette d'assurer une surveillance en altimétrie.

Les mesures de nivellement concernent essentiellement les barrages en remblai.

Les repères de nivellement sont des bornes en béton de dimension suffisante, bien ancrées dans le remblai et munies d'une pointe sur leur face supérieure. Ils sont implantés sur le couronnement du remblai (bord amont ou aval). Pour les barrages de grandes hauteurs, on peut prévoir une deuxième ligne de repères sur le parement aval (par exemple sur une risberme).

Ces repères sont nivelés depuis des piliers d'observation placés sur les rives dans des zones stables. Ces piliers en béton, de dimension conséquente, sont munis de plaques de centrage pour fixation d'un niveau à bulle. Lors des mesures, on réalise systématiquement un cheminement aller et un cheminement retour. La précision dépend des distances de visée. Elle est en général de l'ordre du demi-centimètre et, dans de bonnes conditions, peut atteindre le millimètre [63]..

Le nivellement qui donne le déplacement vertical des repères installés sur les ouvrages est utilisé pour la mesure des tassements de barrage en remblai, complément indispensable de la planimétrie pour les grands barrages, le nivellement est souvent le seul suivi topographique des petits barrages, dont la hauteur ne justifie pas de mettre en place les lourds dispositifs de triangulation [2].

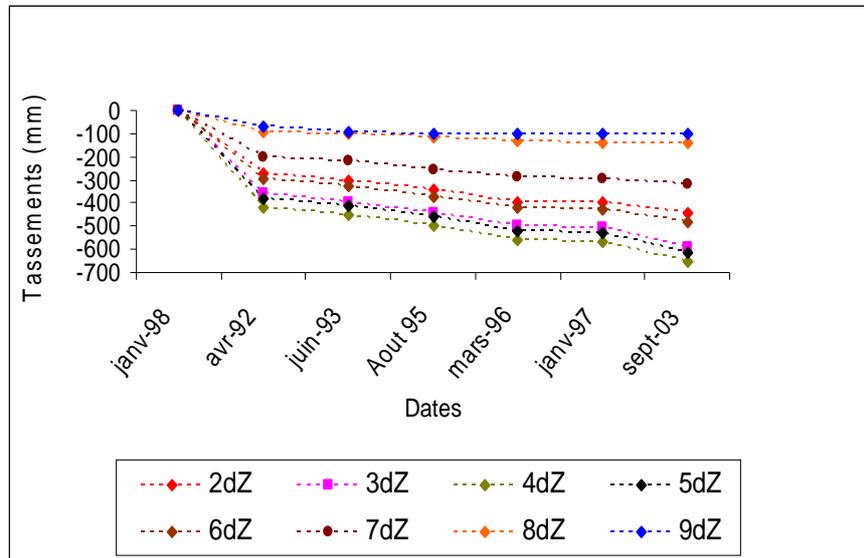


Figure III.12. Tassement du barrage Sidi Abdelli, wilaya de Tlemcen, Algérie [70].

3.1.2. Mesures d'alignement

Les mesures d'alignement sont faites sur des repères scellés sur le couronnement de l'ouvrage, à partir de piliers implantés sur les rives, dans l'alignement des repères. Ces mesures permettent d'obtenir le déplacement dans le sens amont-aval. Ces mesures dont la précision est de l'ordre du mm sont bien adaptées à des barrages rectilignes, de taille moyenne et de tous types [2].

3.1.3. Planimétrie

Il s'agit d'une mesure par triangulation à partir de piliers situés autour de l'ouvrage. Ces mesures exigent une très grande technicité du topographe (utilisation de méthodes de compensation d'erreurs et calcul des ellipses d'incertitude). L'incertitude des mesures, de l'ordre du millimètre dans les situations favorables, peut atteindre plusieurs millimètres pour les vallées larges [63].

Les méthodes de suivi en planimétrie nécessitent la mise en œuvre de moyens coûteux exploités par un personnel très spécialisé, aussi ne sont-elles recommandables que pour les grands ouvrages. Sur les

ouvrages modestes, on les remplacera souvent par des méthodes se suivi des déformations locales [50].

3.1.4. Le système de positionnement GPS

Les auscultations topographiques de barrages se font à l'aide d'instruments classiques tels que les niveaux de haute précision, les théodolites et les distances-mètres. Cette méthode donne des résultats de précision de l'ordre de ± 2 mm en altimétrie et mieux que ± 5 mm en planimétrie mais elle est dispendieuse et requiert un long temps d'exécution. Avec le complément de sa constellation, le système de positionnement GPS peut apporter des solutions aux lacunes de l'auscultation par mesures conventionnelles [89].

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 [82].

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 [92].

Le système de positionnement global par satellites (GPS) permet de déterminer la position des récepteurs GPS avec une précision de quelques millimètres vis-à-vis de points de références stables distants de plusieurs kilomètres [90].

Les méthodes classiques ont des faiblesses telles que la séparation des réseaux d'altimétrie et de planimétrie, la réquisition d'un matériel très lourd et de longs délais d'exécution. Elles sont aussi tributaires des conditions météorologiques (vent, neige, froid...). Tout ceci fait que ces méthodes sont très coûteuses d'utilisation.

Le système de positionnement GPS avec sa constellation complète peut potentiellement donner des solutions aux lacunes de l'auscultation par mesures conventionnelles. Parmi les avantages du GPS citons : la réduction des coûts d'opérations, le court délai d'exécution, la non-nécessité d'une intervisibilité entre les stations, les observations sont possibles même par mauvais temps, etc [96].

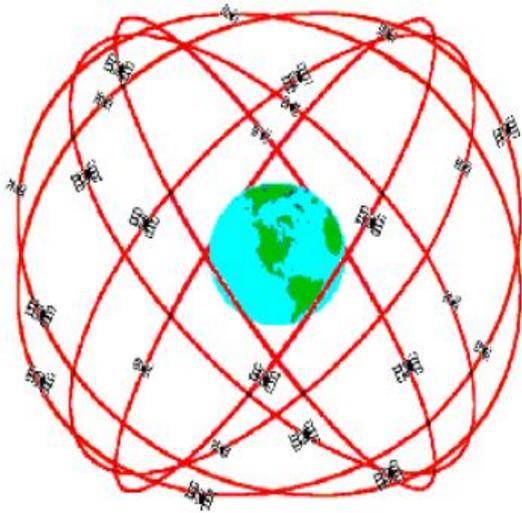


Figure III.13. Configuration des satellites [92].

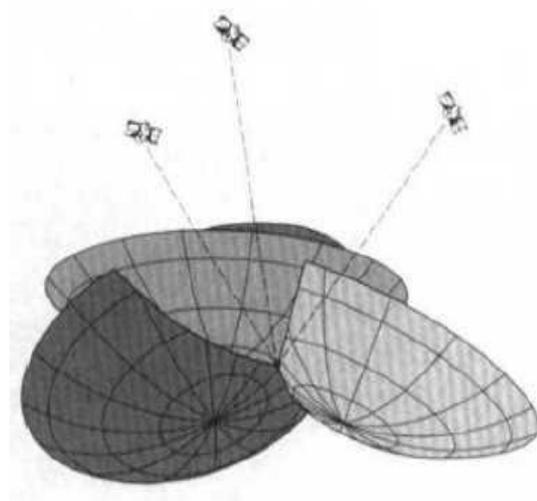


Figure III.14. Détermination de la position au moyen de l'intersection de sphères dans l'espace [92].

3.2. Mesure des déplacements internes (en profondeur)

Les déplacements internes peuvent être mis en évidence par des mesures effectuées tant en fondation que dans le corps de l'ouvrage ou à sa surface.

Les mesures peuvent être réalisées directement selon un ou plusieurs aspects :

- Mouvements en Z (tassement),
- Mouvement en X et Y.

Les déplacements peuvent également être détectés par des déplacements différentiels mis en évidence par des rotations.

On mettra donc en œuvre différents matériels adaptés aux phénomènes que l'on souhaite mesurer et aux types d'ouvrage à instruments (barrages en maçonnerie ou en terre) [50]. Elles permettent de découvrir des déplacements dans la masse des structures.

3.2.1. Tassomètres

L'appareil de mesure dans le cas de barrages en remblai est constitué d'un tube plastique vertical mis en place dans la digue au fur et à mesure de la construction. Des plaques en acier (ou des bagues métalliques) sont placées à des intervalles réguliers à l'extérieur du tube, solidaires du remblai et pouvant coulisser sur le tube. Une sonde à induction introduite dans le tube depuis la surface capte les

interférences électromagnétiques créées par la présence des plaques en acier. La distance est mesurée par rapport à l'arête du bord supérieur du tube. La précision demandée est de l'ordre de $\pm 1\text{cm}$ en phase d'exploitation, pour des longueurs pouvant atteindre 100 m. Cette mesure est toujours combinée avec un nivellement du couronnement [4].

Le tassomètre magnétique à points multiples est utilisé pour mesurer les déformations le long d'une verticale au-dedans d'un sol ou d'un ouvrage en terre.

L'appareil se compose d'un tube d'accès interne et d'un tube externe froncé en plastique, à l'extérieur de ceux-ci des anneaux magnétiques sont placés à différentes profondeurs. Le type d'ancrage au terrain des anneaux varie en fonction de l'installation (ressort à lames en forage ou plaques en remblai au cours de sa construction). Les anneaux magnétiques suivent les mouvements verticaux du terrain auquel ils sont ancrés.

Les lectures sont effectuées en déplaçant une sonde à détection magnétique dans le tube d'accès, la sonde détecte la position de chaque anneau en émettant un signal sonore. Le câble de la sonde mesure la profondeur des anneaux par rapport à la tête en surface [97].

Les tassomètres, hydrauliques ou électriques, sont utilisés pour mesurer les tassements qui se produisent dans le remblai durant sa construction, lors de la mise en eau du réservoir et pendant l'exploitation de l'aménagement. L'évaluation des données sur le tassement durant la construction s'avère utile pour comparer le comportement du barrage à celui d'autres projets construits avec des matériaux similaires [82].

Ces dispositifs présentent quelques inconvénients : d'une part leur inaccessibilité empêche toute réparation, ils doivent par conséquent être très robustes car ils supportent des charges considérables. Mais, même si leur durée de vie est limitée, leur intérêt est grand lors de la consolidation du remblai. La précision de ce système est de l'ordre du centimètre [90].

Le tassomètre magnétique a été conçu pour mesurer les déplacements de plusieurs points d'un forage. A chaque point à mesurer sont placées des bagues magnétiques entourant un tube PVC. Le tout est scellé au coulis de ciment bentonite. Les bagues suivent tout mouvement du sol et leur position est repérée à l'aide d'une sonde lumineuse qui réagit au passage d'un champ magnétique [98].

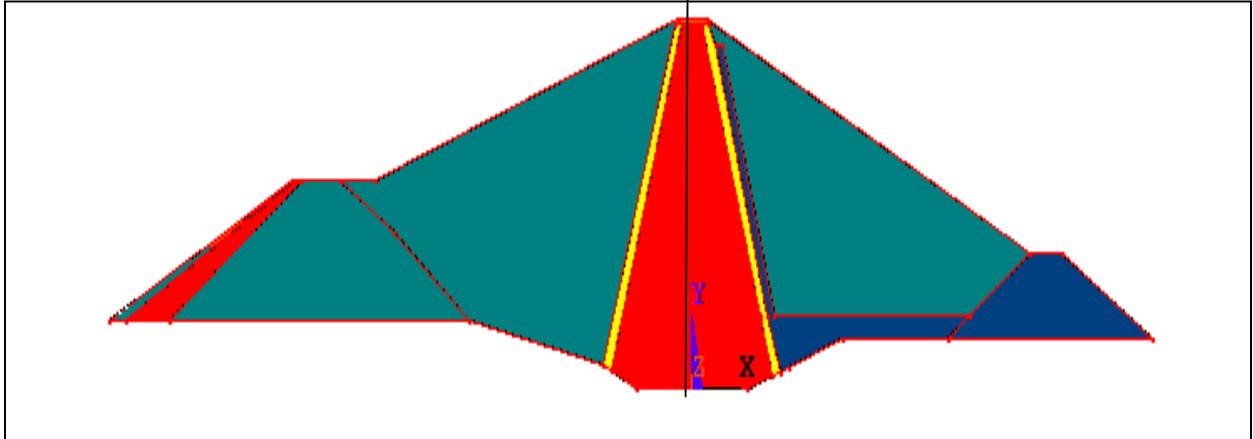


Figure III.15. *Tassomètre - noyau du barrage Bouhrara, Wilaya de Tlemcen, Algérie [79].*

3.2.2. Pendules

Les pendules sont un moyen précis de connaître les déplacements de l'ouvrage. On les classe selon deux catégories : les pendules directs et les pendules inversés. Pour les pendules directs, une masse est suspendue au bout d'un fil ancré sur la crête de l'ouvrage. Le pendule traverse le barrage sur sa hauteur jusqu'aux fondations où se trouve la masse. A l'aide d'une table de lecture placée au niveau des fondations, on peut mesurer les déplacements du fil par rapport au terrain naturel.

Le pendule inversé utilise le même principe mais le câble est ancré en fondation et la masse est remplacée par un flotteur en haut de l'ouvrage.

L'avantage de ce système est sa précision cependant assez compliqué à mettre en place, il est donc préférable de penser à son implantation dès la conception de l'ouvrage [99].

Le principe des pendules est de mesurer les déplacements horizontaux relatifs de 2 points superposés, grâce à un fil ancré d'un côté et libre de l'autre [70].

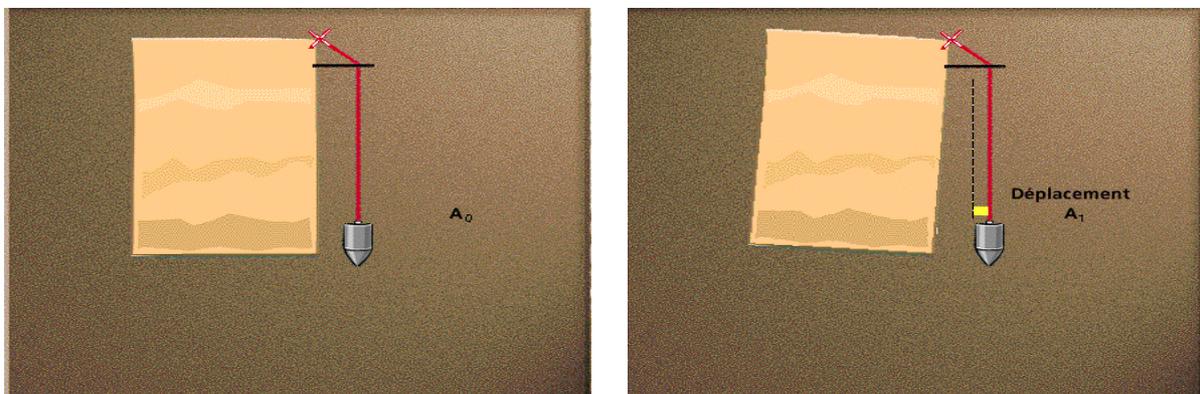


Figure III.16. *Mesure de déplacements par pendule [100].*

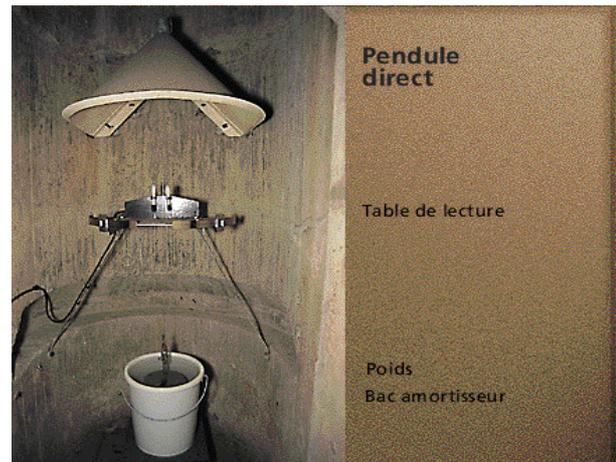
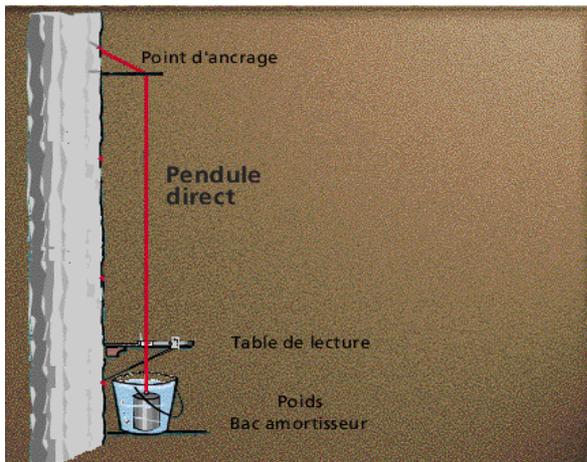


Figure III.17. *Mesure de déplacements par pendule direct [100].*

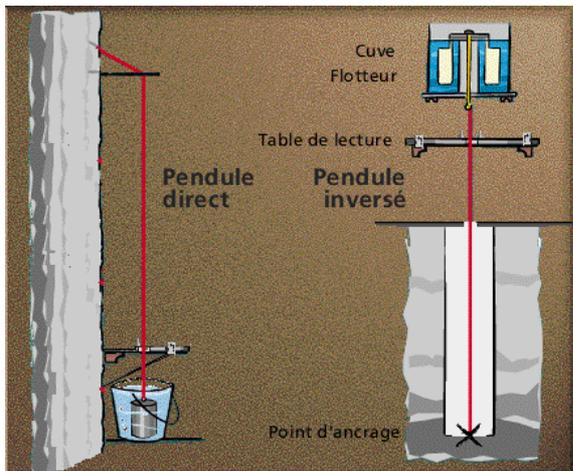


Figure III.18. *Schéma d'installation d'un pendule [100].*

Figure III.19. *Installation d'un pendule avec table de lecture dans une galerie [100].*

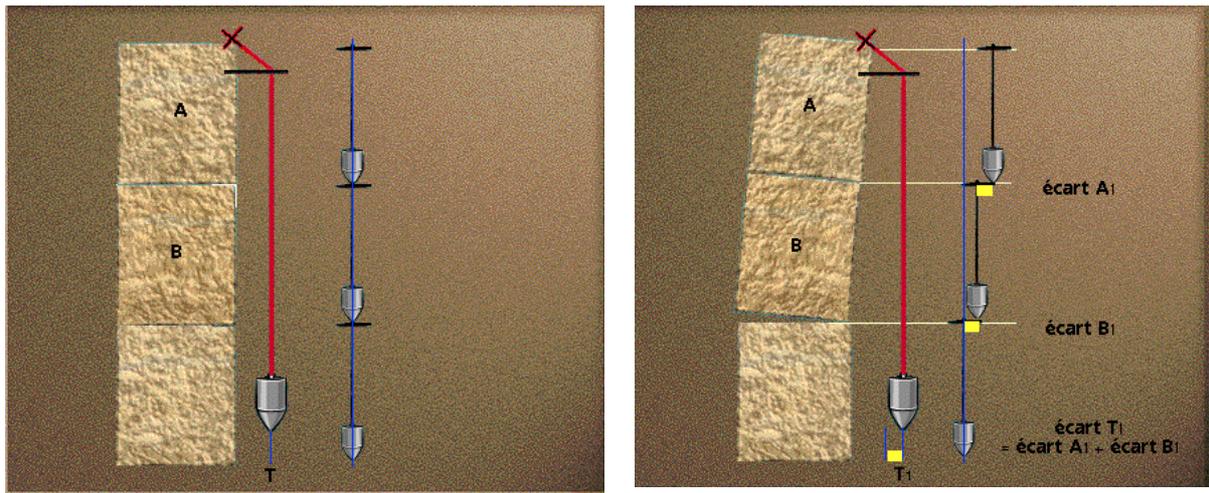


Figure III.20. *Mesure de déplacements horizontaux par paliers [100].*

Les pendules direct ou inversé équipés d'une table de lecture dite « à pointes de visées », assurent une précision de l'ordre de 1/10mm. Le pendule présente toutes les qualités exigées des appareils d'auscultation, on peut effectuer des lectures fréquentes, en toutes saisons. L'installation de plusieurs lignes de pendule, au stade de la construction, ne pose aucun problème, que se soit en puits ou en parements extérieurs. Ils peuvent également être installés sur de nombreux ouvrages existants où ils remplacent alors avantageusement les mesures topographiques. Le pendule est instrument facilement automatisable, mais dans ce cas, il est toujours recommandé de conserver des mesures manuelles aux fins de vérification [2].

Le coût de mise en œuvre d'un tel appareil est relativement élevé, dans la mesure où il nécessite la réalisation d'un forage de gros diamètre, rigoureusement vertical.

Mais sa rusticité et sa simplicité d'utilisation, et surtout l'information qu'il délivre avec précision, justifient largement son installation [50].

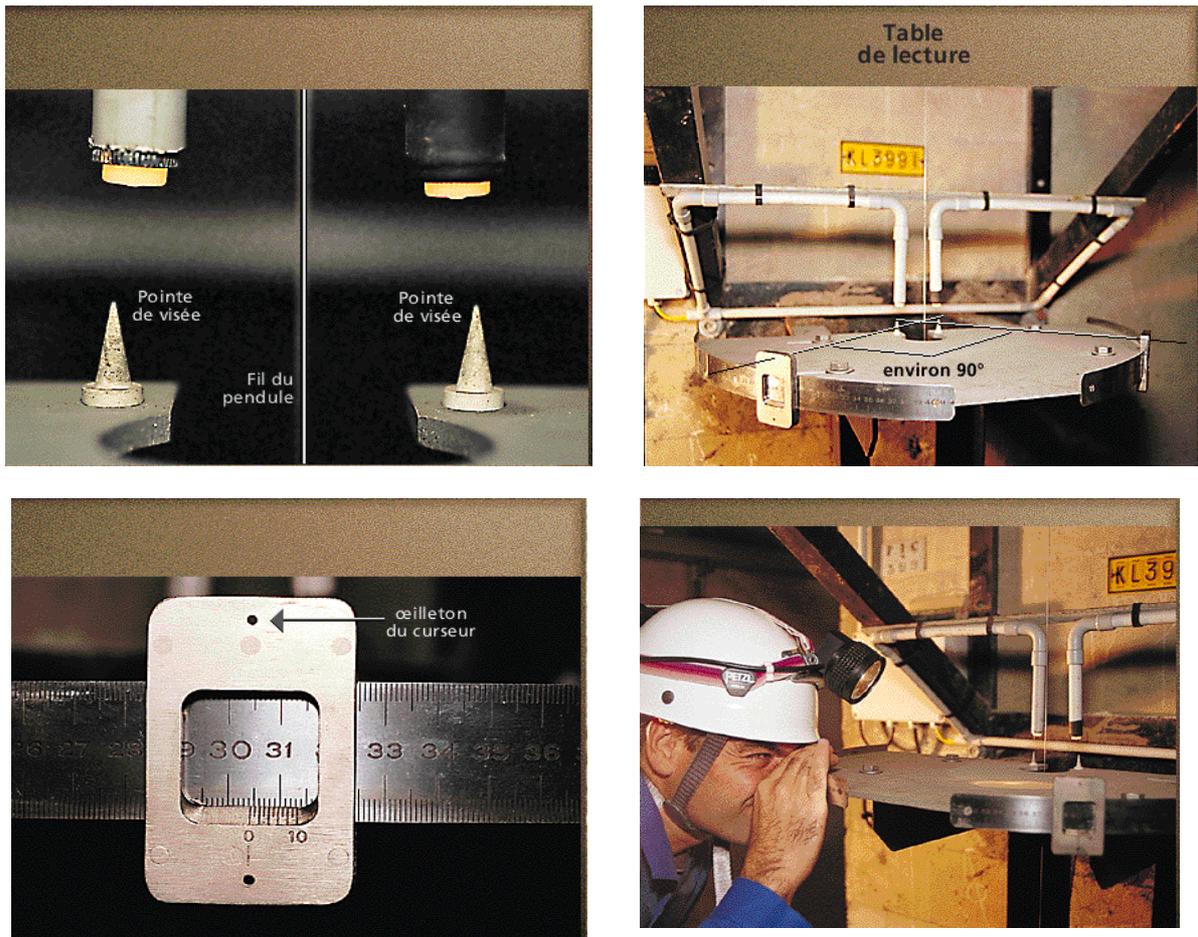


Figure III.21. Pendule, table de lecture des déplacements horizontaux [100].

3.2.3. Inclinomètres

Les inclinomètres ou clinomètres sont classés dans deux familles :

- Les inclinomètres de surface sont fixés sur l'ouvrage et mesurent de façon précise les mouvements en un point de l'ouvrage.
- Les clinomètres de forage sont surtout utilisés par les géotechniciens pour l'étude de la stabilité de sols. Ce sont des forages tubés qui ont des rainures longitudinales pour permettre le guidage de la sonde. Ces derniers permettent de mesurer les mouvements du sol à plusieurs niveaux en faisant descendre la sonde le long du tube.

La cellule permettant la mesure de l'inclinaison peut utiliser différents principes électromécaniques plus ou moins complexes suivant les critères recherchés [99].

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 [92].

L'inclinomètre est l'appareil conçu pour mesurer des déplacements horizontaux dans les sols. Un tube déformable est descendu dans un forage vertical exécuté dans l'épaisseur des terrains à ausculter et est ancré dans le substratum stable. La hauteur du tube inclinométrique peut atteindre 30 à 40 m. Ce tube subit les déformations du sol et sa déformée est reconstituée à l'aide d'une sonde qui, introduite dans le tube, effectue point par point des mesures de déviation angulaire, dans un ou deux plans, par rapport à la verticale. Connaissant la distance entre les points de mesure et l'angle de rotation en chaque point, il est possible de reconstituer le profil du tube dans le plan de mesure [50].

Les tubes inclinométriques s'assemblent pour former une colonne verticale dans le sol de la longueur voulue, ils sont rainurés pour guider les roulettes des sondes inclinométriques ou des inclinomètres fixes. L'élaboration des mesures des inclinométriques permet de déterminer le profil des déplacements horizontaux du terrain en fonction de la profondeur [97].

Ce matériel nécessite cependant la réalisation des opérations par un personnel qualifié et le dépouillement par un matériel informatique, ce qui ne permet pas d'obtenir immédiatement la valeur des déplacements [50].

La sonde inclinométrique peut déceler de très faible variation d'angle. La profondeur de lecture est déterminée à l'aide des graduations sur câble. Les lectures de la profondeur sont obtenues avec une précision de l'ordre d'un (1) cm [99].



Figure III.22. Tube inclinométrique avec rainures de guidage [70].



Figure III.23. Appareil de lectures brutes inclinométriques [70].

3.2.4. Extensomètres

Dans certains barrages importants en béton, on place, à la construction, des appareils de mesures constitués d'un tube à l'intérieur duquel se trouve un fil tendu. La mesure par des moyens électriques, de la période de vibration de ce fil permet de connaître la tension du fil et donc sa longueur. Ces extensomètres sont destinés à mesurer les déformations relatives locales du béton.

En associant trois appareils dans des directions différentes, on peut, en théorie, remonter aux déformations principales [14].

Il s'agit simplement d'une corde à piano tendue entre deux flasques solidaires du béton qui, en se déformant, fait varier la tension de la corde. Deux bobines placées au voisinage de la corde la font respectivement vibrer et enregistre la fréquence de vibration de laquelle on obtient la déformation par la relation :

$$L-L_0=K (F^2-F_0^2). \quad \text{Avec :}$$

L = longueur calculée,

L_0 = longueur initiale,

F=fréquence mesurée,

F_0 =fréquence initiale.

Les extensomètres sont disposés par 3 pour obtenir les déformations du plan et par 6 pour obtenir celles de l'espace [85].L'extensomètre est un appareil sensible et fiable, il donne des indications

importantes sur l'évolution des déformations internes, notamment pendant le début de la vie de l'ouvrage lorsque retrait et fluage sont importants [2].

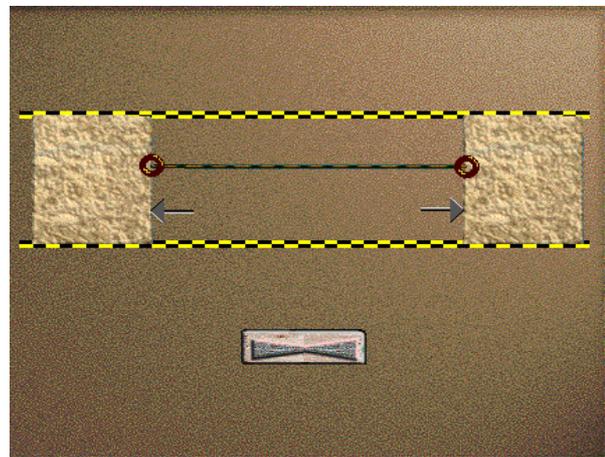
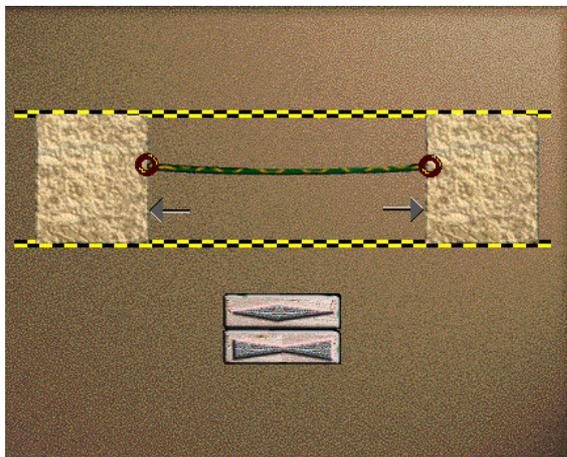
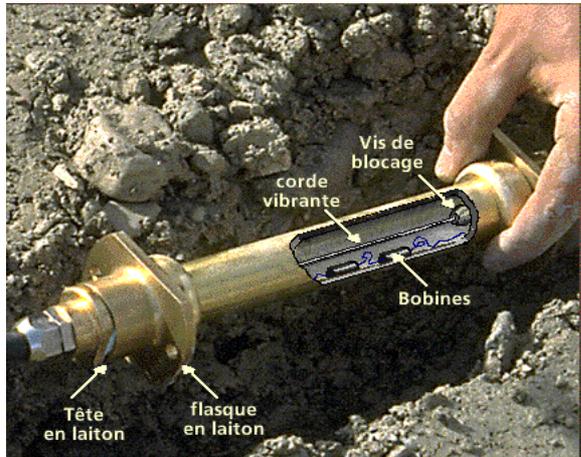


Figure III.24. Extensomètre à corde vibrante [100].

Figure III.25. Installation au niveau d'un remblai de l'extensomètre à corde vibrante [100].



Figure III.26. Saisi des données de mesures [100].

3.3. *Mesure des déplacements relatifs (locaux)*

Les barrages en béton ne sont pas exempts de fissures. Si, parfois, leur relevé visuel est suffisant, il est bon dans certains cas de pouvoir suivre le mouvement des lèvres de certaines fissures. En outre, des points de repères sont mis en place pour la mesure des mouvements des joints de la structure. Les instruments utilisés sont en général des comparateurs. Par exemple, les appareils les plus fréquents sont les micromètres, les jointmètres, les rissmaximètres [14].

3.3.1. Fissuromètres

Pour suivre le déplacement relatif de deux lèvres d'une fissure ou de deux plots voisins, on a besoin de mesurer des mouvements relatifs locaux. Des ouvertures de « fissure » sont obtenues simplement en mesurant, au pied à coulisse, l'écartement de deux plots fixés dans la structure [102].

Le principe de fonctionnement consiste dans la mesure du déplacement relatif entre des ancrages à fixer de part et d'autre d'une fissure ou d'un joint. Des fissuromètres sont aussi disponibles en version triaxiale pour la mesure des composantes du mouvement selon trois directions orthogonales [97].

Ces appareils sont installés sur un joint ou une fissure dont on veut suivre l'évolution. On mesure les déplacements relatifs des deux lèvres du joint ou de la fissure, en général dans l'axe perpendiculaire au plan de joint. Dans cette famille il existe toute une gamme d'instruments, du plus simple au plus sophistiqué.

- Le fissuromètre avec mesure au vernier (précision au 1/10 de mm) ;
- Le fissuromètre avec mesure au comparateur (précision au 1/100 de mm)
- Le fissuromètre avec capteur inductif (précision au 1/100 de mm mais nécessite d'une alimentation électrique) [2].

Selon que l'on mesure le déplacement relatif dans une ou dans trois directions, on distingue les fissuromètres ou les vinchons.

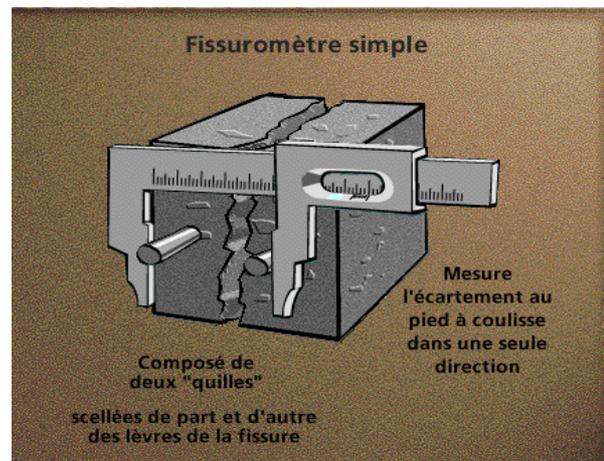
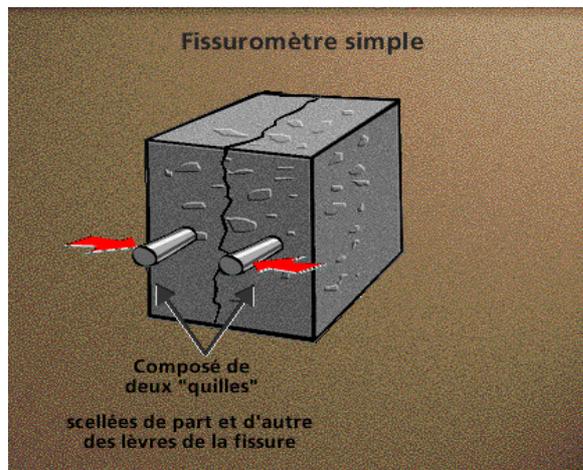


Figure III.27. *Mesure de déplacements relatifs par fissuromètre. [100].*

3.3.2. Vinchons

Les vinchons ou fissuromètres permettent le suivi de l'évolution de fissures sur plusieurs axes. Constitués de deux pièces métalliques scellées de part et d'autre de la fissure, on mesure la variation d'écartement de cette dernière à l'aide d'un pied à coulisse. Certains vinchons sont télémétrés, les mesures sont alors faites à l'aide de bobines électriques [99].

Le vinchon est utilisé pour mesurer les déplacements relatifs de deux surfaces adjacentes dans trois directions orthogonales :

- Déplacement vertical (glissement)
- Déplacement latéral (ouverture)
- Déplacement avant-arrière (rejet)

La mesure se fait au pied à coulisse avec une précision de lecture de 1/100 de mm. Ce pendant, compte tenu d'autres sources d'erreurs, la précision de la mesure est d'environ 0.05 mm. La qualité globale de la mesure dépend largement du soin apporté au scellement de l'appareil et de la rigidité des pièces métalliques [63].

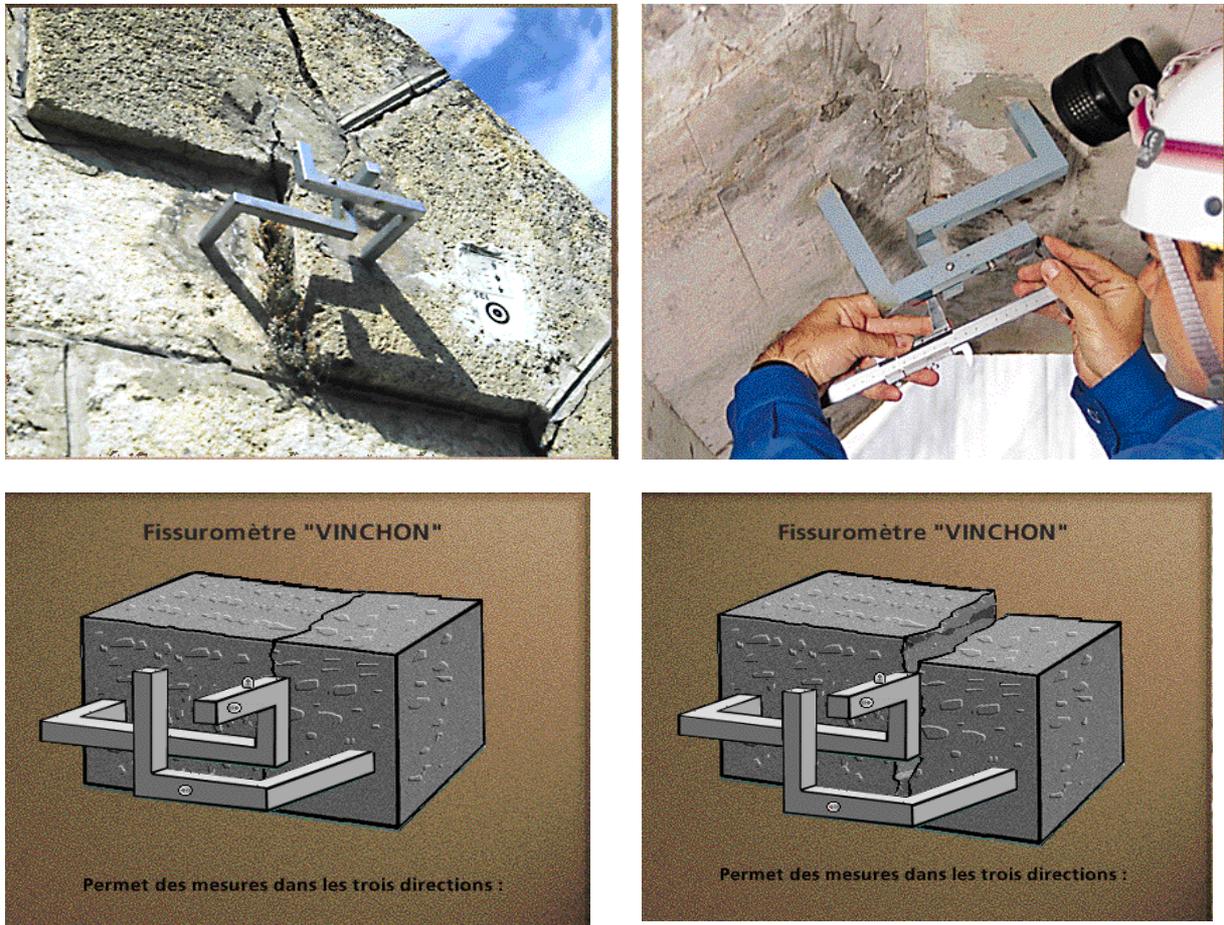


Figure III.28. Procédé de mesure des déplacements relatifs par Vinchon [100].

4. Mesure des paramètres hydrauliques

La sécurité des barrages passe surtout par la maîtrise des phénomènes hydrauliques. L'auscultation vise, en premier lieu, à déterminer les évolutions des conditions d'écoulement dans le massif et dans la fondation.

L'ouvrage est muni de piézomètres directs ou de cellules «noyées» dans le remblai de manière à évaluer les pressions interstitielles.

Les fuites à l'aval sont de bons indicateurs du fonctionnement hydraulique. Une augmentation rapide des fuites peut révéler un phénomène de renard. Il faut aussi que l'inspection du parement aval soit possible (d'où la nécessité d'un entretien du parement et effectuée très régulièrement) [62].

L'écoulement des infiltrations à travers un barrage en remblai et dans son soubassement est à l'origine de pressions interstitielles qui sont d'une importance capitale pour la stabilité de l'ouvrage et il importe d'en contrôler leur évolution. Ces paramètres sont déterminés au moyen de cellules de pression pneumatiques, hydrauliques ou électriques. Les cellules sont posées dans le remblai lors de la construction.

Pour assurer une mesure de qualité, un grand nombre de cellules doivent être mises en place. Une attention particulière sera portée aux câbles, sensibles aux tassements différentiels. Des piézomètres mis en place dans la recharge aval permettent l'observation de la présence ou non d'une nappe.

Les fluctuations de la ligne de saturation qui s'établit dans un barrage en remblai peuvent être suivies au moyen de piézomètres [4].

Le contrôle du comportement du drainage tout au long de la vie du barrage, par des mesures régulières des fuites et par un réseau de piézomètres bien implantés et en nombre suffisant à l'amont comme à l'aval des organes étanches est un élément de sécurité non moins important. Le dispositif de drainage qui vit avec le barrage et sa fondation au rythme des remplissages et vidanges successifs peut se colmater ou se cimenter, et par suite, il est nécessaire d'ausculter son évolution pour intervenir à temps par un entretien, un complément ou même un remplacement [103].

4.1. Mesure des pressions interstitielles

Pour les barrages de plus de 10 m de hauteur environ, il est important de contrôler la position de la surface phréatique d'un barrage en terre, et de mesurer les sous-pressions à la base d'un barrage poids.

La mesure des pressions interstitielles dans le sol supportant le remblai s'effectue à l'aide de piézomètres. C'est une mesure particulièrement délicate qui a trois objectifs essentiels :

- Connaître les conditions hydrauliques au sein des couches,
- Connaître le degré de consolidation des différentes couches rencontrées,

- Déceler les amorces de ruptures en certains points particuliers, si possible, avant que des incidents graves ne surviennent.

Elément essentiel de l'auscultation d'un ouvrage, la connaissance des niveaux piézométriques des points sensibles du barrage permet de contrôler :

- Le bon fonctionnement du réseau de drainage,
- L'absence de sous-pressions risquant de mettre en cause la stabilité du barrage.

On peut classer les appareils en deux familles :

- Les piézomètres à tube ouvert,
- Les cellules de pressions interstitielles.

4.1.1. Piézomètres

a) Piézomètres à tube ouvert,

Ce sont des forages crépinés qui permettent de relever la hauteur d'eau au sein d'un milieu perméable. Leur mode de fonctionnement est assez simple : on fait un forage dans lequel on va placer un tube équipé d'une crépine permettant le passage et la filtration de l'eau. Plusieurs techniques de forage existent cependant le forage à la tarière permet d'obtenir des échantillons de sol au cours de la foration. Ceci peut être très utile car le forage peut être placé dans la couche de sol voulue. [97].

Les piézomètres sont bien adaptés à la mesure du niveau piézométrique dans les fondations et en rives. Il s'agit de forages de faible diamètre (60 à 100 mm), équipés de tubes crépinés dans les sols meubles, à l'intérieur desquels établit un niveau d'eau en équilibre avec le niveau de la nappe phréatique environnante. La «chambre de mesure» est, le plus souvent, limitée à une courte partie du forage, la longueur restante étant isolée par un tubage et un coulis étanches [63].

La mesure est basée sur une lecture directe au moyen d'une sonde électrique, au manomètre (si le forage est artésien).

Ces piézomètres sont bien adaptés pour suivre les niveaux de la surface libre et les pressions interstitielles dans le corps d'un barrage et dans sa fondation.

Ils doivent présenter un temps de réponse assez court et par suite un volume réduit.

Les piézomètres à tube ouvert sont bien adaptés à la mesure de la pression interstitielle dans les sols perméables à peu perméables ou les roches fissurées à micro-fissurées. Ils se posent dans un massif de gravier, adapté aux dimensions des grains du sol ou aux fissures du rocher, ce massif étant isolé du reste. En surface de terrain, ils sont munis d'un bouchon étanche autour du tube.

Sur ces appareils, la lecture est simple et ne nécessite pas un personnel spécialisé.

La lecture des niveaux dans les piézomètres à tube ouvert est effectuée à l'aide de capteurs limnimétriques, ce qui impose que les tubes soient le plus vertical possible [50].

Le piézomètre à tube ouvert est le système le plus simple et le plus robuste. Il est implanté dans le corps du barrage, dans la fondation, les rives ou en aval. Il peut être installé à tout moment, par exemple pour un renforcement de l'auscultation. La précision est de l'ordre du centimètre [77].

Le piézomètre à tube ouvert, peu couteux et de lecture aisée, permet de détecter les anomalies dans la fondation ou dans le talus aval (problème de saturation). On implante alors les piézomètres dans des profils rive à rive (attention au contact avec le tapis drainant).

Compte tenu du temps de réponse, le piézomètre à tube ouvert convient mieux aux terrains perméables [81].

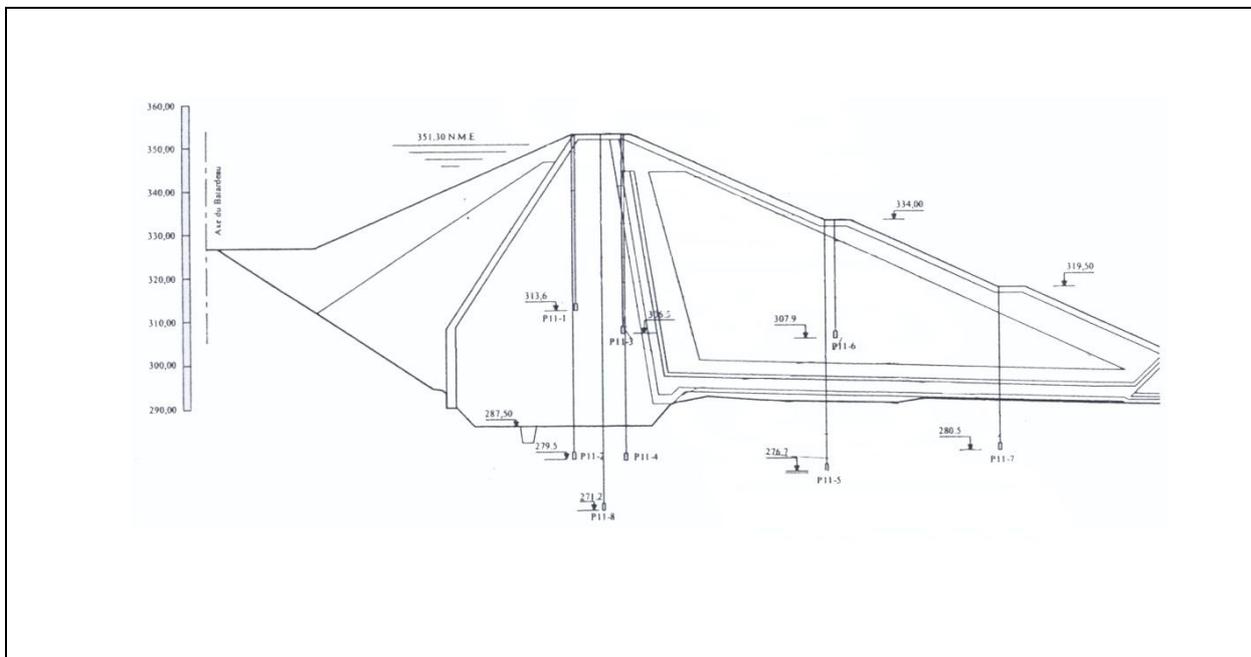


Figure III.29. Installation des piézomètres au niveau d'un profil du barrage Sidi Abdelli, wilaya de Tlemcen, Algérie [70].

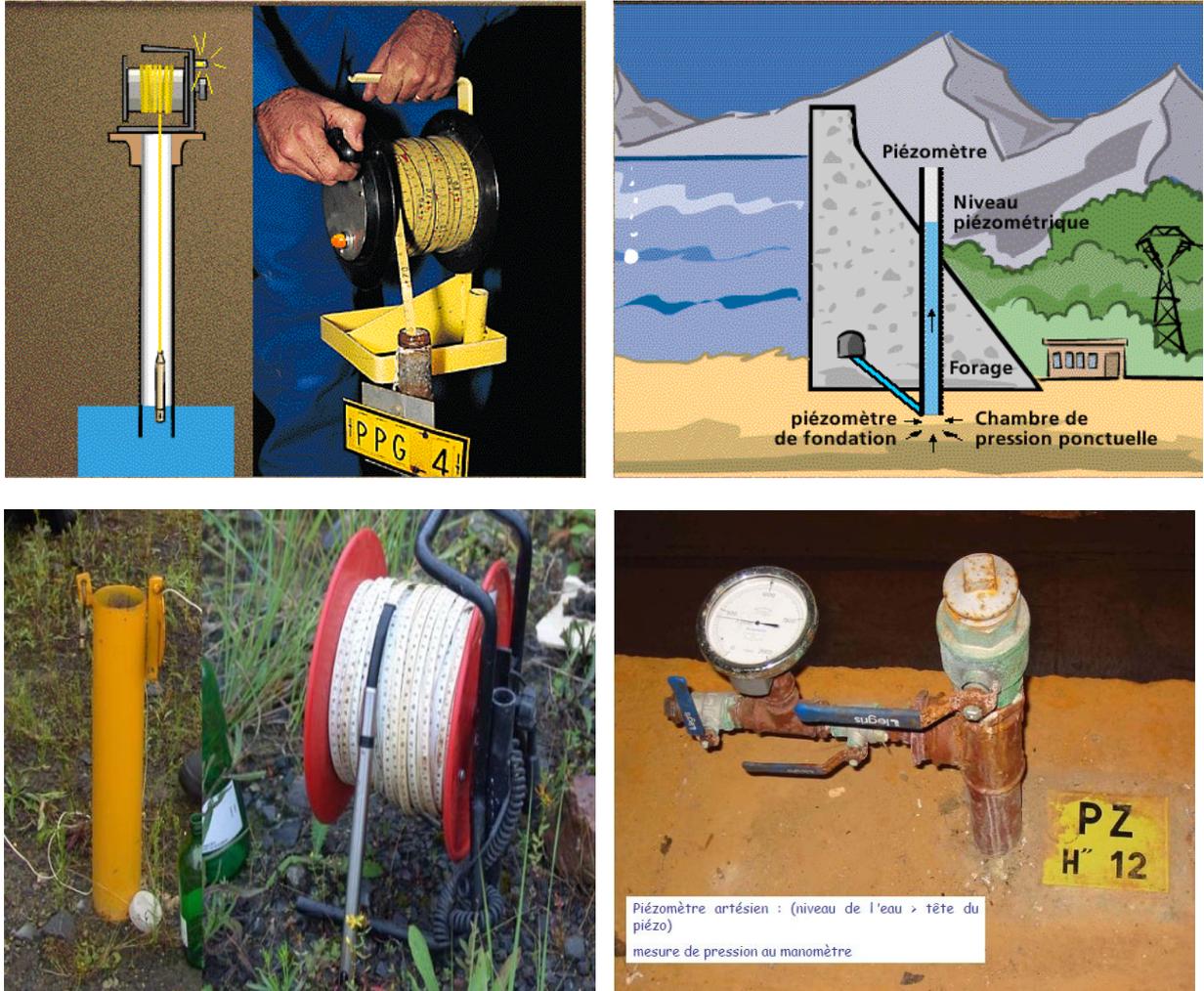


Figure III.30. Piézomètre et sonde pour la mesure du niveau piézométrique [99].

Le potentiel E exprimé en m d'eau est calculé

$$E_{\text{eau}}(\text{m}) = Z_{\text{tête}} - L$$

$Z_{\text{tête}}$: cote de la tête du piézomètre en NGA

L : lecture en m: distance entre la tête du piézomètre et le niveau d'eau mesuré avec la sonde

b) Piézomètre hydraulique avec manomètre

Son installation est semblable à celle d'un tube ouvert, mais dont le niveau d'eau dépasse l'extrémité supérieure du tube à laquelle est fixé un manomètre ; la pression au niveau du capteur est égale à la différence de niveau entre le sommet du tube et le niveau du capteur plus la pression enregistrée par le manomètre.

Pour éliminer l'air qui s'accumule à l'intérieur du tube à cause de l'absence de circulation d'eau et qui fausse les résultats, les piézomètres hydrauliques doivent avoir une tubulure double. Cette tubulure permet une circulation d'eau désaérée à partir de la surface, circulaire qui doit se faire périodiquement.

- Avantages des piézomètres ouverts

Simplicité, fiabilité, pas d'appareillage et composants compliqués.

- Inconvénients des piézomètres ouverts :

- 1- Temps de réponse long.
- 2- Tubulure doit être verticale
- 3- Sujet au gel.
- 4- Ils peuvent être endommagés par l'équipement de construction en surface.
- 5- Possibilité de bulles d'air emprisonnées dans la colonne d'eau.

4.1.2. Cellules de pression interstitielle

Les cellules de pression interstitielle fournissent des mesures ponctuelles précises et elles ont des temps de réponses plus rapides que les piézomètres.

Si on souhaite suivre finement des phénomènes plus complexes, tels que la consolidation des matériaux argileux humides de la fondation, du remblai, la progression de la saturation, l'efficacité d'un drain cheminée, on préfère des mesures ponctuelles de la pression interstitielle regroupées dans quelques profils amont-aval [81].

Ce sont des sondes qui peuvent être directement intégrées dans un remblai ou foncées dans un sol. Il est aussi possible de les mettre en place à l'aide de forages. Il en existe deux familles : les hydrauliques/ pneumatiques et les électriques.

Le principe général est le suivant : on installe en céramique ou un métal fritté qui va protéger des impuretés un compartiment rempli d'eau. Quand la pression d'eau du milieu va changer, celle de l'eau derrière le filtre va varier de façon identique. Une membrane permettra de mesurer cette pression en se déformant.

Ces capteurs ont le gros avantage de pouvoir être entièrement enfouis dans le sol. Ils ne risquent donc pas de détériorations et ne nécessitent pas d'entretien, contrairement aux piézomètres. Ils sont aussi

réactifs car moins dépendants de la porosité du milieu. En effet, les piézomètres doivent évacuer un volume d'eau pour se stabiliser à un niveau équivalent à la pression mesurée [99].

Les 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 [92].

La mesure des pressions interstitielles dans les remblais est réalisée par des cellules à contre-pression ou à corde vibrante. La pression interstitielle régnant localement dans le remblai est transmise par une pierre poreuse au dispositif de mesure. Les cellules sont posées pendant la construction du remblai et, selon le type, un câble ou des tubulures transmettent l'information au poste de mesure situé dans un local. Le soin apporté à la pose de ces cellules est primordial pour la qualité des mesures ultérieures, d'autant que ces appareils ne sont ni réparables, ni remplaçables (sauf installation dans un nouveau forage). Les cellules à corde vibrante sont recommandées pour leur longévité (mis à part les problèmes de fluage dans le temps). Leur précision est de l'ordre du demi pour cent (soit 5 cm de colonne pour une cellule de 0-1 bar) [2].

Le principe de la mesure de la pression dépend du type d'appareil (cellule à contre-pression ou cellule à corde vibrante) la précision est 0.1 à 1Kpa (soit 1 à 10 cm) [77].

On peut distinguer deux types d'instruments de mesure :

a) Capteurs pneumatiques

Le dispositif comporte une cellule de prise de pression noyée dans le remblai ou la fondation, une double tubulure flexible reliant la cellule au tableau de mesure, une valise de mesure avec bouteille d'azote sous pression et manomètre. Les cellules sont posées pendant la construction de remblai, aux niveaux et emplacements choisis, un soin particulier doit être apporté à la protection des tubulures pendant la durée du chantier. Des cellules peuvent également être posées en forage, ce qui rend possible l'équipement de barrages en service.

Il s'agit toute fois d'une opération délicate et relativement coûteuse. La sensibilité des cellules est 0,01 bar, soit 10 cm de colonne d'eau [90].

Pour les piézomètres pneumatiques, la pression dans la cellule est augmentée progressivement à l'aide d'un gaz (par exemple, 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 [83].

Robustes et inattaquables par le gel, ils sont aptes à mesurer la pression de l'eau interstitielles même dans les conditions climatiques les plus difficiles [97].

Ces piézomètres sont constitués d'un élément déformable (membrane flexible). La pression de l'eau contenue dans le sol applique la membrane sur les deux orifices de la chambre de pression. Par l'un de ces orifices, on envoie un gaz comprimé (air, azote ou CO₂). Lorsque la pression du gaz est égale à la pression interstitielle du sol, u , la membrane se trouve en équilibre indifférent, et le gaz s'évacue par la deuxième tubulure.

- Avantages :

Pas de correction hydrostatique, réponse rapide, peut être branchée à un système d'acquisition de données, n'est pas limité par la profondeur de la nappe.

- Inconvénients : Problèmes de condensation, période d'utilisation limitée à quelques années.

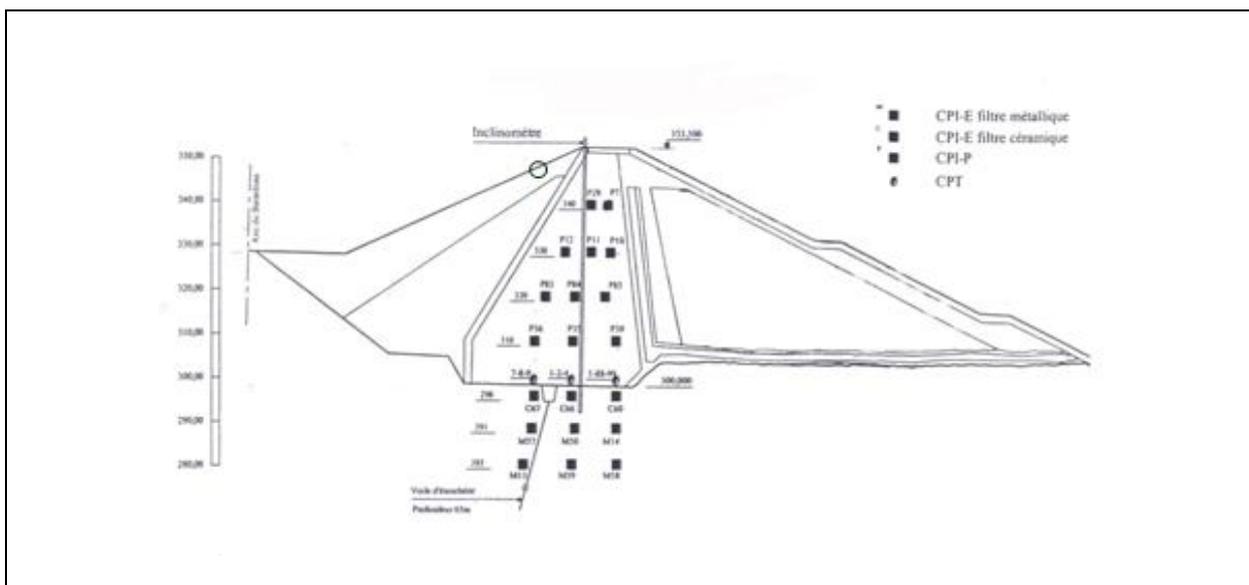


Figure III.31. Installation des cellules de pressions interstitielles au niveau du profil du barrage Sidi Abdelli, wilaya de Tlemcen, Algérie [70].

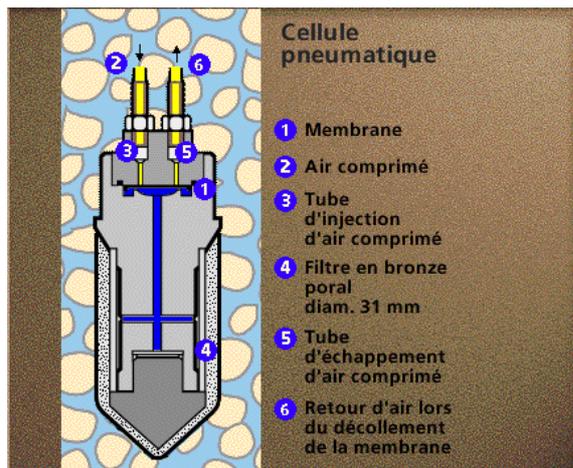


Figure III.32. Composantes d'une cellule pneumatique de mesure de pression interstitielle [100].

Figure III.33. Mesure de la pression interstitielle au niveau d'une cellule pneumatique [70].

- Calcul de la Pression interstitielle par les cellules pneumatiques.

$$P = L - L_0$$

Avec :

L : lecture sur manomètre

L_0 : lecture initiale correspondant au gonflage initial de la cellule.

b) Capteurs hydrauliques

Pour les capteurs hydrauliques dits GLÖZL, cette membrane va venir obstruer un tuyau d'arrivée d'eau. En injectant de l'eau sous pression dans ce dernier on peut créer le soulèvement de la membrane. Lors de ce soulèvement, un débit d'eau se crée et l'espace derrière de la membrane sera à la même pression que l'eau du milieu mesuré. On peut donc déduire la pression interstitielle en mesurant la pression entrante et la pression sortante [99].

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 [83].

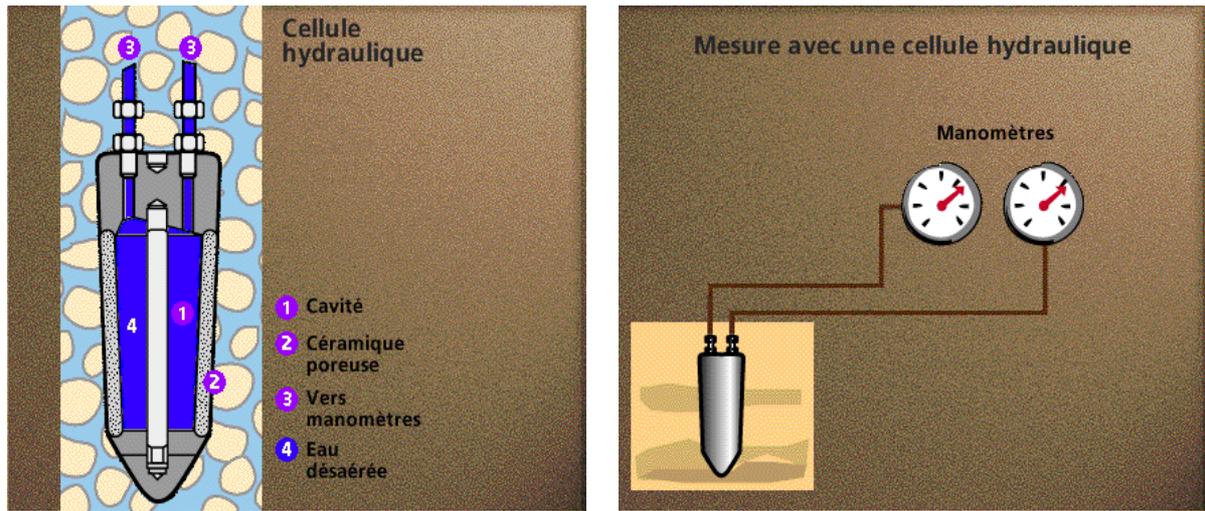


Figure III.34. Composantes d'une cellule hydraulique pour la mesure de pression interstitielle [100].

- **Avantages** : Simple, fiable, temps de réponse plus rapide, et moins sujet à être endommagé.

- **Inconvénients** : Sujet au gel, les tubulures doivent être désaérées périodiquement.

c) Capteur électrique à corde vibrante

Les cellules électriques ont un temps de réponse très court et permettent, éventuellement, l'enregistrement, mais leur coût est élevé et leur stabilité dans le temps, incertaine. En particulier, les appareils à jauges de contraintes présentent dans le temps un phénomène de dérive sans possibilité de réétalonnage.

A cet égard, les cellules à corde vibrante donnent, dans le temps, de meilleurs résultats [91].

Le dispositif comporte une cellule de prise de pression noyée dans le remblai ou la fondation, un câble électrique reliant la cellule au tableau de mesure, une valise servant à exciter la corde et à mesurer sa fréquence de vibration [90].

Le principe de la mesure est le suivant : La pression interstitielle se communique par la pierre poreuse à un diaphragme. Une corde métallique est tendue entre un point fixe et ce diaphragme. Les variations de pression communiquées au diaphragme font varier la tension de la corde et donc sa fréquence propre de vibration (comme une corde d'instrument de musique). C'est cette fréquence de vibration que l'on mesure après excitation de la corde par un électroaimant disposé à l'intérieur de la cellule [63].

La sensibilité de cette cellule est de l'ordre de 5 cm de colonne d'eau et elle présente une longévité remarquable [70].

Ils sont particulièrement convenables à long terme pour leur fiabilité.

Le capteur de pression, placé dans un cylindre en acier inoxydable avec une thermistance pour la mesure de la température, est constitué d'un diaphragme élastique auquel est accrochée sous vide une corde tendue en acier. Le diaphragme se déforme sous l'effet de la pression de l'eau modifiant ainsi la tension de la corde. La fréquence de vibration de la corde, excitée par un électroaimant, est liée à la pression hydraulique [97].

Ce type de piézomètre est un appareil électrique dont l'âme du système de fonctionnement est une corde vibrante. Il est composé principalement d'un filtre poreux, d'une membrane imperméable raccordée à la corde vibrante et d'un transducteur [63].

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 [92].

D'autres capteurs électriques sont dits « à corde vibrante » : un diaphragme déformable est soumis à la pression à mesurer. Une corde en acier tendue est reliée à ce dernier. Lorsque le diaphragme se déforme, la tension de la corde varie sa fréquence de vibration aussi. En la mettant en vibration à l'aide d'un électro aimant, il est possible de mesurer sa fréquence. Ce type de capteur est très fiable dans le temps grâce à une construction sous vide [99].

Ils sont basés sur la déformation d'une membrane solidaire d'un fil tendu (corde vibrante). La pression interstitielle agissant sur la membrane fait varier la tension dans la corde. La fréquence de vibration est fonction de la tension de la corde. En mesurant la fréquence de vibration, on peut calculer la tension et ensuite la pression interstitielle.

- **Avantages** : Possibilité d'enregistrement continu, grande sensibilité, réponse rapide, non sujet au gel, peut être ré-étalonné, poste de lecture peut être très éloigné du site, peut mesurer des pressions négatives.

- **Inconvénients** : Sensible à la température, dérive dans le temps, sensible à l'humidité et aux orages électriques, action galvanique et le prix est élevé.

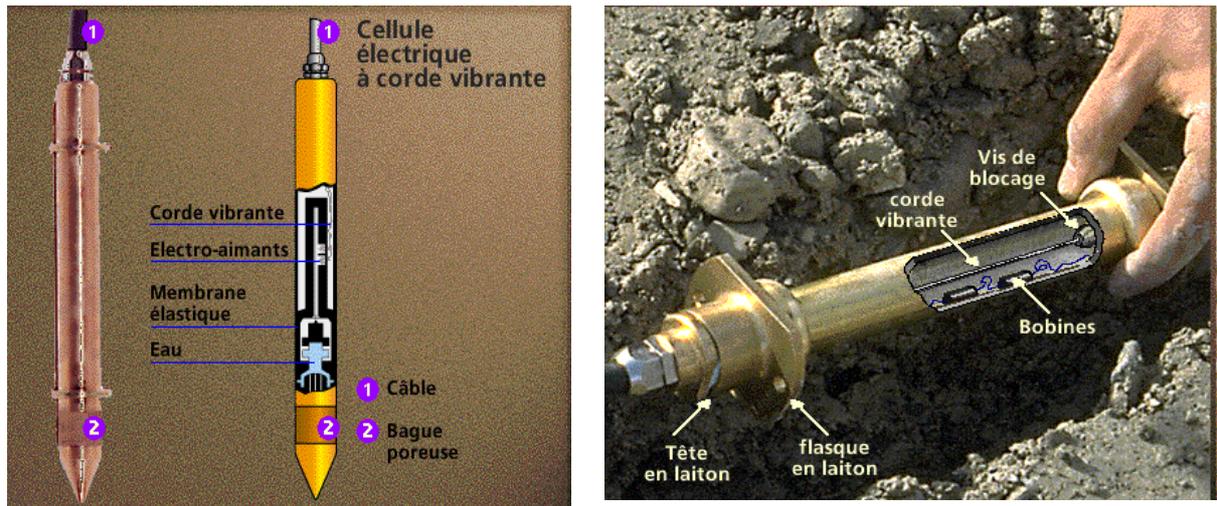


Figure III.35. Cellule de pression interstitielle à corde vibrante (Telémac) [100].

La pression interstitielle s'obtient par l'équation :

- Calcul de la Pression interstitielle par Cellule électrique à corde vibrante

$$P = K (L^2 - L_0^2)$$

Avec :

L : lecture de la fréquence (dHz)

L₀ : lecture origine de fréquence (dHz)

K : coefficient d'étalonnage du constructeur

P : pression interstitielle en bars



Figure III.36. Mesure de pression interstitielle par capteur électrique dans la galerie de visite du barrage Sidi Abdelli, Wilaya de Tlemcen [70].

- Méthode d'acquisition

Les cellules de pression utilisent un procédé de mesure qui consiste à transformer la pression d'un fluide agissant sur une membrane directement en fréquence. Les mesures sont saisies par un poste enregistreur de données et sont récupérées sur un ordinateur à l'aide d'un logiciel d'acquisition .

4.2. Mesure des débits de fuite et de drainage

4. 2. 1. Les drains

Les infiltrations se produisent toujours au travers du corps du barrage et du rocher de fondation. Elles sont captées par le réseau de drains d'élévation ou de fondation.

Les mesures de fuies et l'analyse de leur variation constituent un point essentiel de la surveillance de l'ouvrage [20].

Les eaux de percolation sont récupérées par les drains et sont collectées dans la galerie d'inspection. La mesure du débit drainé par chaque drain pourra être comparée au débit de fuite prévue. Ainsi il est possible de contrôler le bon état du noyau d'étanchéité [77].

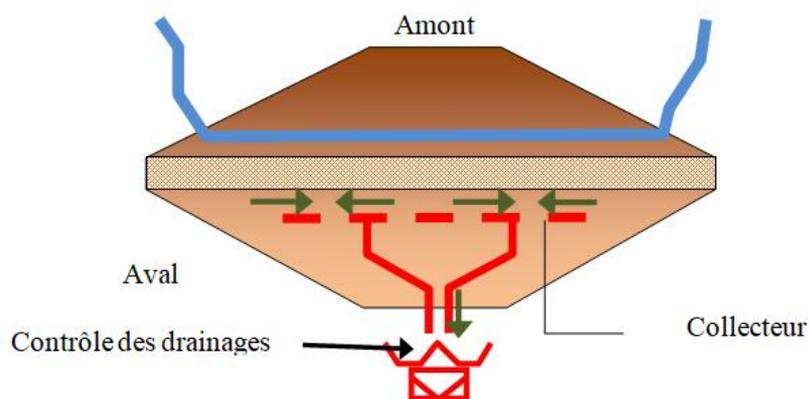


Figure III.37. Dispositifs de mesure des débits de fuite [70].

La détermination des débits de fuite constitue un outil synthétique très efficace de suivi du comportement des barrages. Les débits ne peuvent être mesurés que lorsqu'ils sont préalablement collectés, le débit d'une source diffuse dans un remblai doit d'abord être recueilli dans un caniveau.

La mesure elle-même peut être très rustique : on mesure simplement le volume obtenu dans un réservoir gradué pendant un temps donné.

La mesure de la hauteur d'eau dans un caniveau au droit d'un profil de forme bien définie permet d'obtenir le débit via des calculs simples d'hydraulique ou après étalonnage. Cette mesure peut être automatisée grâce à un capteur relevant le niveau de l'eau à l'amont du déversoir et télétransmise [14].

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 nécessité 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 [92].

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 [83].

A l'origine, les drains sont mis en place pour faire baisser les pressions interstitielles derrière la paroi étanche de l'ouvrage. Ce sont des tubes crépines et équipés de filtres qui évacuent l'eau contenue dans le corps de l'ouvrage. Grâce au début de ces derniers, il est possible d'avoir une idée de l'efficacité de la paroi étanche du barrage. Il existe deux moyens de les mesurer selon leurs débits.

- Par capacité, en mesurant le temps mis pour remplir un volume jaugé.
- Par mesure de la lame déversante en amont d'un seuil calibré [99].

Les débits des eaux percolant à travers la fondation de l'ouvrage ainsi que ceux provenant de forages drainants ou de galeries de drainage sont également mesurés. Ces relevés, conjointement avec ceux des sous –pression, livrent une information relative à l'état de l'écran d'étanchéité et à l'efficacité des drainages.

Une diminution du débit peut indiquer un colmatage depuis la retenue ou aussi du système de drainage [104].

Il faut toujours se rappeler qu'un accroissement anormal des débits de fuites, ou l'apparition de nouvelles fuites non prévues dans le projet, sont toujours l'indication d'un phénomène qui risque d'être dangereux. En effet les pertes d'eau par infiltration peuvent conduire.

- Soit à une perte exagérée d'eau, auquel cas l'ouvrage lui-même perdrait toute efficacité et deviendrait sans utilité,
- Soit à un transport de matériaux fins (érosion régressive pour barrage en terre) ou une augmentation des sous pressions (pour barrage en béton) mettant en danger dans les deux cas la stabilité de l'ouvrage.

Aussi il est indispensable d'accorder une importance particulière à un tel phénomène. Il s'agit donc de :

- Relever périodiquement toutes les zones de fuite et de suintement,
- Mesurer leur débit,
- Vérifier si leur évolution est compatible avec ce qui est prévu par le projecteur, vérifier si l'eau recueillie n'est pas chargée en particules fines [6].

A l'origine, les drains sont mis en place pour faire baisser les pressions interstitielles derrière la paroi étanche de l'ouvrage. Ce sont des tubes crépinés et équipés de filtres qui évacuent l'eau contenue dans le corps de l'ouvrage. Grâce au débit de ces derniers, il est possible d'avoir une idée de l'efficacité de la paroi étanche du barrage. Il existe deux moyens de les mesurer selon leurs débits :

- Par capacité, en mesurant le temps mis pour remplir un volume jaugé ;
- Par mesure de la lame dévers sante en amont d'un seuil calibré [99].

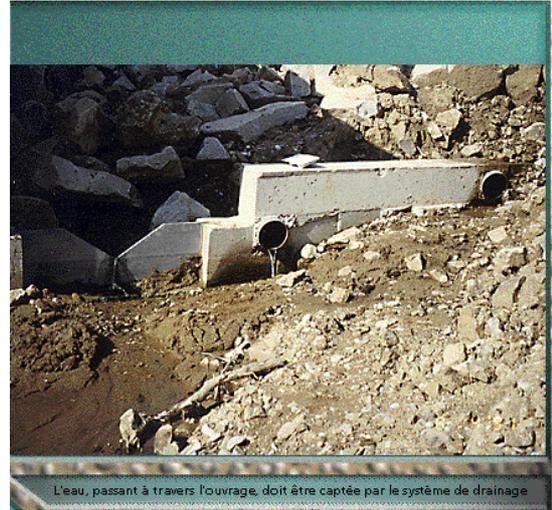


Figure III.38. Drainage de la source N° 01, rive gauche, barrage Sikkak, wilya Tlemcen [70].

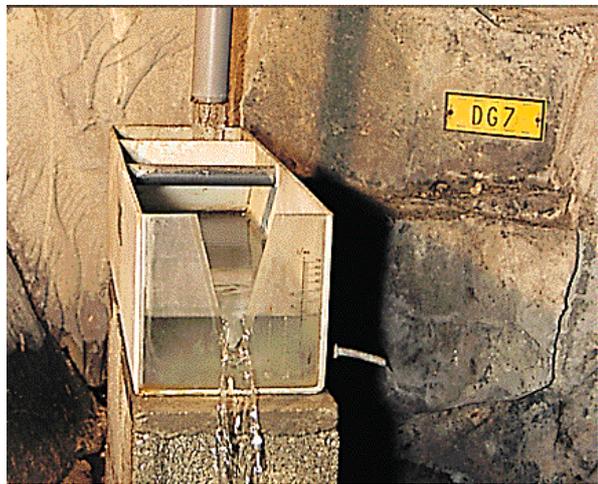
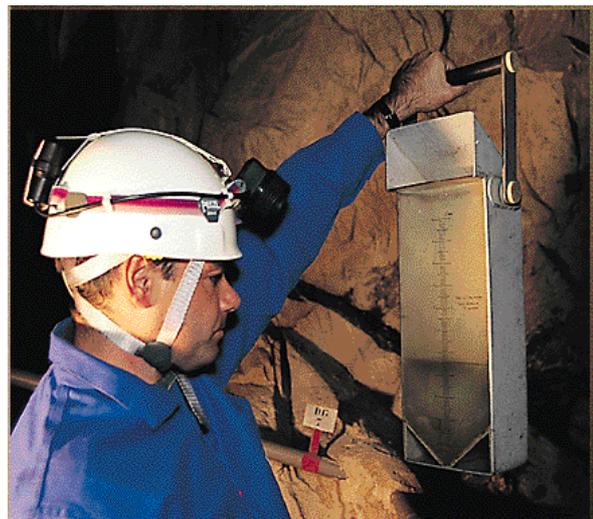


Figure III.39. Mesure de débit par déversoir [70].



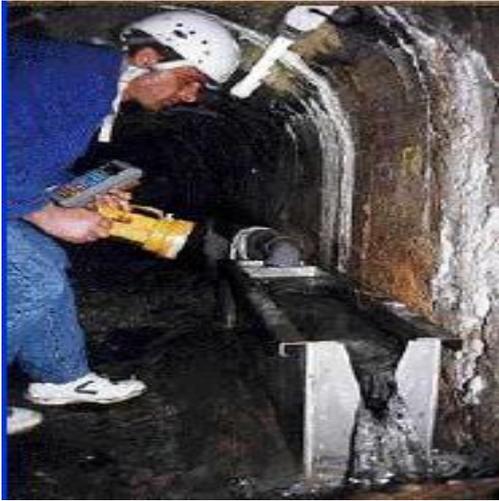


Figure III.40. *Mesure de débit de fuites et de drainage [70].*

4.2.2. Analyse qualitative de quelques phénomènes irréversibles simples dans un barrage

En exploitation normale cinq causes principales font varier le débit des drains :

- Variation du niveau de la retenue,
- Influence de la météorologie,
- Détérioration de l'étanchéité,
- Déformation thermiques saisonniers,
- Colmatage du système de drainage

- Augmentation des débits des drains

L'augmentation des débits de drainage à plan d'eau constant traduit le vieillissement de l'étanchéité ou, si l'augmentation a été brutale, un accident sur le DEG. Le phénomène est d'autant plus inquiétant si l'évolution est rapide et ne se stabilise pas. Il convient dans tous les cas d'essayer de cerner l'origine de l'évolution des débits en scindant si possible les zones de mesure.

- Baisse des débits des drains

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, la baisse de débit d'un drain peut être aussi inquiétante que son augmentation ; en effet. En effet, une baisse de débit à conditions hydrostatiques et climatiques constantes peut avoir deux origines. :

- Une amélioration naturelle de l'étanchéité du barrage par colmatage d'une zone fuyarde du DEG. Ce cas, bien sur favorable et rassurant, est peu courant compte tenu du type et de la

localisation des fuites dont le DEG peut être responsable et du peu de sédimentation dans les retenues d'altitude.

- Un colmatage du dispositif de drainage qui se trouve peu à peu contourné et ne contrôle plus les débits de fuite. Dans ce cas très inquiétant, la piézométrie va augmenter et les écoulements non contrôlés peuvent être l'origine de renards ou de glissements du talus aval du barrage.

5. Mesure des contraintes - Cellules de pression totale

Ces types de cellules de pression sont destinés à mesurer les pressions totales dans les sols, les remblais, les barrages en terre et les pressions de contact entre un terrain et un ouvrage de soutènement.

Les cellules se composent de deux plaques en acier inox, de forme circulaire ou rectangulaire, soudées, au contour. L'espace entre les plaques est rempli sous vide d'huile désaérée.

Chaque cellule est reliée par une tubulure en acier inox à un capteur de pression formant ainsi un système hydraulique étanche.

La pression exercée par le matériau environnant sur la cellule est transférée à l'huile et de celle-ci au capteur de pression pour la transmission du signal électrique correspondant [97].

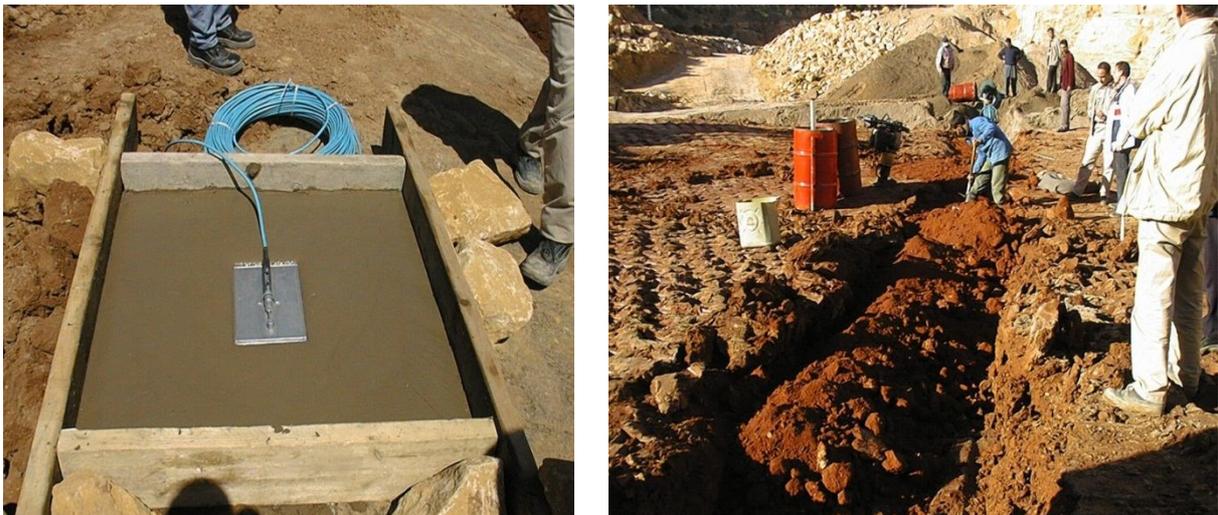


Figure III.41. *Installation d'une cellule de mesure de pression totale au niveau des remblais d'un barrage [70].*

5.1. Capteur de pression totale pneumatique

La cellule de pression totale est un moyen simple pour mesurer les contraintes développées dans les sols, les roches, les bétons ou à l'interface entre deux matériaux. Les domaines d'application sont divers :

- Mesure de contrainte totale dans les remblais, barrages, digues,
- Mesure des efforts appliqués sur une paroi à l'interface béton/rocher,
- Mesure des contraintes sur le revêtement d'un tunnel,
- Mesure des contraintes dans les bétons.

La cellule se compose d'un coussin hydraulique associé à un capteur pneumatique ou hydraulique à contre pression d'air. Le coussin réalisé en acier ou acier inoxydable est rempli d'huile ou de mercure selon les modèles. .

La contrainte recherchée est exactement compensée par une pression hydraulique ou pneumatique agissant sur une membrane.

La valeur mesurée est directement lue sur le manomètre de l'appareil de mesure. [98].

- Calcul de la Pression totale par les cellules pneumatiques

$$P = L - L_0$$

Avec :

L : lecture sur manomètre

L_0 : lecture initiale correspondant au gonflage initial de la cellule.

5.2. Capteur de pression totale à corde vibrante

Les capteurs de pression totale à corde vibrante sont constitués d'un coussin hydraulique identique aux cellules pneumatiques, associé à un capteur de pression à corde vibrante.

Les caractéristiques mécaniques et dimensionnelles sont identiques aux modèles pneumatiques.

Le capteur possède une membrane sensible couplée à un fil vibrant qui convertit la pression de fluide à mesurer en un signal de fréquence équivalent.

Des bobines d'électro-aimants situés autour de la corde servent à la fois à exciter la corde, à récupérer le signal et le transformer en un signal électrique de fréquence correspondant à la fréquence naturelle de la corde.

Les variations de pression entraînent la déflexion de la membrane modifiant la fréquence de résonance.

Transmit par câble, la mesure se fait par un poste portable ou est stockée dans une centrale d'acquisition [98].

6. Propriétés physiques et chimiques des eaux

Il s'agit des relevés des modifications physiques ou chimiques (Erosion, dissolution)

Pour les barrages en remblai comprenant des matériaux aisément solubles ou érodables ou qui sont fondées sur de tels matériaux, il est aussi souhaitable de procéder au contrôle régulier de la turbidité et à des analyses chimiques périodiques de l'eau. La mesure de la turbidité permet une appréciation concernant l'entraînement de particules fines, quant à l'analyse chimique, elle livre une information relative aux matières dissoutes (par exemple, celles issues du voile d'injection).

6.1. Mesure de la turbidité des eaux

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 introduit 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 [83].

6.2. Analyse chimique des eaux

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 [92].

7. Surveillance des environs proches et éloignées des barrages

Cette surveillance englobe des mesures (déformations du terrain, venues d'eau) et des observations visuelles. Elle concerne les zones de contact amont et aval, le pied aval de l'ouvrage, les flancs du réservoir, de même que l'ensemble du bassin versant.

Le relevé des débits des résurgences à l'aval doit aussi être effectué, car une variation de ces débits peut indiquer une anomalie dans le réseau de circulation des eaux souterraines. La mesure des débits peut être volumétrique, éventuellement s'effectuer au moyen d'un déversoir calibré.

Enfin, le relevé de fluctuations du niveau d'une nappe phréatique est parfois indiqué (par exemple d'un barrage en remblai). Le relevé des niveaux peut se faire au moyen d'une sonde avec témoin, glissée dans un forage ouvert ou au moyen d'un capteur de pression avec enregistrement.

Dans la zone située directement au pied aval du barrage, le relevé (topographique, bathymétrique en cas de présence d'eau) des éventuels affouillements sera périodiquement effectué (tous les 5 à 10 ans) ou à une crue exceptionnelle.

Dans le cas où la tendance de dépôts de sédiments dans la retenue est marquée, il est important de relever leur niveau surtout dans la zone proche du barrage. Il faut s'assurer que les ouvrages de prise et d'évacuation sont dégagés. On peut procéder dans ce cas à des relevés, dont la fréquence dépend de l'ampleur des apports en sédiments.

Enfin, dans la zone de la retenue, il s'agit d'observer les zones instables, qui en cas de glissement pourraient provoquer une vague et un débordement par-dessus le couronnement. Dans ce cas, on peut recourir à des mesures de triangulation (variation spatiale des déplacements de point en surface), des mesures de distance entre plusieurs points, des mesures par inclinomètre pour suivre les déformations en profondeur [4]

7.1. Affouillement au pied aval du barrage

L'affouillement entraîne une diminution de portance du sol support qui résulte la plupart du temps d'une diminution de l'encadrement de la fondation dans le terrain. Dans un stade plus avancé, l'affouillement peut également favoriser la circulation d'eau sous la pile ou le radier et entraîner le glissement général de l'ouvrage suite à l'érosion régressive [106]

Si des affouillements se produisent à l'aval du barrage, il est indiqué d'effectuer des relevés réguliers de leur forme et leur profondeur (par exemple tous les 3 à 5 ans ou suite à une crue exceptionnelle).

Ces relevés peuvent être exécutés topographiquement ou par Bathymétrie en cas de présence d'eau.

L'affouillement en pied de talus : c'est un phénomène soit naturel, soit lié à l'influence d'ouvrages qui perturbent l'écoulement.

L'affouillement est très courant lorsque les sédiments sont érodables, qu'il agisse de matériaux fins (limon ou sable) ou grossiers (galet, graviers). Selon son étendue spatiale, l'affouillement peut entraîner un approfondissement généralisé du fond ou être à l'origine de fosses d'affouillement localisées. La formation de fosses d'affouillement à proximité de la digue peut entraîner une rupture

géotechnique sous forme de grand glissement. Par ailleurs, l'augmentation des profondeurs d'eau due au phénomène d'affouillement généralisé peut entraîner un accroissement de l'action hydraulique [70]. La formation de fosses d'affouillement à proximité de la digue peut entraîner une rupture géotechnique sous forme de grand glissement. Par ailleurs, l'augmentation des profondeurs d'eau due au phénomène d'affouillement généralisé peut entraîner un accroissement de l'action hydraulique [51].

7.2. Résurgences à l'aval du barrage

Le relevé des débits des résurgences à l'aval doit aussi être effectué, car une variation de ces débits peut indiquer une anomalie dans le réseau de circulation des eaux souterraines. La mesure des débits peut être volumétrique, éventuellement s'effectuer au moyen d'un déversoir taré par l'intermédiaire de la courbe de tarage [20].

7.3. Relevée de la nappe phréatique

La mesure de fluctuation d'une nappe phréatique est parfois indiquée. Le relevé des niveaux peut se faire au moyen d'une sonde avec témoin, glissée dans un forage ouvert ou au moyen d'un capteur de pression avec enregistrement [62].

7.4. Sédiments dans la retenue

Il est important de relever les dépôts des sédiments dans la retenue, surtout dans la zone proche du barrage. Il faut s'assurer que les ouvrages de prise et d'évacuation sont dégagés. On peut procéder dans ce cas à des relevés bathymétriques, dont la fréquence dépend de l'ampleur des apports en sédiments [62].

7.5. Chutes de blocs

Il faut vérifier que les blocs instables ne mettent pas en danger les personnes, les accès et les installations. Des mesures de curage, de consolidation ou la mise en place d'un filet de protection peuvent s'avérer nécessaires [28]

7.6. Zones de terrains instables

Les zones instables doivent être observées. Un glissement pourraient provoquer une vague et un débordement par –dessus le couronnement.

Dans ce cas, on peut recourir à des mesures géodésiques (mesure de triangulation pour connaître la variation spatiale des déplacements de points en surface), des mesures de distance directes entre plusieurs points, des mesures par inclinomètre pour suivre les déformations en profondeur [28]

Des glissements de terrain, des chutes de pierre ou des glaces, des avalanches dans la retenue provoquent, selon le niveau du plan d'eau, une vague susceptible de submerger le barrage en occasionnant aussi des dégâts (exemple du barrage du vajont, Italie).

De nombreux barrages sont situés dans des zones de montagne. La stabilité parfaite des versants peut ne pas être garantie dans tous les cas. Elle peut encore être réduite par des travaux venant entailler des zones de glissement ou par la mise en eau de la retenue mouillant le pied d'une zone instable. Des glissements, des éboulements, des écroulements peuvent se produire. Selon les masses en jeu et les vitesses d'impact, les conséquences de ces mouvements peuvent être :

- Un alluvionnement de la retenue avec diminution corrélative de la capacité utile,
- Un partage de la retenue avec diminution drastique de la capacité utile,
- La formation des vagues qui peuvent intéresser les berges (avec des conséquences possibles si elles sont habitées ou fréquentées) et le barrage lui-même.

L'accident du Vajont qui s'est produit en Italie le 9 octobre 1963 constitue un cas extrême de ce type de risque. L'effondrement d'un pan entier de montagne a provoqué la formation d'une vague de plus de 50 m de hauteur par-dessus le barrage-voute. Le barrage lui-même, haut de 260 m .a parfaitement

résisté, ce qui démontre, dans ce cas, la très grande sécurité offerte par ce type de barrage vis-à-vis des efforts de poussée amont-aval.

Par contre, la vague après avoir sauté au-dessus du barrage a suivi la vallée, emporté un village et provoqué la mort de plus de 2 000 personnes.

Pour les barrages en remblai, des vagues plus limitées pourraient passer au-dessus de la crête et éroder le parement aval.

L'étude géologique doit donc déterminer les zones potentiellement dangereuses. Une auscultation des zones en mouvement peut être mise en place pour détecter les accélérations : suivi géométrique par topographie directe ou par GPS, inclinométrie, piézométrie, mesure des pressions interstitielles [107]

7.7. Avalanches

Selon la situation, une observation de la couverture neigeuse est recommandée. Dans le cas où des avalanches importantes pourraient atteindre la retenue, un abaissement du niveau du plan d'eau est exigé pendant la période critique. Cette mesure doit permettre d'éviter un débordement par –dessus le couronnement suite à l'arrivée d'une avalanche.

Dans le cas des avalanches, on distingue les avalanches qui, lorsqu'elles atteignent la retenue, peuvent provoquer une vague avec un risque de submersion et celles qui peuvent venir buter contre un ouvrage prévu à cet effet. Il faut s'assurer que l'ouvrage est capable d'encaisser le choc provoqué par l'avalanche [28]

7.8. Glaciers

Il sera procédé à une inspection et à des mesures de déformations des glaciers dominant une retenue. En cas de danger de chutes importantes de masse de glace pouvant atteindre la retenue, un niveau abaissé est exigé pendant la période où existe la menace d'un débordement par –dessus le couronnement [70]

7.9. Bassin versant

La configuration et le développement du bassin versant peuvent avoir une incidence dans le développement des crues. Il est donc utile d'évaluer les modifications morphologiques au cours du temps, tels qu'érosion, glissements de terrain, laves torrentielles, déboisement, nouvelle route et surface étanche, nouvelles constructions, etc [70]

8. Automatisation et transmission des mesures

Suite aux développements de l'électronique et de l'informatique, les possibilités et l'intérêt de l'automatisation des dispositifs d'auscultation se sont accrus. Ils permettent une liaison directe avec l'utilisateur. De tels dispositifs se composent de moyens de mesure (appareils de mesure), de moyens de transmission des données, de moyens automatiques d'acquisition et de stockage des données (base de données) et de moyens de traitement et de présentation des données (analyse des résultats de mesure, élaboration de graphiques et rédaction de rapports).

Le recours aux mesures automatiques, en des points rigoureusement choisis, ainsi que la télétransmission des résultats permettent une surveillance quasi permanente. Un système automatique de mesure peut être utile en cas d'accès difficile au site du barrage (en raison de conditions extérieures défavorables, par exemple en hiver), de même que pour la mesure de points dont l'emplacement est d'un accès peu commode. Si cette installation est complète du dispositif manuel classique, elle ne le remplace pas pour autant. Il faut être en mesure d'assurer la continuité des mesures dans le cas d'une défaillance de l'automatisation. Il n'est pas indispensable de prévoir la saisie automatique de tous les points de mesure. Il est recommandé de se limiter à quelques paramètres et points caractéristiques.

Dans le cas d'une mesure automatisée de variables, on prend en compte les points suivant :

- Capteurs simples et robustes,
- Compatibilité électromagnétique,
- Protection contre les surtensions,
- Protection contre l'humidité,
- Plage de température de fonctionnement adéquate.

Enfin, les résultats de mesures automatiques doivent être contrôlée si possible (par exemple, les pendules) au moins une fois par mois à l'aide de mesures manuelles. Ce mode de faire permet d'assurer une présence périodique et régulière du personnel au barrage, ainsi que de pouvoir procéder à la vérification des installations et d'effectuer des observations visuelles.

En outre, il est important de procéder à une vérification périodique de fonctionnement d'un dispositif automatique (inspection sur place, test à distance). Un dysfonctionnement d'une partie de l'installation pourrait entraîner la perte fâcheuse de données [4].

9. Analyse et interprétation des mesures

L'interprétation des mesures d'auscultation doit être effectuée en concertation avec le projeteur de l'ouvrage qui sera mieux à même de déterminer la gravité des anomalies éventuellement constatées (notons que dans plusieurs pays le projeteur est obligatoirement impliqué dans cette opération). Elle consiste en première approche à comparer les mesures avec des modèles déterministes (résultats des calculs du projet par exemple) ou avec des modèles statistiques qui indique le degré de continuité des phénomènes, la philosophie étant que les évènements progressifs à vitesse contrôlée ne peuvent conduire à des ruptures sans prévenir [75].

L'auscultation et le suivi des ouvrages en service représentent un enjeu économique très important. Ce sont des opérations de longue haleine qui demandent du soin et de la constance. Les conclusions de l'auscultation ne peuvent qu'être simples. On peut définir simplement 4 zones de comportements de l'ouvrage :

- Zone A : confort de l'exploitant
- Zone B : Auscultation renforcée, souci pour l'exploitant
- Zone C : travaux lourds, relation avec le public
- Zone D : Abandon, risque majeur [73].
- Tout jugement de valeurs –ainsi celui sur la sécurité des barrages- se base sur une comparaison entre "observation" et "référentiel" ou bien entre comportement réel et comportement normal [105].

L'appréciation du comportement d'un barrage s'effectue essentiellement en interprétant les résultats des mesures d'auscultation. Pour comprendre le comportement à long terme d'un barrage, il est essentiel d'interpréter soigneusement les données d'auscultation mesurées. Le contrôle de la sécurité d'un barrage exige que les données mesurées soient interprétées dans le temps le plus court possible après les lectures. En ce qui concerne les méthodes d'interprétation et d'analyse de telles données, il y a des pratiques et des points de vue variables. Toutefois, dans tous les cas, il est essentiel de disposer de mesures d'auscultation. L'analyse et l'interprétation des résultats des mesures d'auscultation font partie d'une démarche essentielle qui permet d'apprécier le comportement d'un barrage. La saisie des données d'auscultation est en général de la compétence de l'exploitant. Rappelons que les campagnes de mesures géodésiques sont confiées essentiellement à des spécialistes du domaine. Les tâches d'interprétations et de validation concernent, à divers titres, les exploitants, des ingénieurs expérimentés, ainsi que des experts confirmés. Il est indispensable que les opérations d'analyse s'effectuent peu de temps après l'exécution des mesures pour s'assurer tout d'abord de la plausibilité des mesures brutes et dans une seconde phase, pour vérifier le comportement correct de l'ouvrage ou éventuellement déceler sans délai tout comportement non conforme. Une anomalie d'une série de mesures peut se présenter sous forme d'un saut brusque, d'une discontinuité ou d'une dérive. Dans le cas de la mise en évidence de particularités, il faut envisager de prendre des mesures adéquates dictées par la situation, telles la répétition et/ ou l'augmentation de la fréquence des mesures, un contrôle des instruments, une mise en place de nouveaux instruments, des travaux de confortement, une restriction d'exploitation, etc. [4].

L'analyse des données d'auscultation consiste toujours à comparer les résultats des mesures effectuées avec des valeurs théoriques, prédéterminées, prédites ou prévues et à étudier les écarts constatés entre les deux séries de valeurs. Cette comparaison s'effectue selon des critères à définir dans le but de déterminer si les écarts sont réels et significatifs et s'ils annoncent un comportement qui pourrait impliquer des dangers et risques pour l'ouvrage et partant pour les populations [105].

La figure II.34 illustre le processus général d'analyse du comportement du barrage sur la base des mesures et des données livrées par le dispositif d'auscultation. L'analyse du comportement des ouvrages de petite hauteur de retenue peut se limiter aux opérations figurant dans la moitié supérieure

de la figure (détermination de paramètres représentatifs et information relative aux observations visuelles).

Si la saisie des données d'auscultation est en général de la compétence de l'exploitant, les tâches d'interprétation concernent, à divers titres, l'ensemble des intervenants (exploitant, ingénieur expérimenté, experts confirmés et autorité de surveillance). Il est du ressort de l'exploitant de s'assurer de la plausibilité des valeurs obtenues et ensuite de procéder à leur validation. Il appartient au professionnel expérimenté de vérifier la validité des résultats acquis et de les entériner si le comportement est adéquat. Il s'avère donc nécessaire de définir, lors de la conception d'un système de surveillance, les compétences pour l'interprétation des données, même si une procédure relativement bien établie est généralement suivie. Cette procédure vise notamment à déceler sans délai toute anomalie de comportement de l'ouvrage, de sorte que l'essentiel de l'interprétation s'effectue peu de temps après l'exécution des mesures.

CONCLUSION

La surveillance des barrages revêt un caractère essentiel puisque la rupture de ces ouvrages est susceptible d'entraîner des conséquences économiques et humaines dramatiques ; Le contrôle de la sécurité consiste à détecter et à maîtriser les mécanismes de dégradation pouvant entraîner la rupture de l'ouvrage si aucune action n'est entreprise (maintenance, confortement, vidange d'urgence.....etc).

Afin de garantir la sécurité d'un ouvrage d'accumulation pendant toute la durée de son exploitation, il faut contrôler, tant son état, que son comportement. Pour assurer le suivi de son comportement, on doit disposer d'un dispositif d'auscultation fiable, précis et pérenne. Les dérives par rapport à un comportement normal peuvent être détectées dans les meilleurs délais, pour autant que l'analyse et l'interprétation des résultats des mesures soient adéquates. Les progrès technologiques dans le domaine de la surveillance des barrages ont été constants et ont favorisé l'emploi de nouveaux procédés et appareils de mesures, ainsi que le recours aux dispositifs automatiques. Il convient toutefois de bien garder à l'esprit que l'inspection visuelle est la partie majeure de la surveillance des barrages : elle permet souvent de détecter des désordres et anomalies affectant un ouvrage. Par contre, l'auscultation est une méthode quantitative basée sur l'utilisation d'instruments de mesure, choisis et positionnés pour rendre compte de l'évolution du comportement de l'ouvrage. Le dispositif d'auscultation doit être conçu en fonction du type, des dimensions et des particularités techniques du barrage. Ce dispositif, très simple pour les petits barrages, sera plus dense pour les barrages de dimension moyenne

Le dispositif d'auscultation d'un barrage doit être conçu pour contrôler les paramètres déterminants pour la sécurité (ou la stabilité) de l'ouvrage ainsi que pour suivre le vieillissement. Il convient en particulier de s'assurer que les hypothèses prises en compte dans le projet de l'ouvrage restent bien vérifiées.

Une auscultation bien planifiée et adaptée est une composante essentielle du succès de la construction et du fonctionnement d'un barrage. Elle fait l'objet de nombreuses recommandations et mêmes de normes administratives dans plusieurs pays.

L'auscultation d'un barrage dépend de nombreux paramètres tels que le type d'ouvrage, son âge, ses moyens de réalisation et son environnement. Chaque barrage est unique dans son comportement, il est donc nécessaire d'adapter les moyens d'auscultation à ce dernier en fonction de sa configuration et pathologies. Si chaque ouvrage a un système d'auscultation qui lui est propre, pour chaque type d'ouvrage, on distingue un matériel d'auscultation qu'il est préférable d'utiliser.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] LAUTRIN D (1998). Vieillessement des petits barrages en remblai, Cemagref. Ingénieries –EAT- N 14, p55 à p68.
- [2] POUPART M., ROYET P. (2001). La surveillance des barrages, EDF-Cemagref, Colloque Technique CFGB, Aix-en Provence.
- [3] VANICEK I., VANICEK M. (2008). Earth Structures in Transport, Water and Environmental Engineering, Springer.
- [4] SCHLEISS A.J., POUGATSCH. H. (2011). Les barrages : du projet à la mise en service, Traité de Génie civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, publié sous la direction de René Walther et Manfred A Hirt, Volume 17, 703p.
- [5] DJEMILI L. (2006). Critères de choix de projet des barrages en terre : Etanchéité par le masque en béton bitumineux, Thèse de doctorat, Université de Batna, 140p.
- [6] P.N.U.D. (1987). Ressources en eau dans les pays de l'Afrique du nord, Guide maghrébin pour l'exécution des études et des travaux de retenues collinaires.
- [7] GTPB. (1974). Technique des barrages en aménagement rural, Direction de l'aménagement, Ministère de l'Agriculture.
- [8] PEYRAS. L. (2003). Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages, développement de méthodes d'aide à l'expertise, Thèse de doctorat, spécialité génie civil, Université Blaise Pascal, Clermont 2, 199p.
- [9] CFGB. (1997). Barrages en remblai, Gérard Degoutte (ENGREF), Editions Cemagref.
- [10] LOMBARDI. G. (2007). Aspect spécifiques de l'injection du massif rocheux, Symposium sur l'injection, Rabat.
- [11] MAALEJ Y. (2007). Résistance d'un milieu granulaire renforcé par injection de ciment, Deuxième Conférence Africaine des jeunes Géotechniciens, Hammamet, Tunis.
- [12] BRITO T., BOUJMA F., ET NABTI H. (2009). Barrage de Kerrada, Injections d'imperméabilisation, Premier symposium méditerranéen de géo-engineering (SMGE), Alger les 20 et 21 juin.
- [13] STUKY M.J.P. (1975). Barrages en béton, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Aménagement de Chutes d'eau et Irrigations.
- [14] LE DELLIU P. (2007). Les barrages : Conception et maintenance, Presses universitaires, Lyon.

- [15] CFGB. (2001). Justification des barrages poids par les méthodes déterministes : développement d'une méthodologie semi-probabiliste aux états limites, Rapport d'étape, 63p.
- [16] BOURI S., TAGINA S., BENI AKHY R., LAHLOU MIMI A., BELLOUTI F., BEN DHIA H. (2000). Traitement de la fondation du barrage Sidi Aich par ingestion de coulis de ciment, Springer.
- [17] SCHLOSSER F. (1989). Eléments de mécanique des sols, Presses de l'ENPC, 280p, Paris.
- [18] LAUTRIN D. (2003). Technology and Engineering, 239p.
- [19] DURAND J.M., ROYET P., MERIAUX P. (1999). Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale, Cemagref
- [20] ICOLD. (1989). Monitoring of dams and their foundations, State of the art, Auscultation des barrages et de leurs fondations, la technique actuelle, Bulletin 68, CIGB, Paris.
- [21] ICOLD. (1993b). Bulletin 88: Rock foundations for dams, 241p.
- [22] FOSTER M., FELL R., SPANNAGLE M. (2000). The statistics of embankment dam failure and accidents, Canadian Geotechnical Journal, p 1000-1024.
- [23] FRY JJ., DEGOUTTE G (1997). L'érosion interne: typologie, détection et réparation, barrages et réservoirs, n° 6, 26p.
- [24] CHETTI A., HAZZAB A., KORICHI k. (2011). Modélisation d'un écoulement diphasique érodant dans un milieu poreux, cas de la suffusion, Larhyss Journal, n° 09, P83-97.
- [25] MONNET A. (1998). Boullance, érosion interne, renard, Les instabilités sous écoulement, Revue Française de Géotechnique, N° 82, p 3-10.
- [26] SKEMPTON A.W. (1994). Experiments on piping in sandy gravels, vol 44, N°3, p 440-460.
- [27] ALEM A., ALHADDAD S., BENAMAR A., WANG H. (2006). Migration de particules dans un milieu poreux : Erosion interne, XXIV^{ème} rencontres universitaires de génie Civil.
- [28] ICOLD. (2007). Bulletin 1, General approach to dam surveillance, Introduction à la surveillance des barrages, Comité de la surveillance des barrages.
- [29] YAKHLEF F., JABBOURI A., KHAMLICH A., BEZZAZI M., DUBUJET P., PARRONVERA M., RUBIOCINTAS M.D., OLEGARO C.L. (2009). Modélisation de l'érosion interne et de l'initiation du renard hydraulique dans un barrage, 19^{ème} Congrès Français de Mécanique, Marseille.
- [30] GIKAS V., SAKELLARIOU M. (2008 a). Horizontal deflection analysis of a large earthen dam by means of geodetic and geotechnical methods, 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, LISBON.

- [31] CIGB. (2000). Apports combinés de l'auscultation et la modélisation pour l'analyse et la compréhension du comportement des barrages, Combined use of monitoring and modelling for the dams behaviour analysis, Vingtième congrès des grands barrages, Beijing.
- [32] CHRZANOWSKI A., CHRZANOWSKI A., MASSIÉRA M., BAZANOWSKI M., WHITAKER C. (2008). Study of long-term behavior of large earth dam combining monitoring and finite element analysis results, 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis, LISBON.
- [33] DASCAL O. (1987). Post construction, Deformations of Rockfill Dams, Journal of Géotechnical Engineering, ASCE, 113(1): 46-59.
- [34] BORTKEVICH S., KRASIL'NIKOV M. (1973). Investigation of the stress state in the clay core of an earth dam.
- [35] PENMAN A., BURLAND J.B., CHARLES J.A. (1971). Observed and predicted deformations in large embankment dam during construction, Paper published, Engrs.
- [36] CFBR. (2010). Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages en remblai, Groupe de travail, justification des barrages et des digues en remblai.
- [37] MOAYEDI H., HUAT BK., MOHAMMAD ALI A., HAGHIGHI A., ASADI A. (2010). Analysis of longitudinal cracks in crest of Doroodzan dam, EJGE, vol.15.
- [38] FELL R., MAC GREGOR P., STAPLEDON D. (1992). Geotechnical Engineering of Embankment Dams, Rotterdam.
- [39] PHILIPPONNAT G., HUBERT B. (1998). Fondations et ouvrages en terre, Editions Eyrolles.
- [40] KHANH H T. (2006). Utilization of numerical models for design and exploitation of dams, L'utilisation des modèles numériques dans la conception et l'exploitation des barrages.
- [41] OFEG. (2002a). Sécurité des ouvrages d'accumulation, Documentation de base relative à la sécurité structurale, Version 1.
- [42] HEI X.Y., WANG Z., HUANG J.C. (2008). Temporal and spatial distribution of dam failure events in China, International Journal of sediment Research, p 398- 405.
- [43] LACHOINETTE D., BONELLI S. (2008). Modélisation de l'érosion par renard hydraulique : du laboratoire à l'ouvrage, XXVI rencontres universitaires de Génie Civil, Nancy, France.
- [44] AIT ALAIWA N., SAIYOURI N., HICHER P. (2008). Etude du colmatage lié au processus d'érosion interne, Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur Insertion des grands ouvrages dans leur environnement, Nantes, 18-20 juin 2008.
- [45] ROMAIN. R. (2007). Modélisation de l'érosion interne dans les barrages en remblai, INSA de Strasbourg, EDF.

- [46] CIGB. (1990). Bulletin 77, Sols dispersifs dans les barrages en remblai, Bulletin de la commission internationale des grands barrages, N° 77,53p.
- [47] BONELLI S. (2001). Ouvrages hydrauliques en remblai : un regard transversal sur l'action de l'eau, Ingénieries N 26- p 49 - 58.
- [48] CFGB. (1997). Barrages et réservoirs, Erosion interne : typologie, détection et réparation, CFGB-EDF, 126p.
- [49] ICOLD. (2009). Bulletin 138, La surveillance : élément de base d'un processus Sécurité des barrages, Surveillance : basic elements in a Dam safety process, Paris.
- [50] ANTOINE. F, JOSSEAUME. H, LEVILLAIN. JP, ROUAS. G. (1992). Recommandations sur les barrages-réservoirs d'alimentation des canaux à Bief de partage, STC.PMVN Expertise, surveillance, entretien et confortement.
- [51] CFBR. (2013). Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages, Groupe de travail, dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages.
- [52] ROUSSAT B., SMAÏL N. (2009). La sécurité des barrages de la catégorie II face aux risque crues, Premier symposium méditerranéen de geoen지니어ing (SMGE), Alger.
- [53] DESUROSNE I., OANCÉA V., OBERLIN G., TOMA A., HUBERT P. (1993). Analyse comparative, PMP-PMF en estimation des crues rares et extrêmes, vol.8, n2, 93-102 p.
- [54] ROUSSAT B. (2002). Analyse décisionnelle appliquée à la sécurité des grands barrages : Cas de la submersion, mémoire de Magister, Université Abou bekr Belkaid Tlemcen (Algérie).
- [55] MEDD. (2004). Les ruptures de barrages.
- [56] LAUTRIN D. (1997). Vieillesse et pathologies de barrages en remblai dans le Gers, Cemagref, Bordeaux, 141 p.
- [57] ICOLD. (1983), Deterioration of dams and reservoirs, examples and their analysis. Gap Editions, Louis-Jean, 367 p.
- [58] CIGB. (1991). Etanchéité des barrages par géomembranes : techniques actuelle, bulletin 78,140p.
- [59] STUCKY.M.P. (1974). Dignes en matériaux meubles, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- [60] MWR. (1992). Rockfill dams: Finite element analysis to determine stress and deformations in membrane type Rockfill Dam, Central Board of Irrigation and Power Malcha Mag, New Delhi.
- [61] ROCTEST TELEMAT, (2006). Instrumentation de sécurité et de surveillance des barrages et digues.

- [62] ICOLD. (1992). Improvement of existing dam monitoring, Recommendations and case histories, Amélioration de l'auscultation des barrages, Recommandations et exemples, Bulletin N° 87, Paris.
- [63] ROYET P. (1994). Guide pour la surveillance et l'entretien des petits barrages, Cemagref, Ministère de l'environnement, Paris Editions, 87p.
- [64] GIKAS V., SAKELLARIOU M. (2008 b). Settlement analysis of the Mornos earth (Greece), Evidence from numerical modeling and geodetic monitoring, Elsevier Engineering structures p 3074-3081.
- [65] CHRISTIAN KERT M. (2008). Rapport sur l'amélioration de la sécurité des barrages et ouvrages hydrauliques, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.
- [66] CIGB. (1994). Bulletin 95, Barrages en remblai, Filtres et drains granulaires, Synthèse et recommandations.
- [67] CURT C., PEYRAS L., ROYET P. ET AL. (2006). Evaluation de la performance des barrages basée sur la formalisation de l'expertise, Application à l'érosion interne des barrages en remblai, XXIVème Rencontres Universitaires de génie Civil, la Grande Motte, France.
- [68] MASSE E., CURT C., LE GOC M. (2007). Développement d'une méthode pour la maîtrise de la sécurité des barrages, Méthode basée sur le diagnostic multi modèles appliquée à un barrage en remblai, 25^{èmes} rencontres de l'AUGC, Bordeaux, France.
- [69] DISE. (2009). Guide pour la gestion et la surveillance des petits barrages en seine- Maritime.
- [70] SMAIL N. (2007). Approche méthodologique du suivi de comportement des barrages en remblais, Université Abou bekr Belkaid Tlemcen, (Algérie).
- [71] MERIAUX P. (2008). Surveillance, exploitation et entretien des retenues d'altitude pour l'alimentation des installations de neige de culture, Cemagref, Colloque de l'ANPNC.
- [72] ROYET P. (2001a). Pathologie des barrages en service et orientations pour la recherche, Colloque technique du CFGB, Aix-en-Provence, 22p.
- [73] ROYET P. (1995). Pathologie des barrages en service et orientations pour la recherche), Cemagref
- [74] ROYET P., HOONAKKER M., FÉLIX H. (2010). Dam monitoring : principes and tools- The monitoring report, Les mesures d'auscultation : principes et outils.
- [75] CARRERE A. (2005). Barrages, Bureau d'ingénieurs conseils COYNE et BELLIER Techniques de l'ingénieur, traité construction
- [76] BRETON M., DELAGRANGE P., GIROD H., MARTIN T., VERCHERIN P. (2009). Barrage en enrochement, Noyau d'étanchéité en béton bitumineux, Ecole des ponts de Paris.
- [77] BONELLI S., RADZICKI K., SZCZESNY J., TOURMENT R. (2005). L'auscultation des barrages : une nécessité, Ingénieries N° 41 –p 13 à 22.

- [78] TECSULT. (2004). Exploitation, surveillance et maintenance du barrage Ain youcef, Cahier d'instruction.
- [79] SMAIL N. (2014). Suivi du comportement des barrages, these de doctorat en génie civil, université de Tlemcen, Algérie
- [80] DIBIAGIO E. (2000). Monitoring of dams and their foundations, Auscultation des barrages et leurs fondations, XXe congrès CIGB, Rapport général question 78, Beijing, Volume III, P 1459 – 1545.
- [81] ALONSO E., BECUE J., BOLLE G. (2007). Barrages en remblai, Cemagref.
- [82] ICOLD. (2010). Bulletin 141, Concrete face rockfill dams: concepts for design and construction, Barrage en enrochement avec masque amont en béton : concepts utiles à leur conception et à leur construction.
- [83] CSB. (2005). Groupe de travail pour l'observation des barrages, Dispositif d'auscultation des barrages : Concept, fiabilité et redondance.
- [84] DARBRE GR., POUGATSCH H. (1993). L'équipement de barrages dans le cadre du réseau national d'accélérographes.
- [85] SMAIL. N, ROUISSAT. B, BEKKOUCHE. A, (2008). L'importance des mesures d'auscultation pour l'analyse du comportement des barrages en terre, Journées Nationales de Géologie de l'Ingénieur JNGG 08, Nantes.
- [86] CHRZANOWSKI A., MASSIÉRA M. (2004). Modelling of deformations during construction of a large earth dam in the la grande complex, Canada, Technical sciences Abbrev.
- [87] SMAIL N., ROUISSAT B., BEKKOUCHE A. (2009). La modélisation et l'auscultation, des outils pour l'analyse du comportement des barrages, colloque international Sols non Saturés et Environnement (UNSATlemcen), Tlemcen, Algérie.
- [88] CFGB. (2002). Petits barrages, Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi, Gérard Degoutte (ENGREF), Editions Cemagref.
- [89] AKROUR B. (1998). Utilisation optimale du système de positionnement GPS pour les travaux d'auscultation de barrages, Faculté des études supérieures de l'université Laval.
- [90] MASSIÉRA M., SZOSTAK C., BAZANOWSKI M., WITHAKER C., VAUTOUR J. (2008). Analyse des déformations de grands barrages en remblai pendant le remplissage et l'opération du réservoir, congrès annuel de la SCGS, Québec
- [91] LABORATOIRE DES PONTS ET CHAUSSEES. (1971). Etude des remblais sur sols compressibles, Editions DUNOD, Paris.

- [92] CSB. (2005). Dispositif d'auscultation des barrages, Partie 3 : Appareils et méthodes de mesures, Edition Avril 2005.
- [93] KALKAN Y., ALKAN R.M., BILGI S. (2010). Deformation Monitoring studies at Ataturk Dam, FIG Congress, Facing the challenges-Building the capacity, Sydney, Australia.
- [94] WILKINS R., BASTIN G., CHRZANOWSKI A. (2003). Alert: a fully automated real time monitoring system, Proceeding, FIG 11th International symposium on deformation measurements, Santori, Greece, p 209-216.
- [95] CHRZANOWSKI A., MASSIÉRA M., CHRZANOWSKI A. (2006). Kinematic analysis of behavior of large earth dams, Munich Germany.
- [96] AKROUR B., SANTERRE R. (1998). Investigation sur le potentiel du système GPS pour l'auscultation topographique de barrages, GEOMATICA, vol 52 N 4, pp 441- 450.
- [97] SISGEO. (2008). Société manufacturière d'instrumentation géotechnique, L'expérience au service de l'ingénieur.
- [98] GLOTZL, FRANCE GEOTECHNIQUE. (1992). Appareils pour l'auscultation des ouvrages.
- [99] VIDAL R. (2010). Auscultation d'ouvrages hydrauliques, Etude des normes pour la sécurité des ouvrages hydrauliques et création d'un programme interne de suivi, INSA, STRASBOURG.
- [100] EDF, CEMAGREF. (1998). VIGIE-Barrage, Support sur l'inspection visuelle et l'utilisation des instruments d'auscultation, version 1.
- [101] TECSULT, (2002). Système d'auscultation du barrage Ain youcef, Etudes d'exécution.
- [102] CFGB. (1997). Petits barrages - Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi, Gérard Degoutte (ENGREF), Editions Cemagref.
- [103] GOGUEL B., COYNE ET BELLIER. (2002). La sécurité prise au niveau de la conception.
- [104] SMAIL. N, ROUSSAT. B, BEKKOUCHE. a, (2009). Analyse des systèmes d'injection des voiles et leur influence sur le comportement des barrages, Premier Symposium Méditerranéen de Géoenneering (SMGE09), Alger.
- [105] LOMBARDI G. (2001). Sécurité des barrages, Auscultation et Interprétation des mesures, Commentaires généraux, Minusio.
- [106] ROMAIN M. (2009). Proposition d'une méthodologie de diagnostic du risque de ruine des piles de barrages manuels, INSA- SOGREAH, Agence de Paris.
- [107] LAUTRIN D. (2002). Vieillessement et réhabilitation des petits barrages en terre, Cemagref éditions, 240 p.