

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche  
scientifique**

**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**

**Faculté de génie de la construction**

**Département de génie civil**

*Laboratoire de Recherche de Géomatériaux Environnement  
et Aménagement (L.G.E.A.)*

**Mémoire de Master Académique**

**Spécialité : Génie Civil**

**Option : *Géotechnique et environnement***

**THEME**

**Surveillance et sécurité des barrages**

**Présenté par :**

**M<sup>elle</sup> ABBAS Lila**

**Dirigé par :**

**M<sup>r</sup> : HAMZA Ali**

*Année : 2012/2013*

## **Remerciements :**

*Le déroulement de mon Projet de Fin d'Etudes, m'a beaucoup apporté, tant du point de vue technique qu'humain. Je tiens particulièrement à remercier les personnes et organismes suivants :*

- *En premier lieu, je tiens à remercier mon encadreur, Mr HAMZA Ali de m'avoir proposé ce thème riche en information et qui a guidé mes réflexions tout au long de ce travail, je le remercie aussi pour la confiance qu'il m'a accordée, pour ces conseils qui m'ont beaucoup appris sur les méthodes de travail.*
- *Je remercie également chaleureusement tout le personnel de l'Agence National des Barrages ANB, pour son accueil tout particulièrement ceux du service d'auscultation pour leurs explications lors des campagnes d'auscultation.*
- *Merci au membre de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail et de le soutenir.*
- *Je remercie toute l'équipe de la bibliothèque de Génie Civil de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour leur gentillesse et leur compréhension.*
- *Un grand merci à tous mes amis(e) pour leur soutien et leurs encouragements.*
- *Ma dernière pensée ira à mes deux sources de lumière, mon père et ma mère, qui m'ont, et qui continuent à m'éclairer. Je tiens à les remercier profondément pour leur amour et leurs sacrifices. Sans oublier mes frères, sœurs et cousines pour le soutien qu'ils m'ont tous et toutes accordé.*

## **Introduction générale :**

De nos jours, la surveillance des barrages est la méthode qui permet d'assurer la sécurité des barrages en service. Elle 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 pour le voir arriver et prendre, en temps utile, les mesures correctives qui s'imposent.

Un barrage ne permet pas d'essais de mise en charge préalable. Aussi la surveillance d'un barrage commence dès le début de la mise en eau (et même pendant la construction) qui constitue donc un essai en vraie grandeur. Celle-ci doit répondre à une procédure très stricte qui inclut une maîtrise du plan d'eau. 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.

Elle doit même être renforcée lors des phases d'exploitation exceptionnelle. En effet, il est impossible de procéder, comme on le fait sur un pont, à un essai préalable à la mise en service sous charge maximale. L'effort de dimensionnement n'est normalement atteint qu'à l'occasion de la crue millénaire ou décennaire, sans compter les effets des tremblements de terre ...

La surveillance est assurée par l'exploitant du barrage. Elle prend deux formes complémentaires : d'une part, une surveillance visuelle qui se traduit par des tournées d'inspections régulières et l'œil d'un technicien averti est un des meilleurs capteurs dont dispose l'homme ; d'autre part, une auscultation du barrage avec le relevé périodique d'appareils de mesures. L'auscultation, dont la mise en œuvre est réglementairement obligatoire pour les barrages intéressant la sécurité publique, répond elle-même à un double objectif : à la fois détecter une évolution rapide d'un paramètre qui pourrait être représentatif d'un comportement anormal, précurseur ou signe d'un défaut structurel nécessitant une action à court, voire à très court terme (une réparation, une baisse du plan d'eau, une alerte) et vérifier que le comportement du barrage est suffisamment stable dans le temps et conforme aux prévisions. L'auscultation et le traitement des données sont donc organisés de façon à détecter immédiatement les anomalies, par exemple par des seuils de vraisemblance de résultats.

## Sommaire :

### Chapitre -I- : Généralités sur les barrages

I-1- Définition d'un barrage .....	2
I-2- Le choix du site d'un barrage .....	3
I-2-1- de bonnes conditions topographiques .....	3
I-2-2- De bonnes conditions géologiques .....	3
I-2-3- De bonnes conditions hydrologiques .....	4
I-3- Les différents types de barrage .....	4
I-3-1- Les barrages en remblais .....	5
I-3-1-1- Les barrages à masque amont .....	5
I-3-1-2- Les barrages zonés avec un noyau .....	6
I-3-1-3- Les barrages en terre homogène .....	6
I-3-2- Les barrages en béton ou en maçonnerie .....	7
I-3-2-1- Les barrages poids .....	7
I-3-2-2- Les barrages poids évidés .....	8
I-3-2-3- Les barrages voûtes .....	8
I-3-2-4- Les barrages à contreforts .....	8
I-4- L'utilisation des barrages .....	9
I-5- Classification des barrages .....	9

### Chapitre II : Le risque rupture du barrage

II-1- Les causes des ruptures .....	11
II-1-1- Les problèmes techniques .....	11
II-1-2- Des causes naturelles .....	11
II-1-3- Des causes humaines .....	11
II-2- Typologie des risques .....	12
II-2-1- Risques naturels .....	12
II-2-2- Risques d'origine anthropique .....	12
II-3- Les enjeux humains, matériels et environnementaux .....	12
II-4- Types de rupture .....	13
II-4-1- Description du mécanisme d'érosion interne .....	14
II-4-2- L'érosion régressive .....	15
II-5- Modalités de rupture .....	16

II-5-1- Rupture par renard .....	16
II-5-2- Rupture par glissement.....	17
II-5-3- Rupture par surverse .....	17
II-6- L'onde de submersion .....	18
II-6- Etat critique de l'instabilité .....	20
II-6-1- Rupture de barrage Malpasset 1959 .....	20
II-6-1-1- L'accident.....	20
II-6-1-2- Les conséquences .....	20
II-6-1-3- Causes de rupture de Malpasset .....	21
II-6-1-3-1- Fondation du barrage .....	22
II-6-1-3-2- Conditions d'exploitation .....	22
II-7- Etat critique de l'érosion régressive .....	23
II-7-1 Rupture du barrage de Téton .....	23
II-7-2- Causes de rupture .....	24

### **Chapitre III : La surveillance et sécurité des barrages**

III-1- Introduction .....	25
III-2- comment surveille-t-on un barrage ?.....	25
III-2-1- Élément de base d'un processus « Sécurité des barrages » .....	26
III-2-2- La surveillance des barrages.....	27
III-3- Objectif de la surveillance .....	28
III-4- Tâches de la surveillance .....	28
III-5- Organisation de la surveillance .....	30
III-6- Profil des intervenants .....	31
III-6-1- Premier niveau de surveillance .....	32
III-6-2- Deuxième niveau de surveillance .....	32
III-6-3- Troisième niveau de surveillance .....	33
III-6-4- Quatrième niveau de surveillance .....	33
III-7- La surveillance des grands barrages .....	34
III-7-1- Les avantages d'une inspection subaquatique .....	35
III-8- Surveillance en période de crue .....	35
III-9- Surveillance sismique.....	36
III-10- L'auscultation des ouvrages d'accumulation .....	36

III-10-1- L'instrumentation .....	37
III-10-1-1- Barrage voûte ou multi-voûtes en béton.....	37
III-10-1-2- Barrage en terre et enrochement .....	37
III-11- Dispositif d'auscultation des ouvrages d'accumulation .....	38
III-12- L'inspection visuelle .....	39
III-13- Caractéristiques des instruments de mesure.....	40
III-14- La programmation des activités de surveillance .....	40
III-14-1- L'inspection des ouvrages .....	40
III-14-2- Auscultation des barrages .....	42
III-14-3- Contrôle de la fonctionnalité des organes d'évacuation .....	42
III-14-3-1- Inspection des organes d'évacuation .....	43
III-14-3-2- Essais de fonctionnement .....	44
III-14-4- Suivi du comportement .....	45
III-14-5- Diagnostic .....	45
III-14-6- Archivage des données .....	46
III-15- La géodésie .....	46
III-16- Des dispositifs de contrôle intégrés à l'ouvrage .....	46
III-17- Des visites de contrôle internes et externes régulières.....	47
III-18- Rapports de surveillance et d'auscultation.....	48
III-19- Visites techniques approfondies .....	48
III-20- Revue de sûreté .....	49
III-21- Révision spéciale .....	49
III-22- Visites du service du contrôle .....	49
III-22-1- Visites annuelles.....	49
III-22-2- Visites décennales .....	50
III-23- L'entretien des barrages .....	51
III-23-1- Barrages en béton .....	51
III-23-2- Barrages en remblai .....	51
III-23-3- Galeries en rocher .....	51
III-23-4- Ouvrages hydrauliques annexes .....	51
III-23-5- Dispositif d'auscultation .....	52
III-23-6- Equipements hydromécaniques et électriques .....	52
III-23-7- Zone de retenue .....	52

III-23-8- Accès au barrage et dans le barrage .....	52
---	----

## **Chapitre IV : Comportement des barrages et appareils d'auscultation**

IV-1- Suivi du comportement des barrages en remblai .....	53
IV-1-1- Déformations .....	53
IV-1-2- Pressions interstitielles et niveau piézométrique .....	55
IV-1-3- Débits de fuite et drainage .....	55
IV-2- Suivi du comportement des barrages en béton .....	57
IV-2-1- Déformation de la structure .....	57
IV-2-2- Température .....	57
IV-2-3- Déformations particulières .....	57
IV-2-4- Sous-pressions .....	58
IV-2-5- Débits de percolation et de drainage .....	58
IV-3- Suivi du comportement des fondations .....	61
IV-3-1- Fondation en rocher .....	61
IV-3-1-1- Déformations .....	61
IV-3-1-2- Sous-pressions et niveau piézométrique .....	61
IV-3-1-3- Débits de fuite et drainage .....	61
IV-3-2- Fondation en terrain meuble .....	62
IV-3-2-1- Déformation .....	62
IV-3-2-2- Pressions interstitielles et niveau piézométrique .....	62
IV-3-2-3- Débits de fuite et drainage .....	62
IV-4- Principaux types d'appareils d'auscultation .....	64
IV-4-1- Les vinchons .....	64
IV-3-2- Les pendules .....	64
IV-3-3- Les alidades .....	66
IV-3-4- Les inclinomètres .....	67
IV-3-5- Les piézomètres à tube ouvert .....	68
IV-3-6- Les cellules .....	68
IV-3-7- Les extensomètres .....	69
IV-3-8- Les drains .....	70

## **Chapitre V : Information préventive**

V-1- Introduction .....	71
V-2- Approche législative et réglementaire .....	71
V-3- Le but général des plans de secours .....	71
V-3- Le cadre d'action d'un PPI .....	72
V-3-1- Zone de proximité immédiate: la ZPI .....	72
V-3-2- Zone d'inondation spécifique: la ZIS .....	72
V-3-3- Zone d'inondation, hors PPI : la ZI .....	72
V-5- Les différents niveaux d'alerte .....	72
V-5-1- la vigilance renforcée .....	72
V-5-2- Le niveau d'alerte n°1 .....	72
V-5-3- Le niveau d'alerte n°2 .....	73
V-6- Le signal d'alerte lié aux ouvrages hydrauliques .....	74
V-7- Les consignes spécifiques pour la population .....	74

## **Chapitre VI : Auscultation du barrage de Taksebt**

VI-1- Présentation .....	76
VI-2- L'auscultation des ouvrages .....	76
VI-3- Type de mesures .....	77
VI-3-1- Mesures des déformations .....	77
VI-3-1-1- Les repères topographiques .....	77
VI-3-1-2- Les tassomètres .....	79
VI-3-1-3- Les inclinomètres .....	79
VI-3-2- Les barres vinchons .....	79
VI-3-3- Les cellules de pression .....	80
VI-3-4- Piézomètres ouverts .....	83
VI-3-5- Les drains .....	84
VI-3-6- Les manomètres .....	86

## Liste des figures :

### Chapitre -I- : Généralités sur les barrages

Figure I-1 : structure d'un barrage .....	2
Figure I-2 : Géométrie simplifiée d'un site de barrage .....	3
Figure I-3 : schéma d'un barrage à masque amont .....	5
Figure I-4 : schéma d'un barrage zoné .....	6
Figure I-5 : schéma d'un barrage en terre homogène .....	7
Figure I-6: schéma d'un barrage poids .....	7
Figure I-7 : schéma d'un barrage voûte .....	8
Figure I-8 : schéma d'un barrage à contreforts .....	8
Figure I-9 : Classement des barrages selon leur géométrie et leur retenue .....	10

### Chapitre II : Le risque rupture du barrage

Figure II-1: Rupture par renard .....	17
Figure II-2 : Le glissement du talus , Barrages d'ARMUS et CAU ; (GERS ,France) .....	17
Figure II-3: Rupture par surverse .....	18
Figure II-4: La carte du risque .....	19
Figure II-5 : Aléa, Enjeux et Risque .....	19
Figure II-6 : Photos du barrage Malpasset avant et après sa rupture le 2 décembre 1959 ....	20
Figure II-7: La voie ferrée « vrillée comme un jouet » .....	21
Figure II-8: La ville de Frejus après le désastre.....	21
Figure II-9 : Vue sur le barrage de Téton (USA) avant rupture .....	23
Figure II-10 : Rupture du barrage de Téton (USA) .....	23

### Chapitre III : La surveillance et sécurité des barrages

Figure III-1 : Programme de sécurité des barrages .....	26
Figure III-2 : Règles et directives .....	28
Figure III-3 : Concept global de l'organisation de la surveillance et de l'entretien .....	29
Figure III-4 : Inspection des ouvrages lors de sa vidange .....	34
Figure III-5 : Inspection des parties immergées de la retenue par un robot subaquatique .....	34
Figure III-6 : Visite décennale du barrage de Cap de Long – descente du robot subaquatique (juin 2006) .....	41

Figure III-7 : Cellules de pression .....	42
Figure III-8 : Mesures de débit .....	43
Figure III-9 : Mesures de débit .....	43

## **Chapitre IV : Comportement des barrages et appareils d'auscultation**

Figure IV-1 : Mesure de déformations verticales et horizontales à partir de points de mesure situés sur le parement .....	53
Figure IV-2 : Mesure des déformations verticales (tassement) au niveau du couronnement et dans une galerie sous digue .....	54
Figure IV-3 : Mesure des tassements d'un barrage en remblai par tassomètres .....	54
Figure IV-4 : Mesure des pressions interstitielles et du niveau piézométrique de barrages en remblai .....	55
Figure IV-5 : Représentation schématique de la collecte des eaux de percolation et de la mesure des débits partiels et total .....	56
Figure IV-6 : Représentation schématique d'un dispositif d'auscultation minimal .....	60
Figure IV-7 : Vinchon mesurant l'écartement d'une fissure .....	64
Figure IV-8: Schéma de fonctionnement d'un pendule, à gauche un pendule direct, à droite un pendule inversé .....	65
Figure IV-9 : Table de lecture d'un pendule .....	65
Figure IV-10 : Alidade .....	66
Figure IV-11: Support et cocarde de visée pour alidade .....	66
Figure IV-12 : Sonde inclinométrique avec galets de guidage .....	67
Figure IV-13 : Tube inclinométrique avec rainures de guidage .....	67
Figure IV-14: Piézomètre et sonde à interface .....	68
Figure IV-15 : Schéma de fonctionnement d'un extensomètre .....	69

## **Chapitre V : Information préventive**

Figure V-1 : le signal d'alerte spécifique aux ouvrages hydrauliques .....	74
--	----

## **Chapitre VI : Auscultation du barrage de Taksebt**

Figure VI-1: Construction du barrage de Taksebt .....	76
Figure VI-2: Bornes et repères topographiques .....	77
Figure VI-3: Bornes topographiques .....	78
Figure VI-4: Tassement de la revanche du barrage .....	78
Figure VI-5: Tube tassométrique .....	79
Figure VI-5: Barre vinchon .....	80
Figure VI-6 : Station de mesure N° 1 .....	80
Figure VI-7: Station de mesure N° 2 .....	81
Figure VI-8: Station de mesure N° 3 .....	81
Figure VI-9 : Boîtes répartiteurs des câbles des cellules .....	82
Figure VI-10: Appareil de mesure des cellules .....	82
Figure VI-11: Mesure piézométrique .....	83
Figure VI-12 : Fuite .....	84
Figure VI-13 : Drain .....	84
Figure VI-14 : Mesure du débit .....	85
Figure VI-15 : Vue d'un puisard .....	87
Figure VI-16 : Le manomètre .....	87

## **Liste des tableaux :**

### **Chapitre III : La surveillance et sécurité des barrages**

Tableau III-1: Surveillance et entretien : répartition des tâches .....31

### **Chapitre IV : Comportement des barrages et appareils d'auscultation**

Tableau VI-1 : Instruments et moyens de mesures pour les barrages en remblai .....56

Tableau IV-2 : Instruments et moyens de mesure pour les barrages en béton .....59

Tableau IV-3 : Instruments et moyens de mesure pour les fondations en rocher et  
en terrain meuble .....63

### **Chapitre V : Information préventive**

Tableau V-1 : Les différents niveaux d'alerte .....73

## I- Généralités sur les barrages :

### I-1- Définition d'un barrage :

Le barrage est un ouvrage artificiel ou naturel construit à travers le lit d'un cours d'eau, retenant ou pouvant retenir de l'eau ; il peut aussi servir à faire une dérivation du cours d'eau. Il barre sur toute sa largeur une section de la vallée et qui crée ainsi une dépression artificielle étanche à l'eau.

Les barrages artificiels doivent être placés dans des cuvettes géologiquement étanches. Ils sont composés d'un corps conçu de manière spécifique à chaque type d'ouvrage, reposant sur une fondation étanche ou rendue étanche en amont.

Un barrage n'est pas inerte. Il vit, travaille et se fatigue, en fonction des efforts auxquels il est soumis. De son état va dépendre la sécurité des populations en aval.

Un barrage est un mur placé en travers d'un cours d'eau, afin de relever le niveau de ce dernier pour créer une chute ou une réserve. Il retient l'eau avec un masque d'étanchéité. Ce mur intègre un certain nombre d'ouvrages dits annexes lui permettant de remplir ses fonctions :

- un évacuateur de crue qui protège des risques de submersion en cas de crue
- une vidange destinée à vider la retenue
- une prise d'eau pour produire de l'énergie hydroélectrique

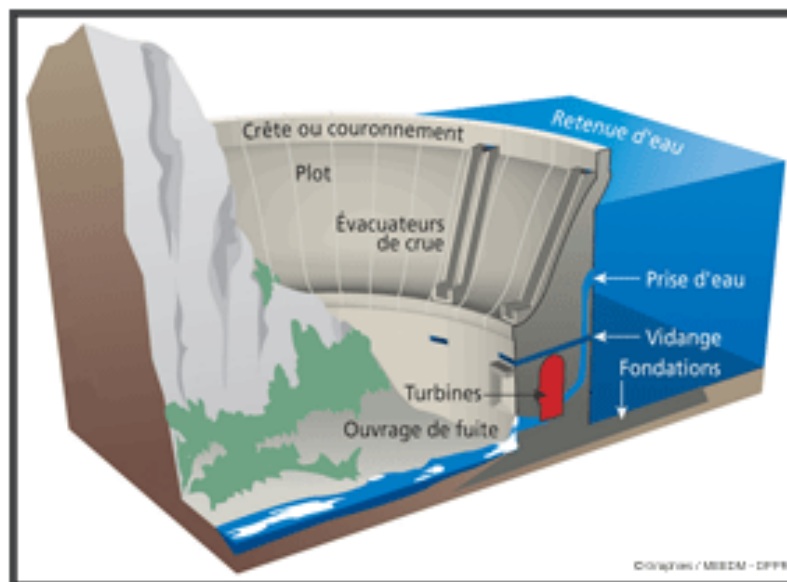


Figure I-1 : structure d'un barrage

## I-2- Le choix du site d'un barrage :

Les techniques de construction d'un barrage nécessitent une étude approfondie de la topographie, de la géologie et de l'hydrologie. Ces trois facteurs permettent de comprendre les phénomènes hydrauliques et ainsi d'adopter le corps et le type de construction au lieu choisi.

Il faut :

### I-2-1- de bonnes conditions topographiques :

Un site de barrage, au sens topographique, se place sur un verrou, resserrement de la vallée situé juste en aval d'une cuvette naturelle susceptible, une fois fermée, de constituer un réservoir de volume suffisant.

La forme du site proprement dit influe sur le choix du type de barrage ; on peut réduire cette forme à deux caractéristiques : la largeur relative ( $L/H$ ), qui varie en pratique de 1 à 4, parfois plus et la forme en U ou en V.

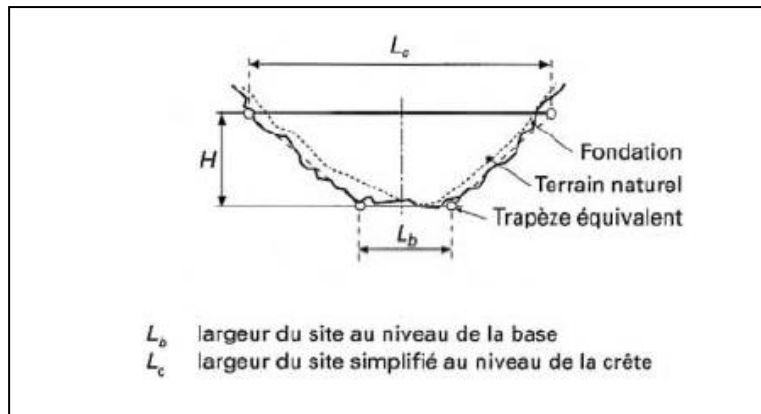


Figure I-2 Géométrie simplifiée d'un site de barrage

### I-2-2- De bonnes conditions géologiques :

Les roches sur lesquelles s'appuie le barrage doivent être stables et étanches, à la fois pour des raisons d'efficacité et de sécurité.

La constitution même d'une retenue d'eau requiert du massif dans lequel elle est située des propriétés minimales en matière d'étanchéité naturelle ; il serait en effet très coûteux de généraliser l'étanchement artificiel à tout le fond du bassin, et de telles réalisations sont exceptionnelles. Par ailleurs, chaque type de barrage requiert des propriétés mécaniques minimales spécifiques en matière de déformabilité et de résistance des appuis, lorsque ceux-ci sont soumis aux :

- Forces appliquées directement par le barrage ;
- Forces internes induites par la percolation de l'eau au sein de la fondation.

Tout projet de barrage commence donc par une étude géologique, géophysique et géotechnique qui est progressivement affinée au fur et à mesure que le projet se développe et que les choix se précisent sur le type et la hauteur du barrage. Le géologue intervient en premier lieu pour expliquer la nature et la structure du site, mettre en évidence les principales incertitudes; les reconnaissances géotechniques par sondages, galeries de reconnaissances, prélèvements, essais de laboratoire et essais in situ sont réalisées pour lever les inconnues.

Ces études aboutissent à la détermination de la nature des différentes formations (sols ou roches) présentes sur le site, leur extension géométrique, leurs propriétés en matière de perméabilité, déformabilité, résistance mécanique, altérabilité à l'eau ; les discontinuités (failles, fractures, diaclases, zones de dissolution ou karsts) sont recherchées avec le plus grand soin.

### **I-2-3- De bonnes conditions hydrologiques :**

Les précipitations sur le bassin versant qui alimente la cuvette du barrage doivent être suffisantes pour la remplir et compenser les pertes d'évaporation du lac de retenue.

L'étude hydrologique du bassin versant permet de définir les apports moyens du cours d'eau, exprimés en hm<sup>3</sup>/an ou en m<sup>3</sup>/s, et leurs variations probables à une échelle de temps saisonnière ou interannuelle.

Par ailleurs, l'étude hydrologique fournit également le volume et le débit maximal des crues très rares, qu'il faut considérer pour tous les ouvrages, même ceux n'ayant en principe aucun rôle de protection contre les crues : on impose généralement que le barrage une fois construit soit en mesure de supporter une crue ayant une période de récurrence de 10 000 ans (cela surtout pour les barrages en remblai qui ne peuvent supporter une submersion sans risque de ruine). Par extension, l'étude hydrologique comprend également les informations sur le régime des transports solides de la rivière, dus à l'érosion des sols du bassin versant ; on évalue ainsi la rapidité de comblement de la « tranche morte » du réservoir.

### **I-3- Les différents types de barrage :**

Les barrages forment avec le terrain sur lequel ils sont construits un ensemble indissociable : à chaque site, un type de barrage, un dimensionnement adapté tant sur le plan technique qu'économique. C'est pourquoi il n'existe pas de barrage type standard. De plus, certains sont formés par la juxtaposition de plusieurs structures différentes justifiées par des caractéristiques de sol de fondation particulières et aussi par des choix économiques.

Les types de barrages peuvent être classés en différentes catégories selon le matériau de construction et selon le mode de résistance à la poussée de l'eau.

On distingue deux types de barrages selon les matériaux qui les composent ;

- Barrages en remblai (ouvrages souples)
- Barrages en béton ou en maçonnerie (ouvrages rigides)

### I-3-1- Les barrages en remblais :(digues)

On appelle barrages en remblais tous les barrages constitués d'un matériau meuble, qu'il soit très fin ou très grossier; peuvent être en terre ou en enrochement. Ces derniers peuvent être considérés comme des barrages poids puisque ils résistent à la pression de l'eau par leur propre poids. Ces barrages présentent l'avantage de pouvoir reposer sur des fondations de qualité médiocre. On distingue plusieurs types :

#### I-3-1-1- Les barrages à masque amont :

Ce sont des barrages en enrochements. Ils existent dans des sites où aucune terre n'est disponible mais seulement des enrochements. Ceux-ci sont alors employés pour réaliser le corps du barrage, tandis que l'étanchéité est assurée par un masque de béton

Les barrages à masque amont étanche sont constitués d'un remblai plus au moins perméable assurant la stabilité d'ensemble. Un écran imperméable, appelé masque est mis en place sur le parement amont de façon à rendre le barrage étanche et lui permettre de retenir l'eau de réservoir. Il est complété en pied par une paroi moulée d'étanchéité pour limiter le débit de fuite

Le masque est réalisé en béton avec des produits bitumineux ou encore au moyen d'une géomembrane. Son épaisseur est limitée, ce qui lui permet de s'adapter aux déformations faibles mais inévitables du massif support (les géomembranes peuvent même accepter des déformations importantes). La présence du masque en parement amont présente le double avantage de permettre des réparations en cas de dégradation du masque, mais aussi d'autoriser des vidanges de retenue très rapides.

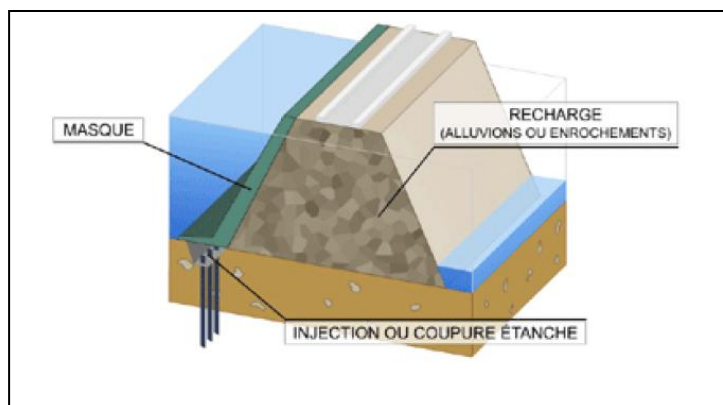


Figure I-3 : schéma d'un barrage à masque amont

### I-3-1-2- Les barrages zonés avec un noyau :

Les barrages zonés, sont des barrages en remblai constitués de plusieurs types des matériaux disposés de façon à assurer séparément les fonctions de stabilité du barrage et d'étanchéité. Le découpage du corps du barrage en matériaux différents est appelé zonage. Il permet de faire de grandes économies dans les volumes mis en œuvre et d'utiliser au mieux les matériaux disponibles sur le site.

Le noyau imperméable constitué de terres argileuses, d'argile, de terres caillouteuses ou tout autre matériau terreux comportant une forte portion en matériaux fins lui conférant une faible perméabilité. Lorsque ce matériau est introuvable sur le site, on peut avoir recours à des matériaux de substitution tels qu'une paroi moulée ou bien une superposition de couches de béton bitumineux ou d'asphalte.

Les zones encadrant le noyau imperméable sont en tout venant compacté. Ils assurent la résistance et la stabilité du barrage, en particulier pour le talus amont en cas de vidange rapide.

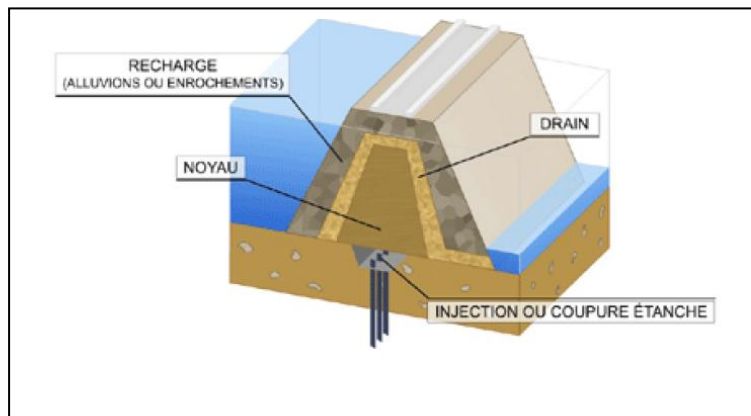


Figure I-4 : schéma d'un barrage zoné

### I-3-1-3- Les barrages en terre homogène :

Les barrages en terre homogène sont des digues en remblai constituées d'un seul matériau meuble suffisamment imperméable pour assurer à la fois l'étanchéité et la résistance. La terre est généralement mise en place par compactage.

Ce type de barrages est bien adapté aux sites ayant une fondation déformable. De conception rustique, ils ont une grande emprise au sol, n'engendrent que peu de contraintes, s'accompagnent en fondation de faibles gradients d'écoulement et peuvent accepter des tassements de la fondation. Par contre, ils ne supportent pas bien les variations rapides du plan d'eau et ne supportent pas ou très peu la submersion par dessus la crête

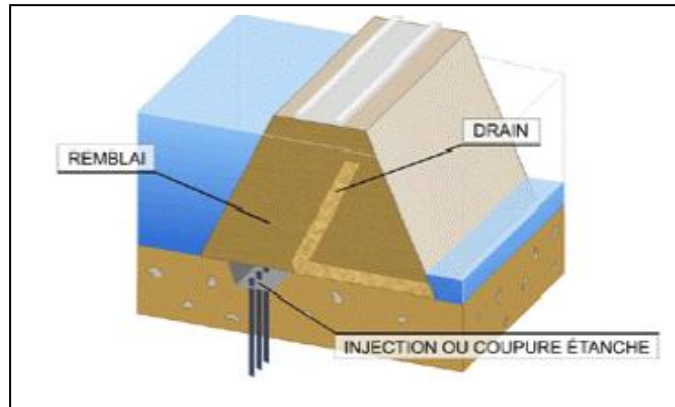


Figure I-5 : schéma d'un barrage en terre homogène

### I-3-2- Les barrages en béton ou en maçonnerie:

Peuvent être de différents types :

#### I-3-2-1- Les barrages poids :

C'est une solide structure en béton à profil triangulaire, épaissie à sa base et affinée vers le haut. Ils résistent à la poussée de l'eau par leurs seul poids. Ces ouvrages peuvent être en maçonnerie ou en béton, en maçonnerie hourdée à la chaux pour les plus anciens, en béton compacté au rouleau pour les plus récents. Ce type de barrage convient bien pour des vallées larges ayant une fondation rocheuse. Ils sont souvent découpés en plots à la construction, l'étanchéité entre plots étant assurée par un dispositif placé à l'amont des joints.

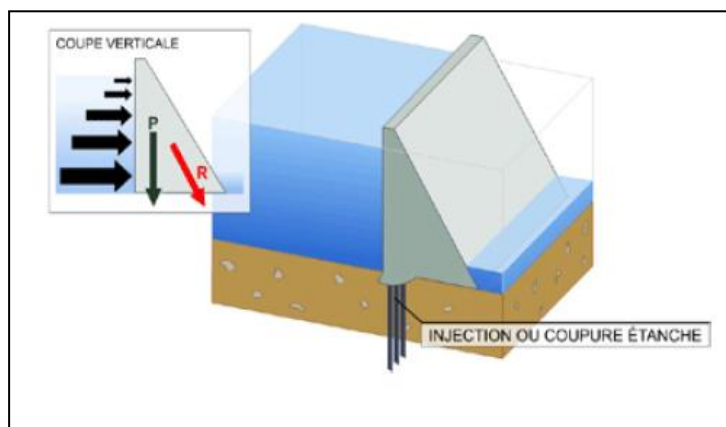


Figure I-6: schéma d'un barrage poids

### I-3-2-2- Les barrages poids évidés :

Ce sont des barrages où l'on a créé des vides, par coffrage, dans leur partie interne. Il est paradoxal de vouloir alléger un barrage poids, mais le gain de poids est largement compensé par la diminution des sous-pressions grâce à un drainage intense réalisé à partir de ces cavités.

### I-3-2-3- Les barrages voûtes :

Ont une forme convexe tournée vers l'amont. La poussée de l'eau est reportée sur les flancs de la vallée au moyen du mur de béton arqué verticalement et horizontalement.

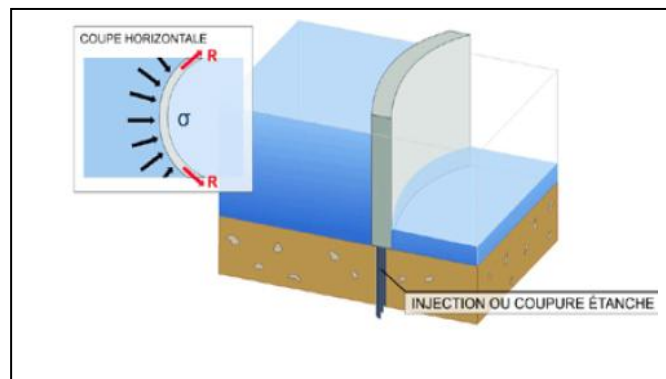


Figure I-7 : schéma d'un barrage voûte

### I-3-2-4- Les barrages à contreforts:

Il comporte un voile d'étanchéité s'appuyant sur des piliers régulièrement espacés. Il est formé d'un mur amont qui supporte l'eau retenue. L'édifice est équipé d'une série de renforts ou murs triangulaires verticaux construits pour supporter la plate-forme et redistribuer la poussée de l'eau vers les fondations. Barrages à contreforts sont bien adaptés aux vallées larges avec une fondation rocheuse de bonne qualité.

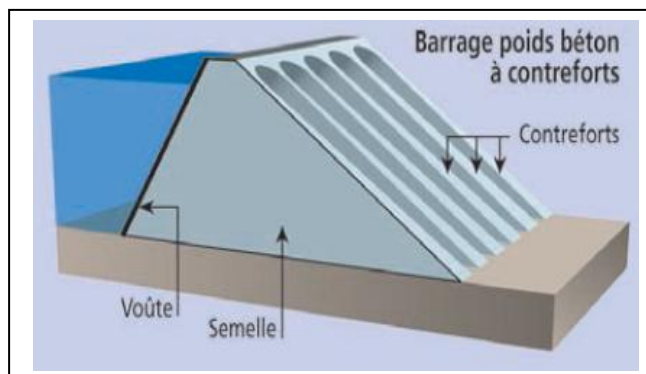


Figure I-8 : schéma d'un barrage à contreforts

#### I-4- L'utilisation des barrages :

Les barrages peuvent être construits pour plusieurs objectifs :

- produire de l'électricité à partir d'une énergie renouvelable, celle de l'eau, avec des usines hydroélectriques accolées au barrage ou situées plus bas dans la vallée et alimentées par des conduites forcées.
- créer des réserves d'eau pour l'alimentation en eau potable des villes. L'eau peut également être nécessaire pour des besoins industriels ;
- irriguer des zones agricoles ayant de gros besoins en eau lors des périodes sèches.
- maintenir dans les rivières un débit minimum suffisant lors des étiages, pour assurer à la fois une qualité écologique satisfaisante des rivières et permettre les prélèvements par pompage à l'aval (pour des besoins d'alimentation en eau, d'irrigation...) ;
- réduire l'effet des crues en retardant l'eau grâce au stockage dans la retenue qui se remplit pour la relâcher après le passage de la crue.

Certains de ces objectifs peuvent être complémentaires sur un même ouvrage. D'autres sont, a priori, opposés : il est, par exemple, impossible d'avoir en même temps une retenue pleine pour fournir une réserve d'eau potable mais aussi une retenue vide pour limiter au maximum l'impact des crues. Notamment, les barrages écrêteurs de crue sont des ouvrages conçus spécialement à cette fin avec des dispositions particulières de conception et d'exploitation.

#### I-5- Classification des barrages :

Pour une meilleure prise en compte des risques potentiels que ces ouvrages peuvent présenter et ainsi renforcer leur sécurité, les digues et barrages sont classés en quatre catégories pour les hiérarchiser selon les mesures à mettre en œuvre pour leur suivi. Celles-ci vont de "A" pour les ouvrages qui intéressent le plus la sécurité publique à "D" pour les ouvrages présentant un risque plus faible. :

- **pour les barrages:** selon leur hauteur et le volume retenu par le barrage ;
- **pour les digues:** selon leur hauteur et la population située dans la zone protégée par l'ouvrage.

Le classement des barrages est fait de la manière suivante :

- **Classe A :** barrage de plus de 20 m de hauteur au dessus du sol naturel.
- **Classe B :** barrage de plus de 10 m et dont le rapport  $(H^2 \times V^{1/2}) \square 200$
- **Classe C :** barrage de plus de 5 m et dont le rapport  $(H^2 \times V^{1/2}) \square 20$
- **Classe D :** autres barrages de plus de 2 m de hauteur

Avec :

H : La plus grande hauteur en mètres mesurée verticalement entre le sommet de l'ouvrage et le terrain naturel à l'aplomb de ce sommet.

V : Volume de la retenue exprimé en millions de mètres cubes lorsque celle-ci est à sa cote de retenue normale.

Pour apprécier les risques présentés par ces ouvrages en plus des données géométriques il serait utile de connaître pour chaque ouvrage la population habitant dans la zone qui, en cas de rupture, serait balayée par l'onde de submersion.

Les plus grands d'entre eux, c'est-à-dire les barrages de classe A dont le réservoir possède une capacité égale ou supérieure à 15 millions de mètres cubes, sont soumis à l'obligation de posséder un plan particulier d'intervention (PPI).

Les digues font l'objet de critères différents prenant en compte les populations protégées : P : population maximale exprimée en nombre d'habitants résidant dans la zone protégée, en incluant les populations saisonnières.

- **Classe A** :  $H > 1$  et  $P > 50000$
- **Classe B** :  $H > 1$  et  $1000 < P < 50000$
- **Classe C** :  $H > 1$  et  $10 < P < 1000$
- **Classe D** :  $H < 1$  et  $P > 10$

Dans tous les cas le Préfet peut modifier le classement d'un ouvrage s'il estime que celui défini ci-dessus n'est pas suffisant pour assurer la prévention des risques pour la sécurité des personnes et des biens.

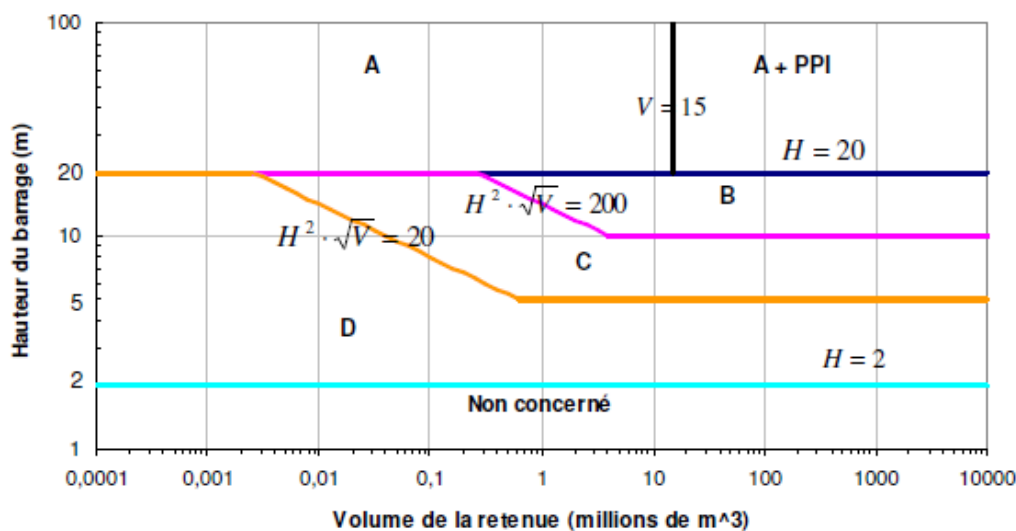


Figure I-9 : Classement des barrages selon leur géométrie et leur retenue

Les ruptures de barrages sont des événements très rares. Elles peuvent être de différents ordres (problèmes techniques, causes naturelles ou causes humaines) et correspondent à une destruction totale ou partielle de l'ouvrage. Les causes, ainsi que les mécanismes en jeu lors d'une rupture sont variables en fonction des caractéristiques propres du barrage.

## **II-1- Les causes des ruptures :**

### **II-1-1- Les problèmes techniques :**

Peuvent entraîner la rupture d'un ouvrage. Il peut s'agir d'un défaut de fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des crues ou bien d'un vice de conception, de construction ou de matériaux, vieillissement des installations. Le type de barrage, les matériaux utilisés, la nature des fondations ainsi que l'âge de l'ouvrage vont avoir une influence sur l'apparition de ces problèmes. Cependant, l'évolution des techniques de construction rend les barrages modernes beaucoup plus sûrs.

### **II-1-2- Des causes naturelles :**

Peuvent également être à l'origine de rupture de barrage. Il en est ainsi des crues exceptionnelles, d'intensité supérieure à celle retenue pour le dimensionnement des ouvrages évacuateurs appelée crue de projet. Le niveau de sécurité retenu est généralement compris entre la crue millénale et la crue décamillénale. Les barrages en remblai ne supportent pas la submersion et sont donc plus vulnérables aux débordements. La phase de chantier pour les barrages en construction est une période sensible aux risques de crue, car les ouvrages d'évacuation ne sont pas encore opérationnels.

Les glissements de terrains, soit de l'ouvrage lui-même dans le cas de barrages en remblai, soit des terrains entourant la retenue sont également une cause de rupture. L'ouvrage peut être déstabilisé par un glissement (barrage de Malpasset, 1959) ou bien submergé par la vague engendrée par un glissement en amont de la retenue (barrage du Vajont, 1963).

Enfin les séismes peuvent causer des dommages mineurs à ne pas négliger (déformations, tassements, fissures, etc). Les ruptures de barrages dues aux séismes sont d'ailleurs très rares.

### **II-1-3- Des causes humaines :**

Peuvent enfin être à l'origine d'accidents : études préalables pas assez approfondies, contrôle d'exécution insuffisant, erreurs d'exploitation, défaut de surveillance et d'entretien ou encore actes de malveillance.

## II-2- Typologie des risques :

### II-2-1- Risques naturels :

Les risques naturels sont de deux ordres:

- Les risques climatiques (tempêtes, cyclones et tornades mais aussi inondations et sécheresses) qui déterminent des risques hydrologiques ;
- Les risques lithosphériques appelés aussi risques d'origine géophysique comme les séismes, glissements de terrain, les risques volcaniques et les tsunamis engendrés par séismes sous marins.

Certains de ces risques peuvent être provoqués par des interventions humaines telle l'érosion aggravée par des pratiques agro-pastorales de culture sur brûlis, de déforestation ou de surpâturages voire par les constructions en zone inondable. Les inondations aussi peuvent être des risques majeurs pour les vallées densément peuplées dont l'urbanisation imperméabilise les sols et augmente le ruissellement.

### II-2-2- Risques d'origine anthropique :

Les risques provoqués par l'être humain sont multiples mais les plus importants sont les risques toxiques, risques d'incendie, risques d'explosion. Il faut en connaître l'aléa (produits, procédés, contexte) et l'enjeu (humain, environnemental, économique). Par leur origine, on distingue :

- Risques technologiques et environnementaux : qui sont la conséquence directe et perverse d'une industrialisation peu réglementée mais aussi des systèmes de transport de matières premières, de produits dangereux, d'endommagement de pipe-lines... etc.
- Risques naturels aggravés par l'action humaine : tels que la déforestation et désertification. Une grande partie des zones tropicales devient de plus en plus chaude et sèche. L'Afrique est le continent le plus touché par la désertification en particulier dans la zone déjà aride de l'Afrique de l'Ouest.

## II-3- Les enjeux humains, matériels et environnementaux :

L'onde de submersion, par sa force intrinsèque, occasionne d'énormes dommages en aval du barrage. Elle est suivie d'une inondation importante, mêlant eau et matériaux issus du barrage, et de l'érosion intense de la vallée. Un tel événement a des conséquences directes :

- **Sur les populations** : allant de blessures plus ou moins graves à la mort par noyade ou ensevelissement. Les victimes peuvent également être isolées suite à l'inondation des voies de communication ou subir un relogement temporaire durant le temps que dure la crise et le retour à la normale.

- **Sur les biens** : vont également des simples dommages à la destruction totale des habitations, voies de communication et autres ouvrages. Dans le cas où d'autres barrages

seraient présents en aval, l'onde de submersion peut provoquer à son tour leur rupture et accentuer ainsi les dommages.

- **Sur l'environnement** : sont multiples : la faune et la flore sont détruites par le passage de l'eau ; le sol est emporté, ce qui rend l'exploitation agricole des terrains difficile. Diverses pollutions peuvent être occasionnées par la destruction d'usines et autres bâtiments industriels. Des accidents technologiques dus à l'implantation d'entreprises dans la vallée (déchets toxiques, explosions par réaction avec l'eau, etc.) peuvent avoir lieu suite au passage de l'onde.

#### II-4- Types de rupture :

Le risque de rupture brusque et inopinée est considéré comme très faible, voire nul. La situation de rupture paraît plutôt liée à une évolution plus ou moins rapide d'une dégradation de l'ouvrage susceptible d'être détectée par la surveillance et l'auscultation.

Les barrages en remblai peuvent être touchés par une rupture progressive, causée par un phénomène d'érosion externe ou interne.

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.

L'érosion interne correspond à l'entraînement des matériaux au sein du corps de l'ouvrage ou de sa fondation. Elle est provoquée par des percolations excessives à travers l'ouvrage. Le conduit de fuite s'agrandit par érosion jusqu'à provoquer l'effondrement de la structure.

Les barrages en maçonnerie ou en béton sont menacés par une rupture instantanée partielle ou totale, produite par renversement ou par glissement d'un ou plusieurs plots.

Le phénomène de rupture de barrage dépend des caractéristiques propres du barrage. Ainsi, la rupture peut être :

- **Progressive** dans le cas des barrages en remblais, par érosion régressive, suite à une submersion de l'ouvrage ou à une fuite à travers celui-ci (phénomène de "renard") ;
- **Brutale** dans le cas des barrages en béton, par renversement ou par glissement d'un ou plusieurs plots.

### II-4-1- Description du mécanisme d'érosion interne :

Les ruptures par érosion interne et par renard hydraulique ont représenté un peu plus de la moitié des ruptures des barrages en remblai entre 1950 et 1986, en excluant les ruptures pendant la construction. Elle constitue la première source d'incidents sur les ouvrages hydrauliques en terre. Le mode de rupture par érosion interne peut toucher aussi bien la fondation que le remblai, y compris le noyau étanche. Il peut également se propager du remblai vers la fondation.

L'érosion interne est provoquée par l'existence de fuites non contrôlées par le système de drainage et qui entraînent vers l'aval des particules constitutives du remblai (ou de la fondation) à la suite de leur arrachement. Huit phénomènes d'arrachement peuvent être à l'origine d'une érosion interne:

➤ **La boullance:** état d'un volume de sol dans lequel les grains flottent, entourés d'une phase liquide continue, sous l'effet d'une pression d'eau qui annule la contrainte effective. La boullance se distingue de la liquéfaction par le mécanisme initiateur qui est d'origine hydraulique (l'écoulement) pour le premier et mécanique (les vibrations) pour le second ;

➤ **La suffusion:** mouvement des grains de petite taille non structuraux lorsque la vitesse locale (ou le gradient local) dépasse une certaine limite. Le mouvement des grains est ensuite conditionné par les conditions hydrauliques et géométriques de site ;

➤ **L'érosion régressive:** arrachement des particules, une à une, à la surface d'un matériau sous l'effet de la poussée de l'écoulement percolant à travers le matériau. La valeur locale du gradient hydraulique de sortie et les vitesses d'écoulement sont suffisantes pour détacher les particules de la surface.

➤ **Le débouillage:** déséquilibre d'un volume de sol sous l'action de la poussée de l'eau que la résistance au cisaillement sur le pourtour du volume ne parvient plus à compenser. Il peut se produire dans le cas d'une fissure rocheuse ou d'un conduit karstique rempli de matériaux argileux et peut provoquer un élargissement de la fissure ;

➤ **La dissolution:** disparition d'une partie des constituants des particules, sous une action chimique ou thermique ;

➤ **La défloculation ou dispersion:** phénomène physico-chimique qui tend à diminuer la taille des agglomérats de particules argileuses, disperser les plaquettes d'argile et faciliter leur mobilité.

➤ **L'arrachement ou l'entraînement:** détachement des particules des parois d'un canal ou d'une rivière à partir d'une certaine valeur du cisaillement engendré par l'écoulement. Ce phénomène commande la vitesse de développement des renards. Le débit solide évacué est fonction du rapport entre la contrainte de cisaillement réelle et la contrainte de cisaillement critique ;

➤ **L'exsolution:** de l'air piégé dans le noyau lors de la mise en eau est comprimé et partiellement dissous dans l'eau en partie amont du noyau. L'air est ensuite transporté par l'eau via le corps du barrage et relâché dans les parties aval du noyau où la pression de l'eau interstitielle est plus faible. Il en résulte une diminution locale de la perméabilité lors du piégeage de l'air et de fait une augmentation nette des pressions interstitielles.

Lors du phénomène de renard, le transport des particules est concentré dans un conduit et les vitesses d'écoulement sont rapides. Sont distingués en fonction des mécanismes mis en jeu dans l'initiation et la progression :

- le renard par érosion régressive dans lequel l'eau entraîne de fines particules en commençant par le débouché à l'aval. L'érosion remonte ensuite vers l'amont en s'accéléralant car l'eau a un trajet de plus en plus court à parcourir et sa vitesse augmente ;
- l'érosion interne par fuite concentrée qui se produit du fait par exemple d'une fissure dans le noyau, d'une zone de forte perméabilité ou le long d'une conduite. Le trou initié s'agrandit pour former un conduit ;

Dans ces deux situations, le phénomène peut mener jusqu'à l'ouverture d'une brèche dans l'ouvrage.

Le mode de rupture par renard hydraulique est plus rapide que le mode de rupture par suffusion. Il conduit rapidement à la rupture par création d'une brèche. L'augmentation des débits de fuite est également un indicateur remarquable. Ces phénomènes extrêmes menant à la rupture peuvent se produire à la première mise en eau mais également beaucoup plus tard dans la vie d'un barrage.

#### II-4-2- L'érosion régressive :

L'érosion régressive (souvent associé au phénomène de renard) est un phénomène qui se produit lorsqu'il y a une circulation d'eau importante au travers le remblai ou sa fondation. Ces écoulements risquent, petit à petit, d'entraîner des particules fines jusqu'à la formation d'un véritable conduit dans le corps de l'ouvrage. En pratique, l'érosion régressive se produit lorsque les débits de percolation (et le gradient hydraulique) n'ont pas été bien contrôlés, ou encore lorsque les filtres et/ou drains ont été mal conçus ou mal construits. La présence d'un chemin de moindre résistance comme des fissures, des voies de percolation à proximité des conduites rigides, ou des zones lâches dans des matériaux hétérogènes, favorisent le développement d'érosion régressive. Outre l'érosion interne (aussi appelée suffusion), qui désigne la migration des particules fines au sein d'un matériau unique, l'érosion régressive inclue plusieurs phénomènes particuliers tels l'érosion de contact, de colmatage, et de filtration.

## II-5- Modalités de rupture :

Il existe trois causes principales de rupture qui ont été observées et répertoriées. Ces ruptures sont dues soit :

- à l'effet renard
- au glissement
- à la surverse

Le critère le plus important pour la résistance d'un barrage, est sa tenue à l'érosion tant en surface pour résister au ruissellement, que dans le barrage lui-même pour résister aux circulations internes. On peut, par observation, donner quelques critères sur la tenue d'un barrage en fonction de ses matériaux :

- Les barrages à prédominance meuble, à forte teneur en fines particules, de faible densité, faible granulométrie, ou composés de sédiments facilement liquéfiables sont peu résistants.
- Les barrages constitués de matériaux à forte granulométrie et bonne cohésion, composés de très gros éléments résistent mieux à la rupture et ont peu de chance de rompre brutalement.

### II-5-1- Rupture par renard :

Les ruptures consécutives à une érosion interne (effet renard) sont peu fréquentes. (4 à 6% des cas observés). La rupture par effet renard est fréquente lorsque les matériaux constitutifs du barrage ont pour propriétés d'être :

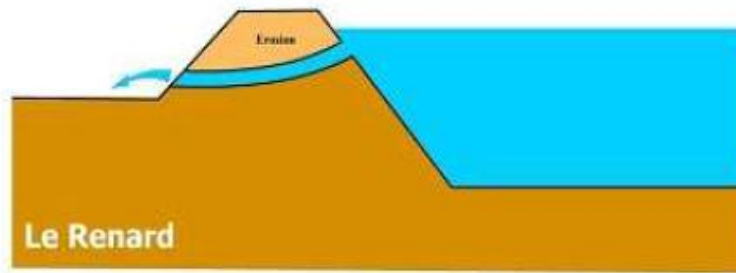
- perméables,
- fortement érodables,

Les barrages naturels sont constitués de matériaux hétérogènes ayant été peu compactés (en comparaison aux barrages de construction. De ce fait ces barrages sont souvent poreux, non imperméabilisés et non drainés. Il y a donc présence d'écoulements internes. Ces écoulements peuvent entraîner de l'érosion interne, qui peut aboutir à une rupture par renard. Des suintements sont souvent observés à la base de nombreux barrages. Mais ces suintements sont rarement assez importants pour provoquer un « renard ».

L'érosion interne peut aussi provoquer un affaissement partiel du barrage, suivi du débordement, de la formation d'une brèche et de la rupture (donc rupture par surverse).

Il y a peu d'exemple de rupture par renard car celle-ci arrive rarement. Deux cas ont tout de même pu être observés.

En 1966, rupture de l'éboulement ayant entraîné la formation du lac Yashinkul sur la rivière Isfayramsay (Centre sud de l'ex URSS) et en 1906 rupture de l'éboulement sur le cache creek (Californie).



**Figure II-1: Rupture par renard**

### II-5-2- Rupture par glissement :

Il existe peu de cas de rupture par glissement des pentes du barrage. Ceci est dû au fait que naturellement les pentes du barrage se sont formées à un état d'équilibre naturel. Les glissements sont observés dans les cas où les pentes du barrage s'avèrent trop raides. Les masses éboulées avec leurs pentes relativement douces sont souvent peu vulnérables au glissement.



**Figure II-2 : Le glissement du talus , Barrages d'ARMUS et CAU ; (GERS ,France)**

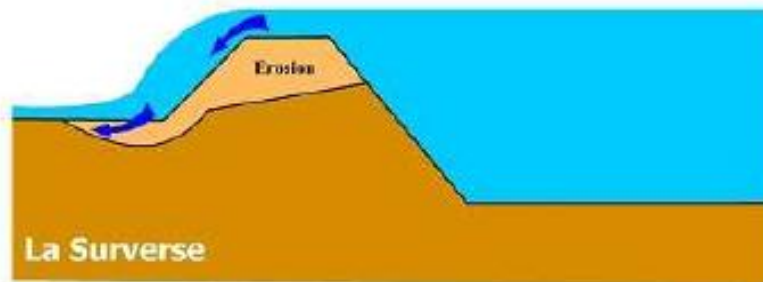
### II-5-3- Rupture par surverse :

La surverse est la principale cause de rupture de barrages naturels. Elle représente 92 à 95 % des cas de rupture observés. S'il n'y a pas d'infiltration d'eau dans le barrage, le barrage se remplit jusqu'au déversement. Il y a alors apparition d'un écoulement, sur le parement aval de la masse éboulée. L'écoulement emporte progressivement les matériaux constituant le

barrage pour aboutir par érosion régressive à la formation d'une brèche. Une fois la brèche formée, la rupture du barrage et la vidange de la retenue peuvent alors être très rapides.

La brèche due à la surverse se forme localement au point le plus bas ou le plus faible de la crête du barrage, puis se développe jusqu'au point bas du barrage, avant de s'élargir jusqu'à une situation d'équilibre (qui n'atteint pas la largeur totale du barrage).

Il est rare que la brèche descende jusqu'au niveau d'origine du cours d'eau car la présence de matériaux grossiers au sein de l'éboulement limite l'incision.



**Figure II-3: Rupture par surverse**

#### **II-6- L'onde de submersion :**

Lors de la rupture d'un barrage, on observe en aval une inondation catastrophique, précédée par le déferlement d'une onde de submersion plus au moins importante selon le type de barrage et la nature de la rupture et occasionnant d'énormes dégâts en raison de la nature des matériaux transportés par le flot.

Il est possible de simuler la rupture d'un barrage et de modéliser l'onde de submersion afin de déterminer quelles seraient les surélévations des niveaux dans la rivière à l'aval du barrage. Cela permet notamment de localiser les habitations et immeubles occupés par des personnes qui seraient submergés et de prévoir l'alerte.

La rupture d'un barrage entraîne la formation d'une onde de submersion se traduisant par une élévation brutale du niveau de l'eau à l'aval. La carte du risque représente les zones menacées par l'onde de submersion qui résulterait d'une rupture totale de l'ouvrage. Elle distingue la zone du quart d'heure dite zone de proximité immédiate juste en aval du barrage, des zones plus éloignées dites zones d'inondation spécifique qui sont submergées par l'onde de submersion mais qui ne le sont pas pour la crue de référence. Obligatoire pour les grands barrages, cette carte détermine, dès le projet de construction, quelles seront les caractéristiques de l'onde de submersion en tout point de la vallée : hauteur et vitesse de l'eau,

délai de passage de l'onde, etc. Les enjeux et les points sensibles (hôpitaux, écoles, etc.) y figurent également.

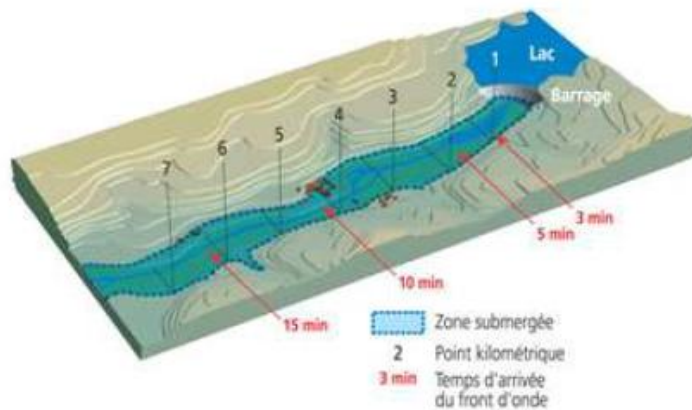


Figure II-4: La carte du risque

#### Définitions :

- **L'aléa** : est la manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique d'occurrence et d'intensités données.
- **L'enjeu** : est l'ensemble des personnes et des biens (ayant une valeur monétaire ou non monétaire) pouvant être affectés par un phénomène naturel ou des activités humaines.
- **Le risque majeur** : est la conséquence d'un aléa d'origine naturelle ou humaine, dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionnent des dommages importants et dépassent les capacités de réaction des instances directement concernées.
- **La vulnérabilité** : exprime et mesure le niveau de conséquences prévisibles de l'aléa sur les enjeux. Différentes actions peuvent la réduire en atténuant l'intensité de certains aléas ou en limitant les dommages sur les enjeux.

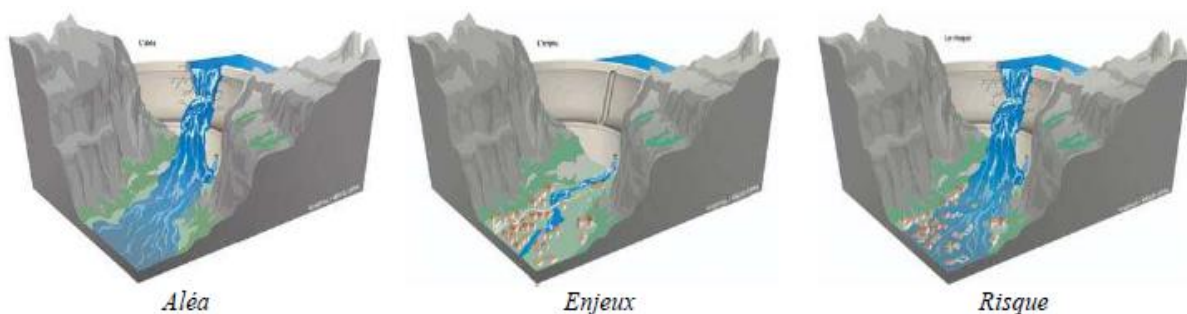


Figure II-5 : Aléa, Enjeux et Risque

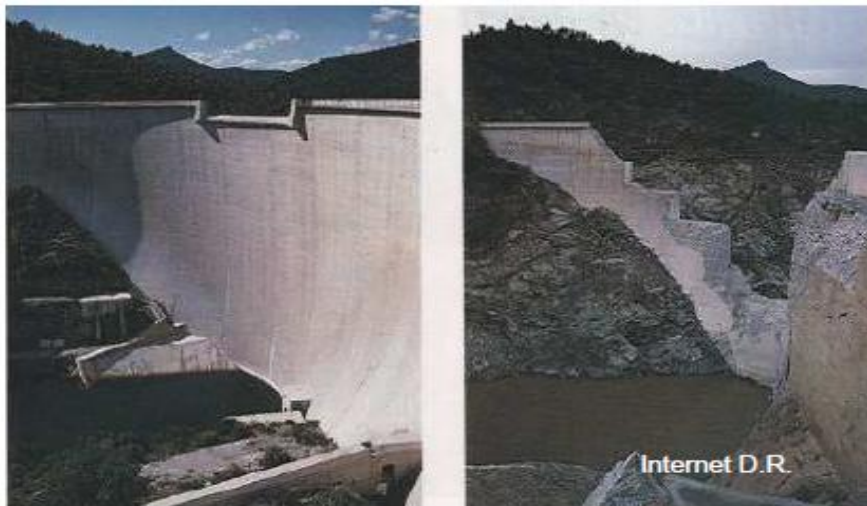
## II-6- Etat critique de l'instabilité :

### II-6-1- Rupture de barrage Malpasset 1959 :

#### II-6-1-1- L'accident :

Fin novembre 1959, des pluies diluviennes s'abattent sur la région. Il est décidé de laisser le barrage se remplir plutôt que d'ouvrir les vannes de vidange, pour ne pas gêner les travaux de l'autoroute Marseille - Nice en cours à 1 km en aval du barrage. Les quatre derniers mètres se sont remplis en moins de 24 h. Aucun contrôle n'est possible pendant cette phase de remplissage, phase décisive dans la vie d'un barrage.

Le soir du 2 décembre 1959, l'eau du barrage atteint pour la première fois le haut de l'édifice. Le barrage cède à 21h11. Une lame de 50 millions de mètres cubes d'eau s'engouffre dans la vallée du Reyran, dévastant tout sur son passage : La ville de Fréjus est submergée en quelques minutes par une vague d'eau et de boue 21 minutes plus tard.



**Figure II-6 : Photos du barrage Malpasset avant et après sa rupture le 2 décembre 1959.**

#### II-6-1-2- Les conséquences :

Les conséquences sont dramatiques. La catastrophe fait 423 victimes et environ 7 000 sinistrés. Fréjus se trouve isolée ; routes, téléphone, électricité, eau sont coupés. La Nationale 7 et la voie ferrée sont emportées sur plusieurs centaines de mètres.

De nombreux dommages matériels (habitations détruites, entreprises, exploitations agricoles dévastées...) sont constatés. Une couche de boue de 50 cm d'épaisseur recouvre une partie de la ville (quartiers du Reyran, du Pavadou, de la Gare et des Arènes). D'énormes blocs de béton seront retrouvés à 1 500 m en aval de l'ouvrage.

La vallée du Reyran est « décapée » sur 5 km ; 1350 ha de terres agricoles (fruits et légumes, vignes...) sont dévastées. 80 000 hectolitres de vin sont perdus.



**Figure II-7: La voie ferrée « vrillée comme un jouet »**



**Figure II-8: La ville de Frejus après le désastre**

### **II-6-1-3- Causes de rupture de Malpasset :**

Le béton de la voûte n'était pas responsable de l'accident, ni dans son calcul, ni dans sa réalisation: c'est le terrain de fondation qui a lâché. Restait à savoir pourquoi. Comme pour beaucoup d'autres accidents rares, ce sont en fait plusieurs caractères indépendants qui se sont trouvés réunis :

**II-6-1-3-1- Fondation du barrage :**

La foliation bien développée du massif rocheux a permis l'ouverture d'importantes fractures, en particulier sur la rive gauche, où elle était sub-verticale et tangente à la voûte. En effet, lorsqu'un barrage est rempli, l'eau le pousse vers l'aval. Ce déplacement entraîne le terrain de fondation de façon sensible, mais pas le terrain situé en amont (faute d'une résistance suffisante à la traction de la roche). Ce phénomène, négligeable dans le cas des barrages épais car il se répartit sur toute l'épaisseur, a été particulièrement important à Malpasset, d'autant plus que la roche était exceptionnellement déformable (près de 10 fois plus que pour les autres barrages du même type, celle de Tignes représentant le cas idéal d'une roche encaissante d'excellente qualité).

Une faille rive gauche (non repérée lors des études préliminaires) délimitait un bloc rocheux de grand volume qui est tombé vers l'aval sous la poussée de l'eau de la retenue. Cette chute, facilitée par les phénomènes de sous-pression (poussée d'Archimède), a été rendue plus dramatique encore par le fait qu'elle supportait la culée qui avait été placée sur la rive gauche pour maintenir la voûte du barrage, dont l'assise était incertaine.

Un tunnel fut creusé au niveau de la culée rive gauche pour étudier la faille et les caractéristiques du terrain. La perméabilité du terrain était particulièrement sensible à la compression, ce que personne n'avait remarqué lors de la construction. Cette caractéristique a sans doute joué un rôle important dans la rupture du barrage: le terrain de fondation est naturellement parcouru par des circulations d'eau du simple fait du fort gradient hydraulique qui existe entre la retenue à l'amont et le cours d'eau à l'aval. Mais dans le cas qui nous préoccupe, cette circulation a été rendue impossible par la formation d'une barrière imperméable dans les zones de compression engendrées par la poussée de la voûte. Toute la pression hydraulique s'est donc concentrée à ce niveau, accentuant l'instabilité de l'ouvrage dans son ensemble. Ce facteur n'avait pas été pris en compte lors de la construction. Pourtant, on avait pris conscience depuis la rupture du Barrage de Bouzey (Vosges) en 1895 que l'eau n'exerce pas seulement sa poussée sur la face amont du barrage, mais qu'elle s'infiltrait également dans les joints de la maçonnerie et sous l'ouvrage, mettant ainsi dangereusement en cause sa stabilité.

**II-6-1-3-2- Conditions d'exploitation :**

- Le remplissage très rapide des 4 derniers mètres du barrage (en 24 h) a opéré un véritable effet de choc sur la structure de ce dernier.
- Le Barrage de Malpasset ne faisait l'objet d'aucune surveillance particulière, ni de la part du bureau d'études responsable de sa construction, ni de la part d'aucun organisme public.

**II-7- Etat critique de l'érosion régressive :****II-7-1 Rupture du barrage de Téton :**

- 3 juin 1976, plusieurs petites infiltrations observées dans le mur de rive nord ;
- 4 Juin 1976, l'humidité a été notée dans la rive droite et les petits ressorts commençaient à apparaître (Panel indépendant, 1976).
- 5 Juin 1976, la première fuite principale a été notée entre 7:30 et 8:00 heure du matin. La fuite coulait à environ 500 à 800 litres par seconde dans la rive droite de la roche. De 9:00 heures du matin l'écoulement avait augmenté jusqu'à 1.100 à 1.400 litres par seconde et on avait observé l'infiltration environ 40 mètres au-dessous de la crête du barrage (Arthur, 1977).
- Entre 11:15 et 11:30 heure du matin le gros morceau de 6 mètre du barrage est tombé dans le tourbillon et dans des minutes le barrage entier s'est effondré (Panel indépendant, 1976).



**Figure II-9 : Vue sur le barrage de Téton (USA) avant rupture**



**Figure II-10 : Rupture du barrage de Téton (USA).**

**II-7-2- Causes de rupture :**

- Les informations sur le site et les études géologiques étaient appropriées et étendues ;
- Les roches volcaniques de site sont «fortement perméables et modérément intensément à joint» ;
- La présence des sols argileux légèrement plastiques, est fortement érodables ;
- Le remplissage rapide du barrage n'a pas contribué la rupture. Si le barrage avait été rempli plus lentement, "une rupture semblable se serait produit à une certaine date ultérieure." ;
- La sismicité n'était pas un facteur ;
- Il n'y avait pas assez d'instruments dans le barrage pour fournir des informations proportionnées au sujet des états de changement du remblai et des butées ;
- L'infiltration par le matériel pourrait avoir causé l'érosion en arrière ;
- L'érosion par le contact direct pourrait être produite, où l'eau était en contact avec les joints ouverts ;
- La cause fondamentale de la rupture peut être considérée comme une combinaison des facteurs géologiques et des décisions de conception.

### III-1- Introduction :

La surveillance est l'ensemble des actions ayant pour but de connaître si possible de prévenir tout fait susceptible de nuire à la sécurité du barrage ou à son bon fonctionnement. La surveillance repose sur l'inspection visuelle régulière et sur l'auscultation.

– L'inspection visuelle est une méthode qualitative qui est fondamentale car elle intègre la complexité du comportement de l'ouvrage ;

– L'auscultation est une méthode quantitative qui met en œuvre une instrumentation et une analyse des mesures spécifiques à chaque ouvrage.

L'auscultation est indispensable pour le suivi du barrage, de sa conception à sa mise hors service. C'est une composante de son comportement structurel et du contrôle de la sécurité. Elle permet d'indiquer à l'exploitant avant qu'il ne soit trop tard les travaux de confortement nécessaires et, dans les cas extrêmes, les mesures d'urgence assurant la protection des populations en aval.

### III-2- comment surveille-t-on un barrage ?

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

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 avant-coureurs et évolutifs qui pourraient mener à ces mécanismes de rupture,
- la connaissance, via des paramètres physiques, du comportement du barrage et de ses composantes.

La protection des personnes et des biens est en règle générale une responsabilité sociale de l'État qui doit, par des mesures législatives contraignantes, être en mesure d'imposer et de contrôler une surveillance effective et efficace des barrages. Pour cette raison, la surveillance des barrages doit s'appuyer sur un cadre légal et réglementaire définissant précisément les rôles et responsabilités des différents intervenants.

III-2-1- Élément de base d'un processus « Sécurité des barrages » :

Assurer la sécurité d'un barrage, ou de tout autre ouvrage de retenue, nécessite un ensemble d'activités concomitantes, bien coordonnées et raisonnablement agencées. Ces activités doivent être :

- complémentaires dans une chaîne d'actions successives menant à une garantie de sécurité ou de sûreté,
- dotées d'une certaine redondance, afin d'offrir une garantie allant au delà des aléas de fonctionnement.

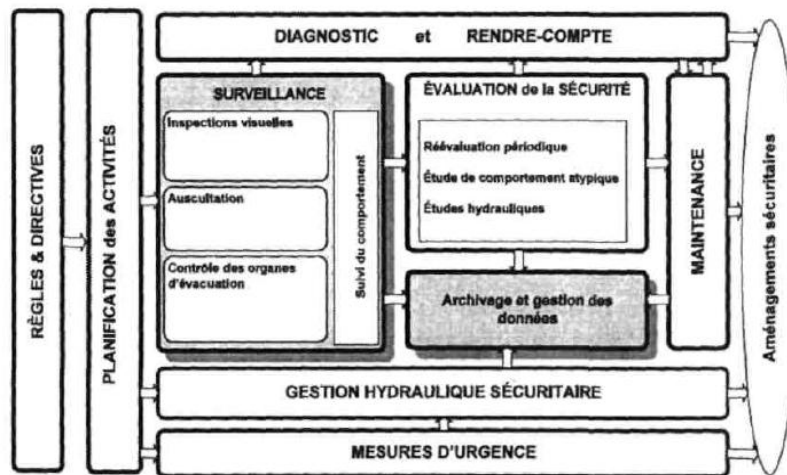


Figure III-1 : Programme de sécurité des barrages

La surveillance des barrages est la pierre angulaire et principale d'un tel processus avec ses principales activités, à savoir:

- les inspections de diverses natures,
- l'auscultation avec des instruments (moyens topographiques et instruments de mesure),
- le contrôle de la fonctionnalité des organes d'évacuation quels qu'ils soient, qui vise à s'assurer de leur fiabilité au moment opportun,
- et le suivi du comportement.

L'évaluation périodique de la sécurité d'un barrage, comme élément d'un aménagement parfois plus complexe, exploité dans un bassin hydrographique déterminé, est la révision complète de sa sécurité et de sa pérennité. Ces études de remise à jour des analyses de sécurité structurale et fonctionnelle des ouvrages de retenue s'appuient bien évidemment sur des études hydrauliques et des évaluations particulières en cas de comportement atypique ou de déficience présumée ou identifiée de l'ouvrage.

Le diagnostic et le rapport, en fin de processus, fournissent, suivant des méthodologies propres à chaque organisation :

- l'assurance requise pour la poursuite de l'exploitation,
- les recommandations requises pour le maintien ou l'amélioration de la sécurité,
- et des recommandations pour la pérennité de l'ouvrage étudié.

La surveillance des barrages prend donc une importance capitale, que l'on peut résumer ainsi :

- toutes ces activités se retrouvent sous une forme ou une autre dans un processus de travail défini avec précision (programme de sécurité des barrages, ensemble des consignes écrites de surveillance) ;
- la surveillance, quelle qu'en soit la forme, demeure une composante obligatoire et incontournable de tout effort de sécurité des barrages.

➤ **Cadre législatif et réglementaire :**

Depuis le début des années 1990, plusieurs initiatives ont visé à comparer les lois cadre régissant la surveillance des barrages dans les pays les plus expérimentés dans ce domaine. L'objectif a été de mettre en évidence les similitudes et de fournir ainsi aux autorités des différents pays une base pour développer une législation moderne et adaptée aux exigences actuelles de la surveillance des barrages.

L'analyse de ces lois et règlements met en évidence que deux thèmes essentiels doivent être traités :

- la surveillance des barrages,
- la sécurité des populations et des biens, en relation avec le risque résiduel qu'occasionnent les barrages.

**III-2-2- La surveillance des barrages :**

La responsabilité de la surveillance du barrage et de la garantie de la sécurité incombe au propriétaire de l'ouvrage, ou à son exploitant.

La surveillance des barrages est une activité ou une somme d'activités qui doivent aussi être :

- concomitantes en concourant au même but,
- complémentaires pour s'épauler mutuellement,
- suffisamment redondantes afin de pallier la non réalisation, pour quelque raison que se soit, d'une partie d'une autre activité.

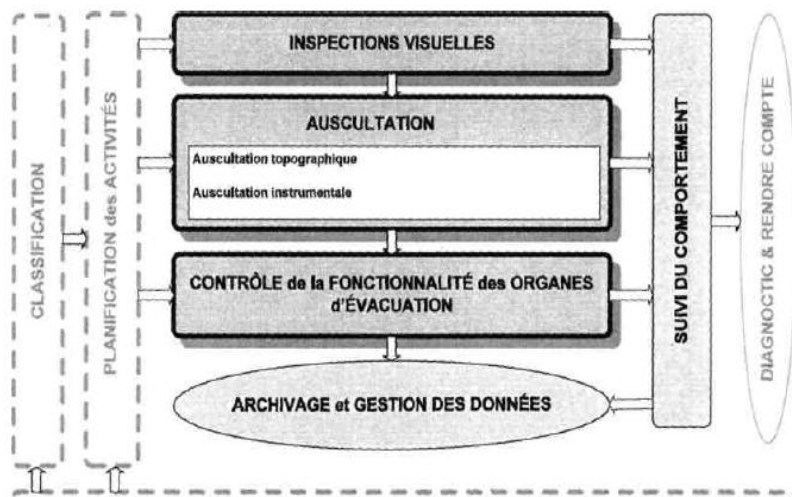


Figure III-2 : Règles et directives

### III-3- Objectif de la surveillance :

L'objectif de la surveillance et de l'entretien est de s'assurer en toutes circonstances un état et 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.

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 réparation ou de remise en état pourront être entrepris.

### III-4- Tâches de la surveillance :

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, ouvrages 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, de l'alarme eau.

Quant à l'entretien, qui englobe aussi les travaux de maintenance courante, il concerne notamment:

- L'ouvrage de retenue, par exemple nettoyage des drains et des galeries, entretien des talus de digue, réparation de dégâts divers, etc.
- La récupération des corps flottants
- Les installations, par exemple équipement hydromécanique, équipement électrique, installation alarme-eau
- Le dispositif d'auscultation (le support des instruments, le dégagement des lignes de visées géodésiques, etc.)
- Les accès.

La figure 01 donne, un aperçu général des composantes de la surveillance pour chaque type d'ouvrage d'accumulation, 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.

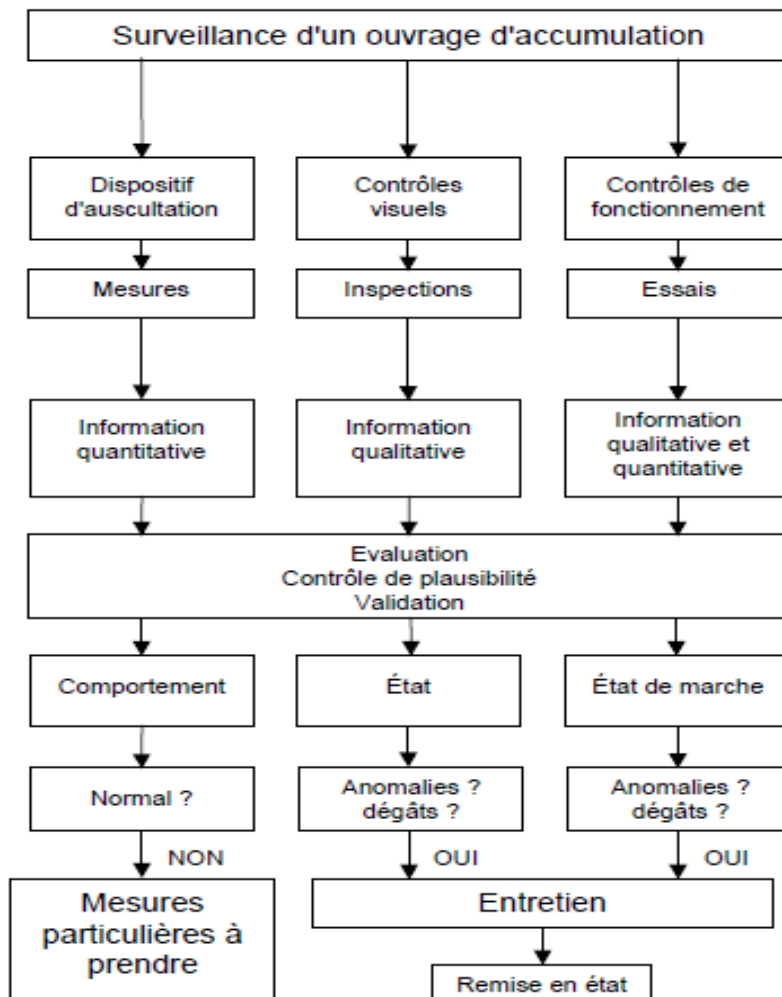


Figure III-3 : Concept global de l'organisation de la surveillance et de l'entretien

**III-5- Organisation de la surveillance :**

L'organisation de la surveillance se base sur 4 niveaux qui font appel au personnel de l'exploitant, à des ingénieurs et des experts, ainsi qu'à l'autorité de surveillance. Les activités essentielles de la surveillance concernent: l'exécution de mesure d'auscultation, les contrôles visuels, ainsi que des contrôles et essais de fonctionnement des installations. Pendant ou suite à des événements extraordinaires (comportement anormal, crue, séisme), des contrôles exceptionnels sont obligatoires.

**Niveau 1:** L'exploitant

Procède entre autres à l'inspection régulière, à l'exécution des mesures, aux essais et contrôles des installations, aux travaux d'entretien.

**Niveau 2:** Un professionnel expérimenté (ingénieur expérimenté)

Procède à une inspection annuelle, à l'analyse des résultats de mesures, aux contrôles de l'état et de l'entretien, à l'établissement d'un rapport annuel.

**Niveau 3:** Des experts confirmés (génie civil, géologue, ingénieur géologue)

Procèdent tous les 5 ans à une inspection, à une analyse globale du comportement du barrage, de ses fondations et de ses environs. Ils peuvent aussi être chargés de procéder à des examens particuliers de sécurité.

**Niveau 4:** L'autorité de surveillance

procède dans le cadre de ses tâches au contrôle de l'organisation de l'exploitant concernant la surveillance et l'entretien, à la vérification de l'état et de l'entretien des ouvrages ainsi que celle des essais des organes mobiles de fermeture (vannes), à l'examen du comportement de l'ouvrage, à l'analyse des documents techniques (rapports annuels, rapports d'expertise quinquennale et de sécurité).

Le tableau 1 donne la répartition des tâches principales des 3 premiers niveaux (exploitant, professionnel expérimenté et experts confirmés).

Quoi	Qui	Taches
a) mesures d'auscultation	1) exploitant	- exécution des mesures - analyse préliminaire des résultats de mesure
	2) professionnel expérimenté	- analyse des résultats de mesure rapport annuel relatif au comportement du barrage, de ses fondations et de ses environs
	3) experts confirmés	- analyse du comportement du barrage, de ses fondations et de ses environs - examen particulier de la sécurité
b) contrôles visuels	1) exploitant	- inspection régulière
	2) professionnel expérimenté	- inspection annuelle (avec rapport)
	3) experts confirmés	- inspection tous les 5 ans (avec rapport)
c) contrôles et essais de fonctionnement des installations (équipements)	1) exploitant	- contrôle des organes de décharge avec lâchure (au moins 1 fois par an) et de leur équipement de commande - contrôle de l'instrumentation contrôle des moyens de communications (liaisons phoniques) - contrôle des installations de l'alarme-eau et essai des sirènes

**Tableau III-1: Surveillance et entretien : répartition des tâches**

**III-6- Profil des intervenants :**

En confiant des tâches dans le cadre de la surveillance et de l'entretien des ouvrages d'accumulation, l'exploitant doit veiller à assurer la continuité des tâches qu'il confie à son personnel et des mandats effectués par des spécialistes externes. Il est primordial d'éviter de changer chaque année d'employés ou de spécialistes. En outre, il est recommandé de disposer de suppléants qui seront en mesure d'assurer les missions en cas d'absence du titulaire. Il est par ailleurs souhaitable que les professionnels expérimentés et les experts confirmés disposent du soutien logistique d'un bureau d'études.

### III-6-1- Premier niveau de surveillance

Il est assuré par le personnel de l'exploitant. Le rôle de ce celui-ci est primordial, car il est le premier qui soit en mesure, par sa présence au barrage, de détecter une anomalie. De formation technique appropriée, le gardien de barrage doit pouvoir travailler de façon indépendante et précise. Il appartient à l'exploitant de former son personnel afin qu'il soit notamment en mesure :

- de mettre en place les instruments de mesures, de procéder aux lectures
- d'effectuer une première appréciation des résultats de mesure
- d'effectuer des observations visuelles
- de procéder aux essais de fonctionnement des installations de mesure et d'exploitation
- de procéder à l'entretien courant de ces installations
- d'effectuer des travaux courants de réfection, de réparation ou de remise en état
- d'avertir ses supérieurs en cas de constat particulier
- de faire preuve d'initiative et être conscient de ses responsabilités

### III-6-2- Deuxième niveau de surveillance :

Le second niveau est assuré par un professionnel expérimenté. Il peut faire partie du personnel de l'exploitant.

Le rôle du professionnel expérimenté est important car il est chargé de l'analyse continue des résultats de mesure et doit tirer la "sonnette d'alarme" en cas de nécessité. Il est aussi appelé à effectuer une visite annuelle et à établir un rapport annuel relatif au comportement et à l'état de l'ouvrage d'accumulation.

Il doit remplir la plupart des critères suivants:

- Ingénieur spécialisé en génie civil
- Expérience dans les domaines de la construction des ouvrages hydrauliques, des calculs géotechniques, hydrauliques, de structures, de mécanique des roches, ainsi que dans le domaine de l'hydrologie
- De 5 à 10 ans de pratique dans les domaines précités
- Avoir collaboré à l'étude ou à l'exécution d'ouvrages hydrauliques (ouvrages d'accumulation)
- Avoir collaboré avec un autre professionnel expérimenté dans le cadre du 2ème niveau

Les tâches du professionnel expérimenté sont les suivantes :

- Interprétation de manière suivie des mesures d'auscultation,
- Rédaction d'un rapport annuel avec les résultats des mesures,
- Inspection annuelle de l'ouvrage (contrôle visuel) et de ses abords,
- Organisation et suivi des essais de fonctionnement des vannes de vidange.

Le professionnel expérimenté est le répondant pour la sécurité de l'ouvrage d'accumulation et est ainsi l'interlocuteur privilégié en ligne directe de l'autorité de surveillance.

### **III-6-3- Troisième niveau de surveillance :**

Ce niveau est assuré par des experts confirmés (ingénieur civil, ingénieur géologue et géologue qualifiés). Les experts sont appelés à fournir un rapport d'expertise tous les 5 ans concernant le comportement général et l'état de l'ouvrage d'accumulation. Les rapports annuels du professionnel expérimenté sont mis à la disposition des experts pour leur permettre de suivre l'évolution du comportement et de l'état de l'ouvrage d'accumulation.

Pour le choix des experts confirmés, les critères suivants sont pris en compte:

- Auteur du projet ou avoir participé à la conception ou à l'exécution du projet
- Expérience dans le domaine de la conception et de la construction des barrages, ainsi que de leur surveillance
- Au moins 10 ans de pratique
- Avoir exercé la fonction de professionnel expérimenté (pour l'ingénieur civil)
- Indépendance vis-à-vis de l'exploitant

Les tâches des experts (ingénieur génie civil et géologue) sont listées ci-après :

- Revue détaillée de la sécurité sur la période,
- Rapport quinquennal de sécurité (état et comportement),
- Recommandations,
- Programme de mesures pour les 5 années suivantes.

### **III-6-4- Quatrième niveau de surveillance :**

Les tâches de l'autorité de surveillance sont le contrôle de l'organisation de l'exploitant, l'analyse des documents techniques, l'examen du comportement de l'ouvrage et la vérification de l'état et de l'entretien.

Des directives d'application peuvent être édictées pour différentes thématiques :

- Sécurité structurale,
- Vérification de la sécurité en cas de crue,
- Vérification des ouvrages aux séismes,
- Surveillance et l'entretien.

### III-7- La surveillance des grands barrages :

C'est au moment de la mise en eau d'un barrage que les risques de ruptures sont les plus importants. Cette phase, qui peut durer plusieurs années. Le barrage fait alors l'objet d'une surveillance continue et complète : il s'agit de déceler d'éventuelles fissures et déformations naissantes au niveau des fondations et sur les versants de la retenue. Cette surveillance maximale se fait selon une procédure particulière, qui est propre à chaque barrage et définie par son maître d'ouvrage.

Pendant l'exploitation normale, des examens visuels sont menés régulièrement et des mesures sont effectuées à fréquence variable selon les observations : la cadence des relevés augmente si des anomalies sont constatées.

Un barrage est un ouvrage vivant, un dispositif d'auscultation surveille en permanence ces réactions : les résultats des mesures sont comparés aux valeurs calculées par le modèle de comportement de l'ouvrage. Il est alors possible de déterminer si le barrage se comporte comme prévu ou bien si les déformations constatées sont irréversibles et susceptibles de fragiliser la structure.

Par ailleurs, l'exploitant effectue des essais sur les organes d'évacuation des eaux pour s'assurer de leur bon fonctionnement.

Toutes ces mesures sont mises en œuvre par l'exploitant, qui rédige chaque année un rapport de synthèse des observations et résultats obtenus et l'envoie au service de contrôle. Celui-ci effectue une fois par an une visite du site, afin de vérifier que les mesures de surveillance sont appliquées comme il se doit et de contrôler à son tour le bon fonctionnement général de l'ouvrage.

En complément, une inspection approfondie de l'ouvrage a lieu au maximum tous les dix ans. La partie habituellement immergée est alors contrôlée soit par plongée, soit à l'occasion d'une vidange de la retenue et soit par l'utilisation d'un robot subaquatique.



**Figure III-4 : Inspection des ouvrages lors de sa vidange**



**Figure III-5 : Inspection des parties immergées de la retenue par un robot subaquatique**

**III-7-1- Les avantages d'une inspection subaquatique :**

- Souplesse et rapidité de l'intervention : une vidange se serait déroulée sur plusieurs semaines et aurait rendu l'ouvrage indisponible pour ses fonctions de base (production hydroélectrique et réserve d'eau). Sans vidange, le barrage ne sera indisponible, en journée ouvrable, que quelques jours lorsque le robot se trouvera près de la zone de prise d'eau.
- Sécurité de l'intervention : la surface émergée en inspection directe est minimale. Cela limite les difficultés liées à ce type de visite (problèmes météorologiques, logistique de travaux en hauteur).
- Pas de contrainte pour les autres usages de l'eau puisque la retenue d'eau est maintenue à son niveau habituel.
- Pas d'impact sur l'environnement, sur la qualité de l'eau, ni sur la vie piscicole, puisque la retenue n'est pas vidée.
- Un coût inférieur à celui d'une vidange.
- Un résultat équivalent à celui d'une vidange grâce à la modernité et à la performance de l'outil d'inspection : le robot subaquatique.

**III-8- Surveillance en période de crue :**

Les crues sont des phénomènes naturels causés par la pluie, la fonte des neiges ou la concomitance des deux. Lors d'épisodes de crues, le débit normal d'un cours d'eau peut être décuplé en quelques heures ou en quelques jours sur les principaux fleuves.

La maîtrise d'un événement de crue suppose l'élaboration préalable de règlements et d'une stratégie applicable en cas d'urgence.

- L'évaluation de la sécurité en cas de crue repose sur une stratégie d'ouverture des organes de décharge précise. En cas d'agissement différent, la sécurité risque d'être menacée. D'où la nécessité de définir des instructions contraignantes pour l'utilisation des organes de décharge. Réunies dans un «règlement de manœuvre des vannes», elles doivent être univoques et simples à appliquer. Ce règlement indique la procédure à suivre en cas d'exploitation normale et en cas de panne.
- La stratégie d'urgence en cas de crue est nécessaire pour garantir la meilleure gestion possible du risque résiduel. La présence de personnel sur place est nécessaire suivant le niveau de la retenue et les prévisions hydrologiques. La surveillance comprend le suivi de

l'évolution du niveau du plan d'eau (des repères et/ou des échelles limnimétriques avec marques visibles seront installés à cet effet pour pallier une défaillance du système de mesure automatique). Elle permet d'assurer la manœuvre des organes mobiles (vannes de surface ou de fond) en cas d'interruption de l'alimentation électrique ou de la commande à distance, de détecter des pertes d'eau inattendues et l'apparition de dégâts à l'ouvrage (apparition de sources, phénomènes de renard pour une digue).

Par ailleurs, l'équipe de surveillance assure sur place la liaison entre le barrage et un service de permanence. En cas de danger pour la population habitant en aval, elle doit être en mesure de déclencher une alarme. Pour ce faire, elle doit prévoir que les liaisons téléphoniques sont souvent coupées en cas d'intempéries et/ou de crues importantes, d'où l'importance de disposer d'un second moyen de communication indépendant.

### **III-9- Surveillance sismique :**

Sur certains barrages, lors de la construction, des sismographes sont installés. Ces appareils, généralement propriété de laboratoires de recherche, ne sont pas généralement maintenus sur le site pendant toute la phase d'exploitation.

A la suite d'un séisme, il convient :

- De réaliser une inspection visuelle des barrages
- De réaliser une auscultation immédiate et approfondie. Ceci est bien entendu beaucoup plus facile si le barrage est téléausculté.

Pour les barrages en terre, il paraît prudent de continuer à procéder à une auscultation très fréquente pendant une à deux semaines, certaines ruptures ou amorces de rupture se produisant avec un effet retard lié à la dissipation progressive des pressions interstitielles.

Il n'existe pour le moment pas de règle précisant, en fonction de la position de l'épicentre et de l'intensité du séisme, les barrages concernés et l'ampleur de leur surveillance particulière à réaliser.

### **III-10- L'auscultation des ouvrages d'accumulation :**

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 même de normes administratives dans plusieurs pays.

Le rôle principal de l'auscultation est d'assurer la pérennité et la sécurité des barrages. Elle doit permettre de déceler à temps, tout comportement pouvant entraîner la détérioration d'un ouvrage et éventuellement sa mise hors service, voire même sa rupture, de façon à pouvoir prendre les mesures correctives requises.

L'auscultation joue aussi un rôle fondamental durant la construction. Elle permet de vérifier les hypothèses de conception et peut influencer la vitesse d'élévation de certains

ouvrages. Son rôle est primordial lors du premier remplissage de la retenue, une phase critique de la vie d'un barrage.

**III-10-1- L'instrumentation :**

L'instrumentation permet de quantifier certains paramètres du comportement de l'ouvrage avec une grande précision et de suivre leur vitesse d'évolution.

Trois grands critères guident la sélection des instruments :

- la fiabilité des mesures obtenues (exactitude, précision, résolution, dérive)
- la longévité des instruments appuyée par de nombreuses références
- la facilité d'automatisation des lectures, indispensable à la collecte et l'interprétation efficace des résultats.

L'auscultation comporte plusieurs volets tels que l'inspection visuelle directe ou à distance de même que les mesures topographiques et l'instrumentation.

L'envergure des moyens d'auscultation mis en œuvre dépend du risque potentiel associé aux caractéristiques du barrage et du site. Ces facteurs incluent :

- La hauteur et le type de barrage
- L'importance des dommages pouvant être causés aux populations et ouvrages situés dans la zone d'inondation
- Le volume de la retenue et ses possibilités de vidange
- La sismicité du site
- Les zones de faiblesse des fondations

Le système d'auscultation employé dépend également du type de barrage, tel que montré dans les exemples suivants :

**III-10-1-1- Barrage voûte ou multi-voûtes en béton :****Objectifs :**

- Vérifier l'état de contrainte et en particulier l'absence de zones de tension
- Vérifier l'efficacité des joints d'étanchéité
- Suivre l'état de fissuration et déterminer leurs causes

**Paramètres mesurés :**

- |                      |                  |
|----------------------|------------------|
| - État de contrainte | - Température    |
| - Déformation        | - Fissuration    |
| - Sous-pression      | - Débit de fuite |

**III-10-1-2- Barrage en terre et enrochement :****Objectifs :**

- Vérifier la stabilité générale de l'ouvrage
- S'assurer que les infiltrations ne peuvent entraîner la rupture par érosion interne ou glissements locaux

**Paramètres mesurés :**

- Pression interstitielle dans le noyau ainsi que sa perméabilité
- Étanchéité du contact noyau-fondation ou de l'interface membrane-fondation
- Déformation totale et différentielle du barrage et risque de fissuration du noyau
- Efficacité des filtres.

**➤ Barrage poids en béton :****Objectifs :**

- Vérifier la stabilité générale de l'ouvrage
- Vérifier l'efficacité des joints d'étanchéité
- Vérifier l'état de fissuration

**Paramètres mesurés :**

- |               |                  |
|---------------|------------------|
| - Fissuration | - Température    |
| - Déformation | - Sous-pression  |
| - Déplacement | - Débit de fuite |

**III-11- Dispositif d'auscultation des ouvrages d'accumulation :**

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 d'un ouvrage d'accumulation est un des éléments-clé permettant d'assurer une surveillance adéquate d'un barrage et d'en garantir la sécurité. Ce système est incontournable et son étude se fait déjà au stade du projet.

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

Son but est de pouvoir suivre à long terme le comportement de l'ouvrage, de ses fondations et de ses environs en pouvant garantir une détection rapide de tout comportement anormal.

Le dispositif d'auscultation a 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.

### **III-12- L'inspection visuelle :**

Les inspections visuelles, dont on estime qu'elles ont permis la détection d'environ la moitié des anomalies ayant conduit à des interventions sur les barrages, 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...

En dehors des inspections réglementaires effectuées par l'administration de contrôle au rythme annuel (ou décennal, en ce qui concerne les parties normalement immergées des ouvrages), celles mises en place par EDF, pour répondre au mieux à leur objectif et tenir compte des contraintes d'exploitation, sont de plusieurs types.

- Visites bimensuelles, effectuées par un agent de maîtrise (en général à l'occasion de la tournée de mesures d'auscultation sur les barrages),
- Visites trimestrielles à annuelles effectuées avec le concours de l'encadrement local et d'un ingénieur spécialisé dans le génie civil.

La mise en œuvre d'une inspection visuelle formalisée n'est cependant pas immédiate en raison de la nature qualitative et donc parfois subjective de cette activité. Ainsi, l'expérience a conduit progressivement à bien distinguer :

- Une inspection visuelle à finalité de sécurité d'exploitation à cadence relativement élevée basée sur l'observation, par l'exploitant lui-même. Cette inspection cherche à déceler des phénomènes d'occurrence rare mais dont les conséquences sont potentiellement très importantes ;
- Une inspection visuelle à finalité de maintenance, à cadence beaucoup plus faible, réalisée par des spécialistes en génie civil et s'appuyant si nécessaire sur des moyens d'investigations plus poussés. Cette inspection cherche plutôt à optimiser les décisions de maintenance.

**III-13- Caractéristiques des instruments de mesure :**

Le choix des instruments de mesure dépend des paramètres à observer, du mode de construction de l'ouvrage et des possibilités d'installation. La priorité doit 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
- Accessibles
- Remplaçables facilement (pour assurer la continuité des mesures)

**III-14- La programmation des activités de surveillance :**

La programmation des activités de surveillance dépend de la classification qui prédéfinit les activités de surveillance, leur nature, leur ampleur et leur fréquence pour chaque classe d'ouvrages. Cette programmation peut être également ajustée à l'état du barrage, tel qu'évalué par le diagnostic.

**III-14-1- L'inspection des ouvrages :**

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.

Il importe que les personnes chargées de ces inspections connaissent parfaitement bien l'ouvrage et son comportement. Elles pourront ainsi déceler des changements ou dégradations sur quelques uns des points observés. La qualification du personnel effectuant ces inspections doit être établie et respectée. Cette qualification est faite de formation, d'expérience, de pratique, et de mises à niveau.

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 réalisées de manière périodique et complémentaire, voire simultanée. Parfois cependant, des inspections spéciales sont nécessaires.

L'inspection implique des examens plus ou moins détaillés de points qui caractérisent l'état d'un barrage au moyen d'observations visuelles méthodiques.

Les inspections sont des examens généraux ou très détaillés par observation visuelle d'un barrage en vue de détecter les phénomènes les plus évidents pouvant affecter sa sécurité, et en suivre l'évolution.

Il existe plusieurs types et niveaux d'inspections :

- Les tournées visuelles de routine ou suivi de niveau 1 (quasi continues, quotidiennes, hebdomadaires, mensuelles, annuelles),
- Les inspections périodiques de niveau 2 (tous les un ou deux ans ou sur demande spéciale, comprenant bilan des résultats d'auscultation, contrôle et essais des équipements, etc....),
- Les inspections plus formelles d'évaluation de la sécurité, au niveau 3 (tous les 5 à 10 ans ou sur demande spéciale; comprenant en plus des inspections détaillées et des investigations techniques autant qu'il est nécessaire),
- Les inspections particulières (sur une partie de l'ouvrage),
- Les inspections spéciales (pour des événements donnés) avec leurs modalités et leurs fréquences.

Les différents types d'inspections sont d'importances différentes et visent des buts différents. Les tournées de routine (très générales et réalisées plus rapidement, comme en conditions hivernales par exemple), puis les inspections régulières (à une périodicité définie) et finalement les inspections d'évaluation de la sécurité (en conjonction avec les réévaluations de la sécurité), forment le cœur d'une surveillance organisée.

Les inspections particulières ou spéciales sont déclenchées par des défauts identifiés sur l'ouvrage ou par des circonstances externes extraordinaires comme les crues ou les séismes.



**Figure III-6 : Visite décennale du barrage de Cap de Long – descente du robot subaquatique (juin 2006)**

**III-14-2- Auscultation des barrages :**

Dans le but de suivre et contrôler le comportement des barrages, on en réalise l'auscultation. Ceci consiste à mesurer certains paramètres physiques, afin d'en suivre l'évolution. Tout comme l'inspection, l'auscultation fournit des données pour étudier le comportement d'un barrage et évaluer sa sécurité.

L'auscultation est une action de contrôle basée sur des mesures physiques sur un barrage (ou sur des éléments d'un barrage) ou une zone de terrain.

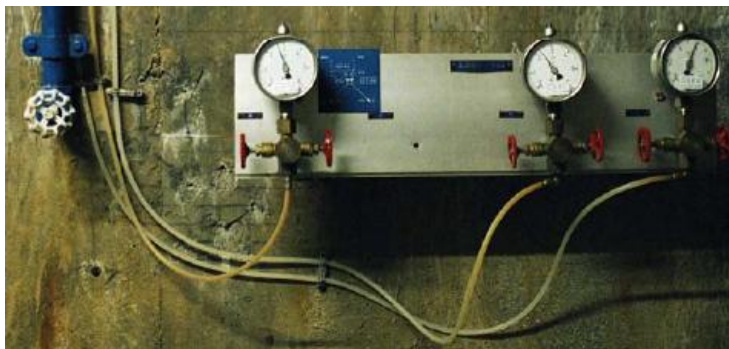
On distingue deux types d'auscultation qui comportent des moyens, des méthodes et sont réalisés parfois par des intervenants différents :

- L'auscultation générale, de type géotechnique et structurale, au moyen d'équipements fixes installés dans le barrage et d'appareils de mesure mobiles. Il importe que l'opérateur qui effectue les mesures puisse valider lui-même les résultats obtenus, en disposant au préalable de valeurs de référence attendues;
- L'auscultation topographique, avec topométrie, nivellements de précision, etc....

Les modalités et fréquences à suivre pour les auscultations sont spécifiées habituellement dans les règles, règlements et directives. Les principes qui sous-tendent cette activité doivent être également spécifiés.

**III-14-3- Contrôle de la fonctionnalité des organes d'évacuation :**

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 vital de "soupapes de sûreté" pour les différents ouvrages de retenue auxquels ils sont rattachés. L'historique des incidents de barrages montre que le sous dimensionnement et/ou le mauvais fonctionnement des organes d'évacuation sont responsables d'une part prépondérante de ces incidents.



**Figure III-7 : Cellules de pression**

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.

### III-14-3-1- Inspection des organes d'évacuation :

L'inspection des organes d'évacuation, alliée à des essais de fonctionnement et à une évaluation doit être menée de manière à déceler un dysfonctionnement éventuel et à conduire à leur garantie de fonctionnement lorsque requis.

La difficulté des inspections réside dans le fait qu'elles doivent s'assurer du fonctionnement (principalement mécanique et électrique) de composantes qui n'opèrent pratiquement jamais ou qu'en de très rares occasions.



Figure III-8 : Mesures de débit

Il apparaît donc important, pour mener à bien les inspections des organes d'évacuation, d'établir au préalable une liste exhaustive des éléments à inspecter, à mesurer, à apprécier, à noter et à documenter.

Ces listes (ou procédures) d'inspection devront être adaptées :

- ✓ au type d'inspection à mener (ampleur, fréquence et contenu variable) ;
- ✓ au type d'organe d'évacuation visé par l'inspection ;
- ✓ au service attendu par l'organe d'évacuation.

Les inspections pour les organes d'évacuation sont de divers types :

- **les inspections de routine** : elles ne visent que des éléments particuliers d'une installation, ou un but précis - vérification des éléments chauffants par exemple pour les ouvrages en zone froide ;

- **les inspections limitées** : examinent des éléments susceptibles d'usure, de désajustement ou de dégradation. Ces inspections sont habituellement combinées à des actions de maintenance comme des travaux d'entretien mineur, de lubrification ou d'ajustement. Il s'agit de l'inspection des éléments mobiles de surface ou de fond ;
- **les inspections formelles** : qui sont des examens approfondis des divers éléments, alliés habituellement à des essais de fonctionnement. L'ensemble de ces mesures et de ces observations permet de vérifier la conformité à des données pré établies et de juger de l'état et de la fonctionnalité des organes d'évacuation.



**Figure III-9 : Mesures de débit**

Les différents types d'inspections ont des portées différentes, des fréquences différentes aussi et sont menées par du personnel aux qualifications adaptées au type d'inspection à réaliser.

Il est important d'effectuer des inspections visuelles à intervalles judicieusement rapprochés, sous peine de passer à côté de certaines anomalies. Des moyens d'accès spéciaux, des opérations de mise à sec ou le recours à des vidéos subaquatiques peuvent être requis.

#### **III-14-3-2- Essais de fonctionnement :**

Les essais de fonctionnement visent à valider la sécurité fonctionnelle des organes d'évacuation. Ils s'adressent principalement aux parties mobiles de ces ouvrages ainsi qu'aux éléments annexes qui en garantissent le fonctionnement.

Les essais de fonctionnement, tout comme les inspections, sont de nature, d'ampleur et de fréquences différentes. Ils vont des essais limités (fonctionnement partiel de certains éléments) aux essais complets. Certains essais sont réalisés pleine charge hydraulique ou bien après la pose de batardeaux d'étanchéité en amont. D'autres types d'essais sont pratiqués avec

une ouverture partielle puis re-fermeture; ce qui permet de tester un domaine de fonctionnement habituellement le plus difficile.

Les essais de fonctionnement doivent donc être effectués :

- ✓ en différents types d'amplieurs différentes, et être bien déterminés à l'avance ;
- ✓ à des temps prédéterminés (fréquence établie à respecter) ;
- ✓ en spécifiant les données, mesures, limites ou appréciations qui devront être documentées, et comparées aux valeurs prévues ;
- ✓ avec des procédures précises et préétablies, adaptées au type d'organe d'évacuation à tester.

#### **III-14-4- Suivi du comportement :**

On doit réaliser le suivi des barrages afin d'en évaluer l'état et le comportement, selon des modalités définies.

Le suivi du comportement est une activité d'analyse périodique des résultats d'inspections, des mesures d'auscultation, des investigations particulières et du journal des travaux de maintenance effectués.

Le suivi du comportement est fait par un professionnel, en général un ingénieur qualifié, afin d'apprécier le comportement réel du barrage par rapport à son comportement attendu (suite à sa conception et sa construction).

Il est important d'examiner les mesures inhabituelles et d'en trouver les raisons. Il faut aussi porter une attention spéciale aux mesures qui évoluent progressivement dans le temps : cela peut indiquer le développement d'un problème potentiel.

#### **III-14-5- Diagnostic :**

Le diagnostic du comportement du barrage est le résultat de procédures formalisées, plus ou moins intégrées au programme de suivi du comportement du barrage.

Elles visent à évaluer les marges effectives de sécurité, et mettre à jour le degré requis de respect des consignes de sécurité (fonctionnalités des parties constituantes du barrage, cotes observées sur le niveau de la retenue...).

Le diagnostic doit être réalisé par un ingénieur convenablement qualifié et/ou compétent. Il doit comporter une évaluation sur l'état du barrage et des recommandations pour garantir le maintien de sa sécurité et son bon comportement dans le temps.

**III-14-6- Archivage des données :**

Il faut consigner, mettre à jour et conserver les données relatives aux barrages obtenues lors des activités de surveillance (inspections et auscultations), dans un système d'archivage reconnu, dédié et fiable. Les résultats de mesures, les relevés des activités d'inspection, d'auscultation, de suivi de comportement et de diagnostic doivent être consignés et conservés tout au long de la vie de l'ouvrage. Les procédures d'archivage doivent permettre un accès aisé pour analyses comparatives.

Pratiquement, l'archivage bien ordonné doit couvrir toute la vie du barrage, depuis les premières études sur le site et l'ensemble du projet, la construction, la première mise en eau, ainsi que tous les événements marquants, crues ou vidanges prononcées de la retenue, ainsi que tous travaux de réparation ou transformation.

**III-15- La géodésie :**

Les mesures géodésiques font partie intégrante du concept de sécurité. Etant donné que la géodésie détermine la position et l'altitude de points, elle permet de réaliser un système de mesure étendu pour le contrôle des déformations de l'ouvrage et du comportement de ses environs. Ainsi, la possibilité de mettre en place des dispositifs de mesure à deux ou trois dimensions. Ceci augmente considérablement l'efficacité de la surveillance compte tenu d'une redondance.

L'analyse et l'exploitation des mesures géodésiques intègrent le contrôle des points fixes, la précision et la fiabilité des résultats au moyen des calculs du risque d'erreur. La connaissance des déplacements absolus est nécessaire pour comprendre l'évolution à long terme d'un ouvrage d'accumulation.

Dans le cadre de la conception d'un réseau géodésique, les ingénieurs génie civil et géomètres doivent se collaborer étroitement afin de définir la relation adéquate entre les instruments de mesure installés dans l'ouvrage et les points de contrôle géodésiques, ceci contribuant à la redondance et par conséquent à la fiabilité du système de surveillance. Pour un choix des points fixes, la collaboration du géologue est nécessaire. Ceux-ci sont localisés à proximité du barrage, mais à l'extérieur de sa zone d'influence. Ils seront situés à l'amont et à l'aval du barrage pour limiter la propagation des erreurs.

**III-16- Des dispositifs de contrôle intégrés à l'ouvrage :**

Les barrages subissent en permanence des mouvements réversibles dus aux écarts de température ou à la variation de la pression de l'eau lors des variations de niveau de la retenue. De nombreux dispositifs de mesure dits « d'auscultation » (pendules, piézomètres, dispositifs de mesures de fuites et de déplacements) incorporés dans les ouvrages à la construction, permettent de suivre l'évolution des déformations subies et de détecter d'éventuels mouvements irréversibles. Ces données permettent d'obtenir un suivi très précis de la tenue

des ouvrages dans le temps. Au cours de la vie de l'ouvrage, l'ensemble du dispositif de contrôle est, si nécessaire, complété et adapté en fonction des besoins, de façon à permettre à tout moment de disposer des informations nécessaires à la surveillance.

Par ailleurs, des mesures hydrauliques concernant les sous-pressions et les fuites sont destinées à vérifier l'efficacité du drainage et des dispositifs d'étanchéité.

### **III-17- Des visites de contrôle internes et externes régulières :**

Les mesures d'auscultation sont soit réalisées manuellement par l'exploitant des barrages lors de tournées d'inspection, soit lorsque les conditions le requièrent (éloignement, nombre d'appareils important) mesurées et enregistrées automatiquement à distance par télémesure.

Tous les deux ans, EDF-DTG effectue des rapports d'analyses des mesures réalisées sur les barrages à la demande du maître d'ouvrage. Les visites des parties habituellement immergées sont réalisées soit avec vidange de la retenue, soit avec utilisation de moyens subaquatiques permettant d'éviter la vidange et donc d'en limiter les impacts environnementaux sur la rivière à l'aval du barrage.

Grâce aux évolutions technologiques, le matériel subaquatique utilisé actuellement permet d'obtenir une vue très détaillée des parties immergées. Les inspections décennales permettent à EDF et aux pouvoirs publics d'avoir une vision précise de la bonne santé des ouvrages et de valider les conditions de sûreté pour la décennie suivante.

### **III-18- Rapports de surveillance et d'auscultation :**

Le rapport d'auscultation utilise les mesures effectuées sur l'ouvrage ; cela permet de déceler les pathologies qui peuvent apparaître dans la structure de ce dernier. Le but est de mettre en évidence les anomalies et les évolutions sur le long terme. Si les données nécessaires à l'analyse de l'ampleur d'un phénomène semblent insuffisantes, le rapport propose les améliorations du dispositif d'auscultation souhaitables. Une fois les dérives de l'ouvrage clairement identifiées, le rapport propose des mesures à mettre en œuvre pour améliorer la sécurité. Cela peut se traduire par une meilleure surveillance du phénomène, des travaux sur l'ouvrage ou des contraintes pour l'exploitation du barrage.

Le rapport d'auscultation doit aussi s'intéresser au fonctionnement de l'ouvrage. Il analyse notamment chacun des paramètres en tentant de fournir une explication à leurs évolutions ; cela passe par une analyse de corrélation qui explique les liens entre chacun des paramètres traités.

**III-19- Visites techniques approfondies:**

Les visites techniques approfondies servent au responsable de l'ouvrage à assurer son entretien. Elles permettent de vérifier le bon fonctionnement des organes de sécurité de l'ouvrage et le bon état du barrage ainsi que ses dépendances.

Les visites doivent être effectuées même pour les ouvrages de classe C au moins tous les deux ans. Pour la classe D, ce délai est étendu à cinq ans, et pour les barrages écrêteurs de crues, une visite est faite à chaque crue importante.

Des visites intermédiaires peuvent-être faites à la demande du responsable de l'ouvrage si un phénomène inquiétant a été repéré lors d'inspections de routine.

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,

Le rapport de visite comprend toutes les observations faites lors de la visite pour chaque partie de l'ouvrage, y compris les abords de la retenue. Il précise les essais réalisés, recommande les travaux préconisés et les suites à donner pour la surveillance, l'entretien ou l'auscultation.

**III-20- Revue de sûreté :**

Pour les barrages de classe A et digues de classe A et B, la revue de sûreté est obligatoire. Celle-ci est renouvelée tous les dix ans et cinq ans après la mise en service de l'ouvrage. Celle-ci remplace l'ancienne visite décennale.

Elle constitue un moyen, pour le propriétaire de l'ouvrage, de vérifier la validité de ses moyens de sûreté.

Cette revue de sûreté se base sur les éléments suivants :

- L'examen technique complet : visite complète de l'ouvrage, y compris des parties inaccessibles sans moyens spéciaux (parement amont).
- Les conclusions des visites techniques approfondies.
- Les conclusions des rapports de surveillance et d'auscultation.
- Le comportement de l'ouvrage lors d'épisodes extrêmes, notamment les crues, séismes et mouvements des versants.
- Le point des dégradations subies par l'ouvrage et des améliorations apportées depuis la précédente revue de sûreté.

- Les conclusions de l'étude de danger, en particulier celles relatives à la sûreté intrinsèque de l'ouvrage et à son dimensionnement.

Les modalités de surveillance et d'auscultation mises en place.

### **III-21- Révision spéciale :**

Le dossier de révision spéciale est un document établi à la demande du Préfet. Ce document est un diagnostic de sûreté de l'ouvrage sert à rendre compte de la sûreté de l'ouvrage.

En fonction de la gravité des désordres constatés, le dossier de révision spéciale peut contenir les points suivants :

- L'examen de l'ouvrage, des équipements et des aménagements dont il est doté ainsi que des accès à ces derniers.
- L'examen des dispositifs de protection en fonction des différentes formes d'agression auxquelles l'ouvrage peut être soumis.
- L'examen du comportement de l'ouvrage lors d'épisodes extrêmes : crues, séismes et mouvements des versants.
- Le point des dégradations subies par l'ouvrage et des améliorations apportées.
- L'examen de la sécurité intrinsèque de l'ouvrage et de son dimensionnement.
- L'examen des modalités de surveillance et d'auscultation mises en place.
- Les études ou examens similaires à ce diagnostic peuvent être utilisés dans la mesure où ils sont toujours valides.

### **III-22- Visites du service du contrôle :**

Les visites annuelles et décennales sont obligatoires pour tous les barrages intéressant la sécurité publique. Le service du contrôle peut prendre l'initiative de visite sur d'autres barrages lorsqu'il l'estime utile, à une périodicité qui peut être différente.

La visite du propriétaire et la visite éventuelle du service de contrôle seront si possible réalisées conjointement.

#### **III-22-1- Visites annuelles :**

Cette visite est effectuée à l'initiative du Service du Contrôle en présence du maître d'ouvrage et de l'exploitant et le service technique.

Cette visite comprend :

- Un examen visuel de l'ouvrage ;
- Le contrôle du bon fonctionnement et du bon entretien des ouvrages d'évacuation des crues et de vidange de fond, ainsi que des dispositifs d'auscultation ;
- Le contrôle de l'exécution des demandes formulées lors de la visite précédente.

Un procès-verbal sera établi par le Service du Contrôle qui décrira l'état de l'ouvrage et consignera les éventuelles actions à entreprendre.

### III-22-2- Visites décennales :

Pour les barrages intéressant la sécurité publique, le service du contrôle organise une visite dite « décennale », la première ayant lieu cinq ans après la mise en eau, les suivantes se succédant tous les dix ans. Cette visite a lieu en principe après abaissement complet de la retenue. Cet abaissement doit être préparé suffisamment à l'avance compte tenu des intérêts en jeu pour la maintenance de l'alimentation en eau et pour la qualité du milieu à l'aval.

Pour les barrages n'intéressant pas la sécurité publique, à l'initiative du service du contrôle, des visites particulières pourront être effectuées, par exemple à l'occasion d'une vidange complète de la retenue ou d'un abaissement exceptionnel.

Toutes les informations recueillies par la surveillance permettent une analyse et une synthèse rendant compte de l'état du barrage, ainsi que l'établissement, tout au long de son existence, d'un « diagnostic de santé » permanent.

Un certain nombre d'interventions et d'études approfondies du barrage sont donc à réaliser périodiquement :

➤ **En permanence :**

- Surveillance de la première mise en eau,
- Surveillance et maintenance en exploitation,
- Contrôles des mouvements, déformations internes et tassements éventuels,
- Mesures hydrauliques,
- Inspections visuelles périodiques des installations.

➤ **Chaque année :**

- Une visite d'inspection par le service du contrôle,
- Un rapport d'analyse des mesures d'auscultation réalisées de manière permanente.
- Un rapport d'exploitation et de surveillance,

➤ **Tous les deux ans :**

- Une visite technique approfondie des parties apparentes de l'ouvrage, des organes hydrauliques et du dispositif de contrôle commande,
- Des essais des vannes de vidange et des évacuateurs de crues.

➤ **Tous les dix ans :**

- Un examen technique complet du parement amont et des ouvrages immergés par des moyens subaquatiques ou par vidange de la retenue d'eau,

- Une revue de sûreté, par un organisme compétent, prenant en compte l'ensemble des données de surveillance accumulées pendant la vie de l'ouvrage, le rapport de l'examen technique complet et l'étude des dangers mise à jour. Cette revue de sûreté conclut sur le niveau de sécurité de l'ouvrage,
- Une visite d'inspection spécifique à la revue de sûreté par le service du contrôle, lequel peut décider d'engager une procédure de mise en révision spéciale si des travaux d'amélioration ou de confortement sont nécessaires.

### III-23- L'entretien des barrages:

L'entretien, qui est entièrement du ressort de l'exploitant, permet de conserver toutes les parties de l'ouvrage dans un bon état et d'assurer le fonctionnement en permanence des installations. Certains travaux servent aussi à assurer la sécurité du personnel et des visiteurs. L'importance des travaux à entreprendre dépend également de l'ampleur des dégâts constatés.

L'entretien concerne entre autres les éléments suivants pour lesquels quelques exemples de travaux d'entretien courant sont donnés:

#### III-23-1- Barrages en béton :

- Ragréage de bétons de surface
- Nettoyage des rigoles de récolte des eaux, de forages drainants, de drains
- Elimination de dépôts de calcaire
- Elimination de végétation (mousse, plantes, herbes) sur les parements, les joints et le Couronnement
- Traitement de fissures, de joints
- Traitement de venues d'eau

#### III-23-2- Barrages en remblai :

- Réfection des dégâts du système d'étanchéité du talus amont
- Nettoyage du système de drainage
- Elimination de la végétation (arbres, arbustes) sur les parements aval et amont
- Fauchage de l'herbe sur le talus aval (au moins 1 fois par an)

#### III-23-3- Galeries en rocher :

- Nettoyage des rigoles de récolte des eaux, de forages drainants, de drains
- Elimination de blocs instables (selon avis du géologue)

#### III-23-4- Ouvrages hydrauliques annexes : (vidange de fond, évacuateur de crue, canal de purge, etc.)

- Ragréage de surface de béton
- Nettoyage des rigoles de récolte des eaux, de forages drainants, de drains
- Elimination de dépôts de calcaire
- Elimination de végétation, de dépôts de rocher ou de matériaux meubles

- Traitement de fissures, de joints
- Evacuation des dépôts (débris rocheux, sédiments, glace, etc.) dans un canal, au fond d'un puits pouvant empêcher un écoulement correct de l'eau.

**III-23-5- Dispositif d'auscultation :**

- Calibrage des appareils
- Maintien de la propreté des installations fixes (élimination de dépôts, application ou renouvellement de la peinture)
- Vérification des fixations
- Elimination des défauts mécaniques
- Vérification des conditions de fonctionnement (par exemple, liberté de mouvements des fils de pendules, dégagement des forages piézométriques, complément huile, graisse, eau)
- Dégagement des lignes de visées géodésiques

**III-23-6- Equipements hydromécaniques et électriques :**

- Elimination des traces de rouille, de corrosion
- Assainissement des protections anticorrosion
- Vérification de la fonctionnalité et des dispositifs de sécurité
- Renouvellement des joints d'étanchéité
- Vérification des conditions de fonctionnement de l'équipement d'alimentation de secours
- Maintien de la liberté de mouvement dans les glissières et rails de guidage
- Vérification des systèmes de lubrification
- Vérification du contenu des réservoirs d'huile, de carburant et remplacement éventuel des produits liquides
- Vérification des témoins de charge, d'ouverture
- Approvisionnement en petits matériels et pièces de rechange

**III-23-7- Zone de retenue :**

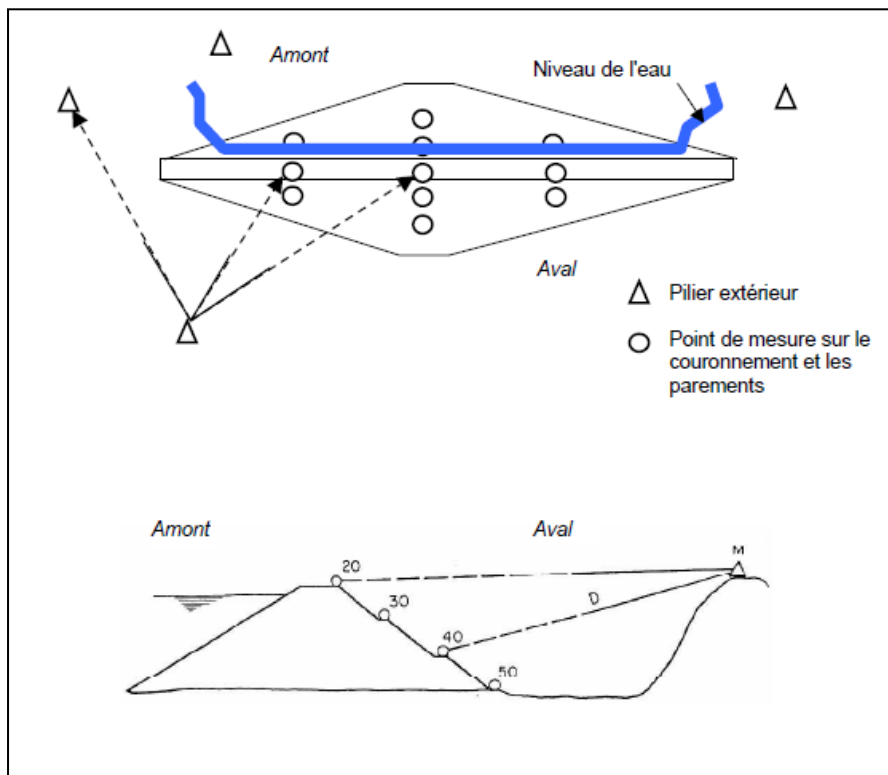
- Dégagement (si nécessaire) des sédiments accumulés devant l'entrée des organes de décharge
- Evacuation des bois et débris flottants
- Elimination de blocs instables (selon avis du géologue)

**III-23-8- Accès au barrage et dans le barrage :**

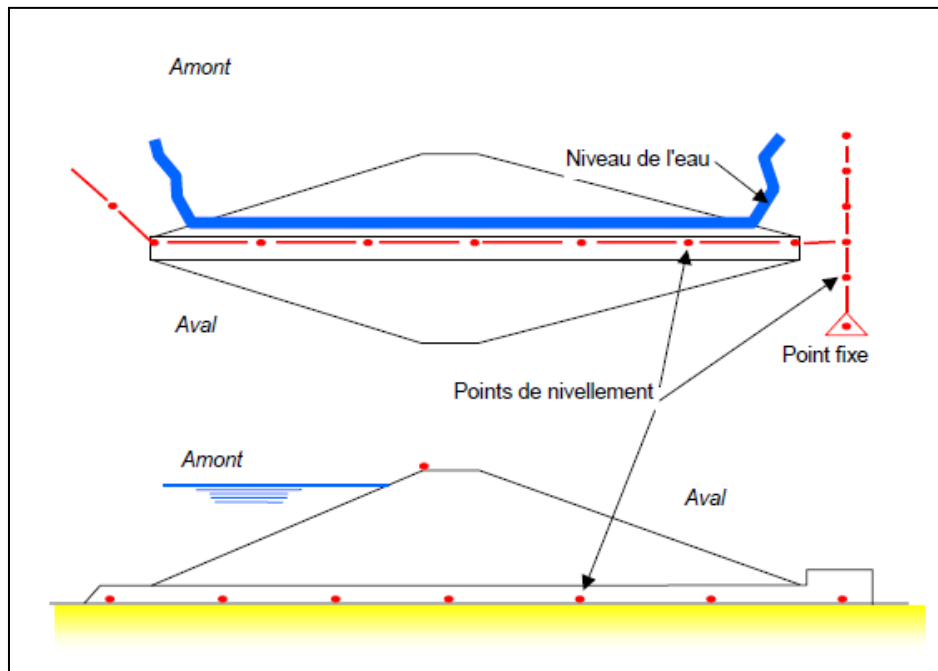
- Routes et chemins
- Passerelles
- Portes et barrières
- Ascenseurs
- Téléphériques
- Panneaux de signalisation (danger de crues, circulation et accès interdits, chutes de pierres, etc.)

**IV-1- Suivi du comportement des barrages en remblai :****IV-1-1- Déformations :**

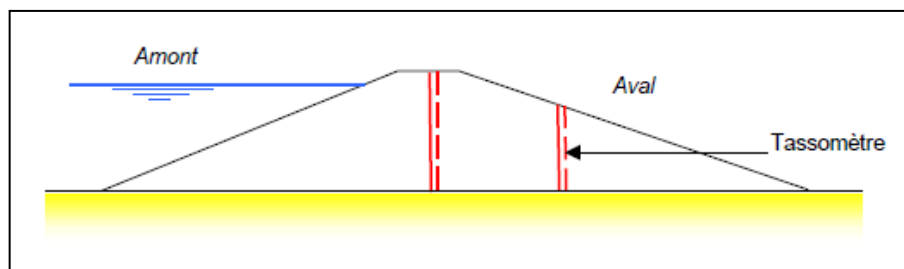
Pour le cas des barrages en remblai, le but est de pouvoir connaître l'évolution des déformations verticales (tassements) et horizontales de l'ouvrage en crête et, si possible, à divers niveaux et en particulier les tassements de la fondation. En règle générale, les déplacements de points sont déterminés par des mesures géodésiques telles que des mesures d'angle et de distance (mesure de vecteur), d'alignement, de polygonale, de nivellements ainsi que par des tassomètres, des repères de tassement hydraulique.



**Figure IV-1 : Mesure de déformations verticales et horizontales à partir de points de mesure situés sur le parement**



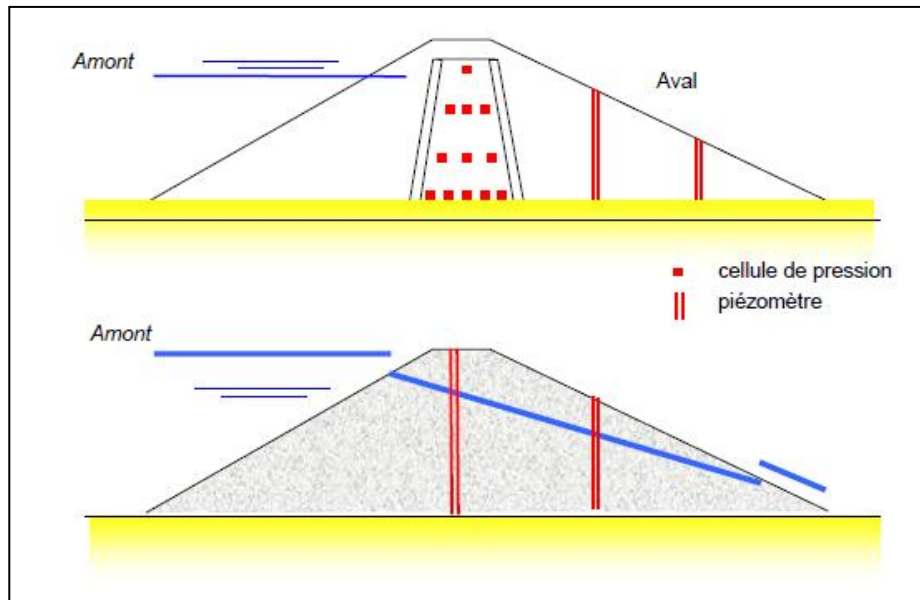
**Figure IV-2 : Mesure des déformations verticales (tassement) au niveau du couronnement et dans une galerie sous digue**



**Figure IV-3 : Mesure des tassements d'un barrage en remblai par tassomètres**

**IV-1-2- Pressions interstitielles et niveau piézométrique :**

Dans un barrage en remblai, il est important de contrôler l'évolution des pressions interstitielles (en particulier dans un noyau) et celle de la ligne piézométrique. La mesure s'effectue au moyen de cellules de pression pneumatiques, hydrauliques ou électriques et/ou de piézomètres (tube ouvert ou tube fermé muni d'un manomètre).



**Figure IV-4 : Mesure des pressions interstitielles et du niveau piézométrique de barrages en remblai**

**IV-1-3- Débits de fuite et drainage :**

Les débits de fuite et de drainage peuvent varier en fonction du niveau de la retenue et être influencés par les conditions atmosphériques ou la fonte des neiges. Les eaux de percolation peuvent être récoltées dans des drainages situés à l'aval d'un noyau ou à l'interface d'une membrane étanche et du corps du barrage en remblai.

On cherche à effectuer des mesures de débits partiels pour déterminer des zones de provenance. Ce procédé permet, en cas d'anomalie éventuelle, de localiser la zone critique et de faciliter la recherche des causes.

Les eaux de percolation et de drainage sont en général collectées et mesurées à leur exutoire par mesure volumétrique, par déversoir ou par venturi. Il est aussi utile d'analyser le chimisme et la turbidité de l'eau. La mesure de turbidité indique s'il existe une migration de fines.

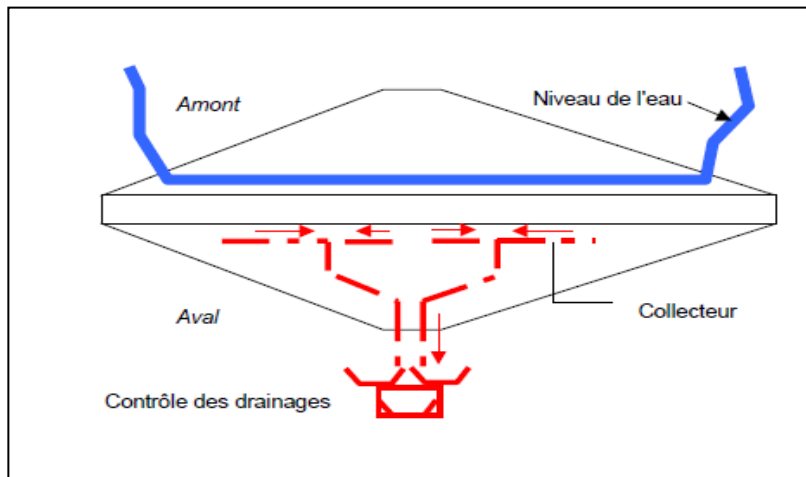


Figure IV-5 : Représentation schématique de la collecte des eaux de percolation et de la mesure des débits partiels et totaux

Type de mesure	Instruments Moyens de mesure
Déformations horizontales et déformations verticales (tassement)	Géodésie Réseau extérieur Nivellement Polygonale Mesures d'angle Mesures de vecteur (mesure d'angle et de distance) Alignement Inclinomètre Tassomètre Repère de tassement hydraulique
Ligne piézométrique	Piézomètre
Pressions interstitielles	Manomètre Cellule de pression
Débits de fuite et de drainage	Déversoir Mesure volumétrique Mesure du flux dans un tube Venturi
Température de l'eau	Thermomètre
Turbidité	Turbimètre
Chimisme des eaux de fuite	Analyse en laboratoire
Température dans le corps du remblai	Thermomètre électrique

Tableau VI-1 : Instruments et moyens de mesures pour les barrages en remblai

**IV-2- Suivi du comportement des barrages en béton :****IV-2-1- Déformation de la structure :**

Le but est 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 autres le déplacement au niveau de la fondation.

Les déformations radiales et tangentielles peuvent être déterminées par des mesures de pendules directs et/ou inversés le long de lignes verticales et par la mesure de polygones le long de lignes horizontales. Des visées optiques sur cibles extérieures permettent d'obtenir le même type de déplacement. La tendance actuelle est d'effectuer conjointement des mesures d'angle et de distance (mesure de vecteur). Pour les déformations dans le plan horizontal, il est aussi possible de recourir à un alignement par des visées ou par fil. Le nivellement permet de connaître les mouvements verticaux (tassement ou soulèvement) de l'ouvrage.

Les déformations locales de la partie supérieure du barrage, peuvent être déterminées par la pose d'extensomètres.

**IV-2-2- Température :**

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

Les thermomètres sont placés directement dans la masse lors du bétonnage. Ils sont implantés à plusieurs niveaux et répartis sur l'épaisseur du mur. Leur nombre dépend de l'épaisseur. Les thermomètres situés près de la surface sont fortement influencés par les conditions extérieures locales (températures de l'air et de l'eau).

Concernant l'accessibilité aux instruments, des thermomètres électriques peuvent être glissés dans des forages en les isolants pour éviter les effets de la température extérieure ou d'une galerie. En cas de défaillance, il est possible de les retirer et de les remplacer.

**IV-2-3- Déformations particulières :**

Les barrages en béton ne sont pas exempts de fissures. Si, parfois, le relevé visuel des fissures et leur report sur plan sont suffisants, il est indiqué de suivre le mouvement des lèvres de certaines fissures particulières.

En outre, des repères sont aussi mis en place pour la mesure des mouvements des joints de la structure. Les instruments utilisés sont par exemple des micromètres, des joints mètres, des déformètres, des indicateurs d'ouverture maximale de fissures.

**IV-2-4- Sous-pressions :**

Le relevé des sous-pressions est important, car elles ont une incidence marquée sur la stabilité des barrages-poids et des appuis des barrages-voûtes. Les sous-pressions, qui concernent en priorité le comportement de la fondation, sont mesurées au niveau du contact béton-rocher et à différentes profondeurs dans la fondation.

**IV-2-5- Débits de percolation et de drainage :**

Les débits d'infiltration peuvent varier en fonction du niveau de la retenue et aussi être influencés par les conditions atmosphériques ou la fonte des neiges.

Des mesures de débits partiels sont effectuées en déterminant les zones de provenance. Ce procédé permet, en cas d'anomalie, de localiser la zone critique et de faciliter la recherche des causes.

On mesure également les débits provenant de drainages ou de galeries de drainage. Une diminution du débit peut indiquer un colmatage des drains. La détermination du débit peut être volumétrique, s'effectuer au moyen d'un déversoir, d'un venturi ou par la mesure du flux dans un tube.

Type de mesure	Instruments Moyens de mesure
Déformations de la structure	Pendule direct Pendule inversé Alignement par fil Mesure d'inclinaison Extensomètre Géodésie Réseau extérieur Nivellement Polygonale Mesures d'angle Mesures de vecteur (mesure d'angle et de distance) Alignement (Visées verticales)
Mouvements particuliers (fissures, joints)	Micromètre Déformètre Jointmètre Rissmaximètre
Températures dans le corps du barrage	Thermomètre Thermomètre électrique
Sous-pressions au contact Béton-fondation	Relevé de niveau par câble à témoin Manomètre Piézomètre Cellule de pression hydraulique ou électrique
Débits de percolation et de drainage	Déversoir Mesure volumétrique Venturi Mesure du flux dans un tube
Chimisme des eaux de fuite	Analyse en laboratoire

**Tableau IV-2 : Instruments et moyens de mesure pour les barrages en béton**

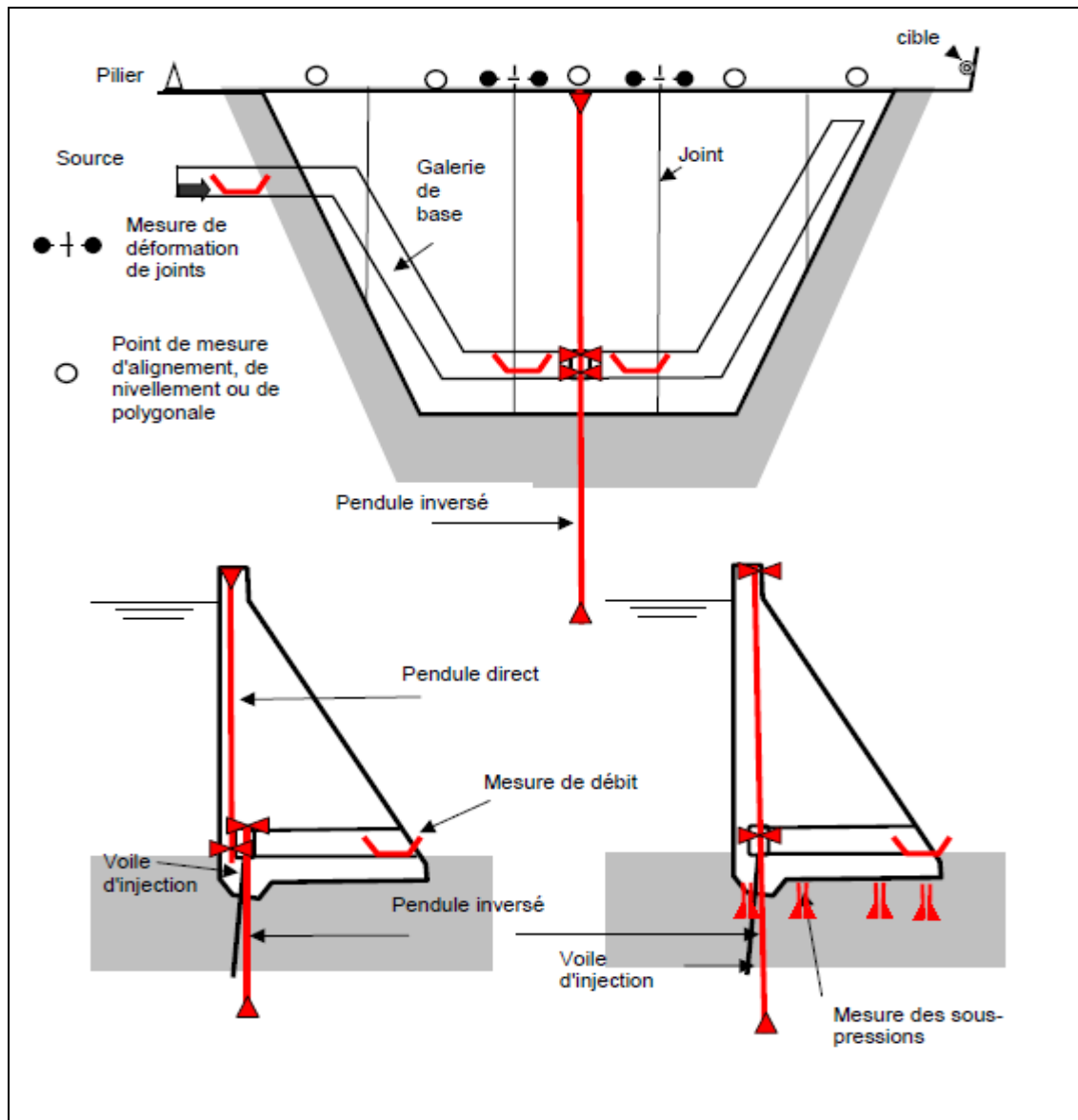


Figure IV-6 : Représentation schématique d'un dispositif d'auscultation minimal

**IV-3- Suivi du comportement des fondations :****IV-3-1- Fondation en rocher :****IV-3-1-1- Déformations :**

Les extensomètres et les micromètres de forage permettent la mesure de déformations selon des axes verticaux, inclinés ou horizontaux; la direction choisie de l'implantation des instruments dépend de la géologie et de la direction des forces transmises notamment pour les barrages voûtes. Pour saisir au mieux la déformation des fondations, il est recommandé de placer les extensomètres au moins selon 2 directions ou de former un tripode. Il faut noter que dans un seul forage il est possible de placer jusqu'à 6 barres de longueurs différentes.

La mesure des déformations horizontales dans 2 directions peut se faire au moyen de pendules inversés (éventuellement équipés d'un guide-fil autocentreur qui permet des mesures à différentes profondeurs). Le recours à un extensomètre est possible pour autant qu'il soit de longueur suffisante et implanté selon une direction adéquate. Les mouvements des appuis peuvent être suivis par des points implantés à proximité du barrage et intégrés dans le réseau de mesures géodésiques.

**IV-3-1-2- Sous-pressions et niveau piézométrique :**

Les sous-pressions, dont les valeurs varient normalement en fonction du niveau du plan d'eau, sont mesurées au niveau du contact béton-rocher et à différentes profondeurs en fondation. 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. Les mesures se font au droit de plusieurs sections.

La mesure des sous-pressions au niveau du contact béton-rocher et en fondation peut se faire par des forages ouverts (mesure d'un niveau d'eau) ou par des forages fermés équipés soit de manomètres, soit de cellules de pression pneumatiques, électriques ou hydrauliques réparties à différents niveaux dans un forage.

**IV-3-1-3- Débits de fuite et drainage :**

Cette mesure concerne l'eau percolant au travers du massif de fondation, de résurgences captées ou non. On mesure également les débits provenant de forages drainants ou de galeries de drainage. Ces mesures, conjointement avec celles des sous-pressions, 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 du système de drainage; il s'agit de vérifier la répercussion sur les sous-pressions.

La mesure des débits peut être volumétrique, s'effectuer au moyen d'un déversoir ou d'un venturi ou la mesure du flux dans un tube.

**IV-3-2- Fondation en terrain meuble :****IV-3-2-1- Déformation :**

Le nivellement, le tassomètre, les repères de tassement hydrauliques sont parmi les moyens disponibles pour mesurer les tassements d'une fondation en terrain meuble.

Les nivellements sont également effectués dans une galerie dans le sens transversal ou longitudinal d'un barrage en remblai.

**IV-3-2-2- Pressions interstitielles et niveau piézométrique :**

La mesure des pressions interstitielles et du niveau piézométrique en fondation peuvent se faire par des forages ouverts (mesure d'un niveau d'eau) ou par des forages fermés équipés soit de manomètres, soit de cellules de pression pneumatiques, électriques ou hydrauliques réparties à différents niveaux dans la fondation.

**IV-3-2-3- Débits de fuite et drainage :**

Cette mesure concerne l'eau percolant à travers le massif de fondation et de résurgences captées. Les débits provenant de galeries de drainage sont également mesurés.

La mesure des débits peut être volumétrique s'effectuer au moyen d'un déversoir ou d'un venturi ou mesure du flux dans un tube. La mesure de turbidité indique s'il existe une migration de fines.

TYPES DE MESURE	INSTRUMENTS ET MOYENS DE MESURE	
	FONDATION EN ROCHER	FONDATION EN TERRAIN MEUBLE
Déformations	Inclinomètre Extensomètre Micromètre de forage Géodésie (polygonale, nivellement)	Inclinomètre Extensomètre Micromètre de forage Mesures de tassement (Nivellement, tassomètre, repères de niveau hydrauliques)
Mouvements particuliers (fissures, joints)	Micromètre de forage	
Sous-pressions et pressions interstitielles	Manomètre Cellule de pression	
Nappe phréatique	Piézomètre	
Débits de percolation et de drainage	Déversoir Mesure volumétrique Mesure du flux dans un tube Venturi	
Température	Thermomètre	
Turbidité	Turbidimètre	
Chimisme des eaux de percolation	Analyse en laboratoire et mesures in situ	

**Tableau IV-3 : Instruments et moyens de mesure pour les fondations en rocher et en terrain meuble**

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.

#### IV-4- Principaux types d'appareils d'auscultation

##### IV-4-1- Les 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 télé mesurés, les mesures sont alors faites à l'aide de bobines électriques.

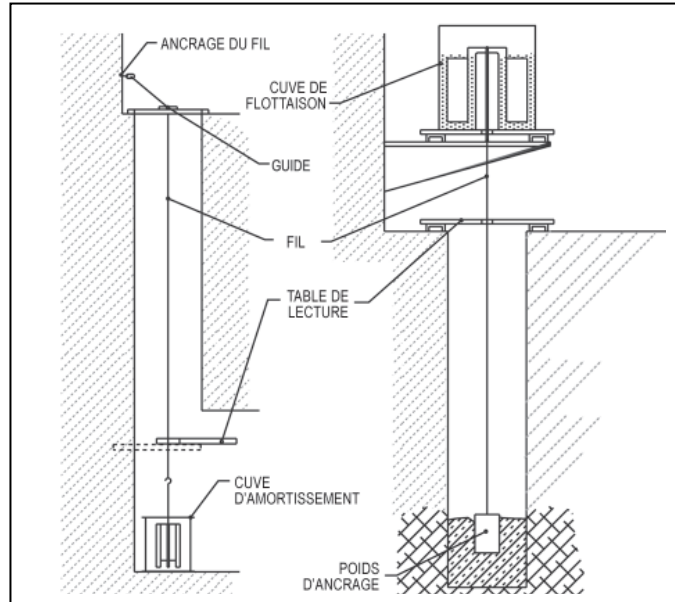


Figure IV-7 : Vinchon mesurant l'écartement d'une fissure

##### IV-3-2- Les 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. Le schéma ci dessous présente ces deux types d'instruments :



**Figure IV-8: Schéma de fonctionnement d'un pendule, à gauche un pendule direct, à droite un pendule inversé**



**Figure IV-9 : Table de lecture d'un pendule**

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.

#### IV-3-3- Les alidades :

Quand il est impossible de placer un pendule ou pour compléter les mesures faites à l'aide de ces derniers, on peut utiliser des moyens topographiques tels que les alidades. Celles-ci sont des viseurs articulés sur deux axes pour mesurer des angles. En connaissant la variation d'angle par rapport à un repère fixe et la distance par rapport à l'alidade, on peut en déduire le déplacement du repère visé.



**Figure IV-10 : Alidade**

Ce système permet de mesurer plusieurs points sur l'ouvrage et s'avère assez facile à mettre en place. Son principal inconvénient est sa précision qui dépend souvent de son utilisateur.



**Figure IV-11: Support et cocarde de visée pour alidade**

**IV-3-4- Les 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 inclinomètres 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.



**Figure IV-12 : Sonde inclinométrique avec galets de guidage**



**Figure IV-13 : Tube inclinométrique avec rainures de guidage**

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

**IV-3-5- Les 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.

Pour relever un piézomètre, il est possible d'utiliser une sonde à interface mais cette procédure manuelle n'est pas envisageable pour le suivi régulier d'un grand barrage.

Les piézomètres sont souvent des ouvrages isolés et fragiles, il arrive donc que ces derniers soient détériorés. Pour éviter ce genre d'incidents il faut essayer de les rendre visibles par toute sorte de véhicule.



**Figure IV-14: Piézomètre et sonde à interface**

**IV-3-6- Les cellules :**

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 un filtre 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.

- Pour les capteurs hydrauliques, 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 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.

- Pour les capteurs électriques, la pression exercée par la membrane est directement mesurée par un capteur piézoélectrique. Ce type de capteur impose certaines dispositions de mise en place : le filtre doit être humidifié avant mise en place à l'aide d'une eau à basse tension superficielle. Le compartiment filtrant doit aussi être rempli de la même eau.

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

#### IV-3-7- Les extensomètres :

Généralement utilisés dans les fondations ou dans le terrain naturel, les extensomètres permettent de mesurer les tassements et étirements entre deux points du milieu suivi. Le principe de fonctionnement est assez basique : une tige est ancrée en un point et un comparateur est placé entre la tige et un second point. Le schéma suivant présente le principe de fonctionnement de ce capteur

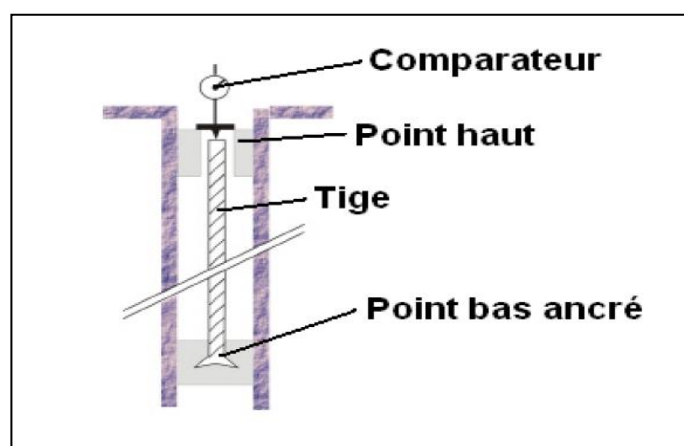


Figure IV-15 : Schéma de fonctionnement d'un extensomètre

Le fonctionnement présenté ci-dessus est le plus simple, d'autres extensomètres utilisent un câble tendu etc. Les types de comparateurs et les moyens d'ancrages peuvent varier d'un constructeur à l'autre et suivant les propriétés recherchées.

**IV-3-8- Les drains :**

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 déversante en amont d'un seuil calibré.

**V-1- Introduction :**

Les ruptures de grands barrages sont des événements d'une exceptionnelle rareté qu'il convient néanmoins de prendre en compte, les aspects sûreté et sécurité font en effet l'objet d'attentions particulières de la part des exploitants et des services de l'Etat, chargés du contrôle.

Il convient de se rappeler que le nombre moyen d'accidents majeurs, se rapportant aux 15 000 grands barrages existants dans le monde est d'une très faible fréquence (de l'ordre de 1 pour 10 000 / par an). Il faut aussi savoir que 50 % de ces rares accidents ont lieu lors de la mise en eau.

Il convient, enfin, de retenir qu'une rupture de barrage est généralement la phase ultime d'un comportement accidentel. Une telle rupture est donc généralement précédée de signes, d'indices, d'informations que l'exploitant doit impérativement porter à la connaissance du représentant de l'Etat dans le département, le préfet.

**V-2- Approche législative et réglementaire :**

Le législateur a estimé qu'en matière de grands barrages, il y avait lieu de planifier, dans le cadre de plans d'urgence, des mesures d'évacuations préventives des populations concernées, même si leur probabilité de mise en œuvre est très faible.

Le maître d'ouvrage d'un barrage est tenu d'établir et de remettre au préfet, préalablement à l'établissement du PPI une étude des risques, portant sur le risque sismique et le risque d'effondrement de terrain (étude incluant les limites et délais d'invasion du flot, en cas de rupture). L'étude est ensuite soumise à l'avis conforme du comité technique permanent des barrages CTP, comité interministériel.

**V-3- Le but général des plans de secours :**

Le plan de secours, dénommé plan particulier d'intervention (PPI) a pour objet d'organiser, en temps utiles, la mise à l'abri totale et ordonnée de la population, dans toute la mesure du possible, dans le cas où l'intégrité physique d'un barrage serait menacée. Il permet de définir les mesures de sauvegarde à appliquer en vue d'évacuer les populations avant que le danger ne devienne imminent.

L'organisation d'une diffusion de l'alerte, la plus rapide possible, est donc prise en compte dans ce plan ainsi que le cadre opérationnel définissant les principes généraux liés à la mise en sécurité des dites populations.

Un tel dispositif impose :

- une transmission rapide des informations vers la Préfecture, les maires et la population, en situation de crise.
- une implication de tous les acteurs, publics et privés, notamment de chaque maire concerné, lequel a la responsabilité de mettre en place et de tenir à jour permanente son Plan Communal de Sauvegarde (ou intercommunal) PCS.

#### **V-4- Le cadre d'action d'un PPI :**

La zone de sécurité immédiate, à l'aval direct de l'ouvrage, était délimitée par la distance parcourue par le flot, en un 1/4 d'heure.

La définition nouvelle aboutit à un PPI intégrant la définition, par le préfet, de 3 zones successives :

##### **V-4-1- Zone de proximité immédiate: la ZPI**

La première zone aval du barrage connaîtrait, suite à une rupture totale ou partielle de l'ouvrage, une submersion de nature à causer des dommages considérables.

Son étendue tient compte des temps d'arrivée du flot et d'une prise en compte particulière de l'aspect alerte. L'exploitant a en effet, l'obligation d'assurer la diffusion de l'alerte aux populations de cette zone, en situation d'urgence.

##### **V-4-2- Zone d'inondation spécifique: la ZIS**

Il s'agit de la zone située en aval de la zone de proximité immédiate. Les dégâts y seraient aussi très importants. Elle s'arrête en un point où l'élévation du niveau des eaux est de l'ordre de celui des plus fortes crues connues.

##### **V-4-3- Zone d'inondation, hors PPI : la ZI**

Il s'agit de la zone en aval de la zone d'inondation spécifique, couverte par l'analyse des risques, secteur où l'inondation est comparable à une inondation naturelle.

#### **V-5- Les différents niveaux d'alerte :**

Pour les barrages dotés d'un PPI, celui-ci prévoit plusieurs niveaux d'alerte en fonction de l'évolution de l'événement

**V-5-1- la vigilance renforcée :** Pendant lequel l'exploitant doit exercer une surveillance permanente de l'ouvrage et rester en liaison avec les autorités.

**V-5-2- Le niveau d'alerte n°1 :** est atteint si des préoccupations sérieuses subsistent (cote maximale atteinte, faits anormaux compromettants, etc...). L'exploitant alerte alors les autorités désignées par le plan et les tient informées de l'évolution de la situation, afin que le préfet soit en mesure d'organiser si nécessaire le déclenchement du plan

**V-5-3- Le niveau d’alerte n°2 :** Lorsque le danger devient imminent (cote de la retenue supérieure à la cote maximale, etc...), l’évacuation est immédiate. En plus de l’alerte aux autorités, l’exploitant prend lui-même les mesures de sauvegarde prévues aux abords de l’ouvrage, sous le contrôle de l’autorité de police. L’alerte aux populations s’effectue par sirènes pneumatiques du type corne de brume mises en place par l’exploitant. Plus à l’aval du barrage, il appartient aux autorités locales de définir et de mettre en œuvre les moyens d’alerte et les mesures à prendre pour assurer la sauvegarde des populations. Ce niveau est atteint lorsque la rupture semble inévitable.

Niveau d’alerte		Etat du barrage	Actions entreprises
Pré-alerte	Vigilance renforcée	Comportement anormal de l’ouvrage  Menace (ex : crue dangereuse pour la sûreté de l’ouvrage)	En liaison avec les autorités, l’exploitant surveille le barrage
	Préoccupations sérieuses	Faits anormaux susceptibles de compromettre la tenue de l’ouvrage à court terme	
Alerte	Etat de péril imminent	L’exploitant estime ne plus avoir le contrôle de l’ouvrage (faits anormaux susceptibles de compromettre la tenue de l’ouvrage à très court terme, cote de danger atteinte lors d’une crue etc.)	L’exploitant tient informées les autorités des phénomènes préoccupants  Le préfet déclenche le plan si nécessaire
	Etat de rupture constatée	Rupture partielle ou totale du barrage	Le préfet déclenche le plan si ça n’a pas encore été fait Alerte des populations et mesures de sauvegarde sous la responsabilité : - de l’exploitant dans la ZPI  - des autorités locales dans les autres zones

**Tableau V-1 : Les différents niveaux d’alerte**

Enfin, pour marquer la fin de l'alerte, par exemple si les paramètres redeviennent normaux, un signal sonore continu de trente secondes est émis.

#### V-6- Le signal d'alerte lié aux ouvrages hydrauliques :

Il comporte un cycle d'une durée minimum de deux minutes diffusé par un réseau de sirènes type corne de brume, installées par le maître d'ouvrage.

Les essais des sirènes des ouvrages hydrauliques, effectués par l'exploitant, ont lieu une fois par trimestre. Le signal d'essai comporte un cycle de douze seconds composés de trois émissions sonores de deux secondes séparées par un intervalle de trois secondes.

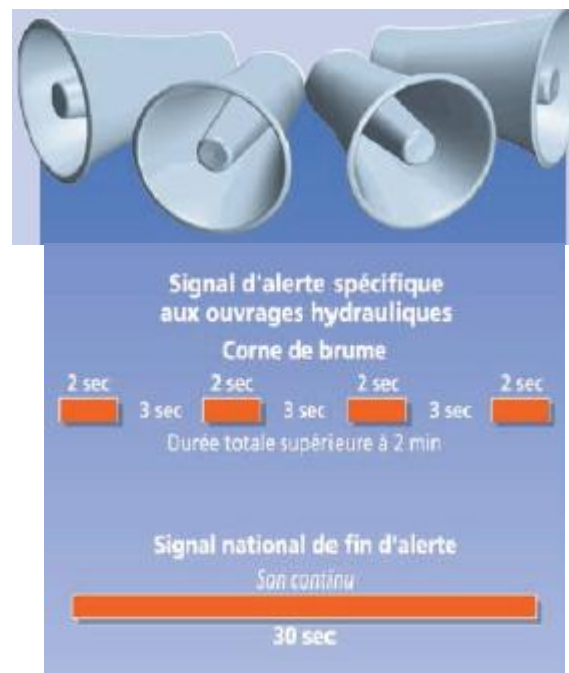


Figure V-1 : le signal d'alerte spécifique aux ouvrages hydrauliques

#### V-7- Les consignes spécifiques pour la population :

Un certain nombre de consignes générales à suivre « avant, pendant et après » une alerte ont été définies. Elles sont complétées par des consignes spécifiques à chaque risque (voir tableaux ci-contre).

En matière de risque rupture de barrage, il est nécessaire de connaître le système d'alerte spécifique pour la zone de proximité immédiate, ainsi que les points hauts assurant un refuge.

➤ **Avant :**

- Connaître le système spécifique d'alerte pour la zone de proximité immédiate.
- Connaître les points hauts sur lesquels se réfugier (collines, étages élevés des immeubles résistants, etc.), les moyens et itinéraires d'évacuation.
- apprendre à reconnaître le signal d'alerte

➤ **Pendant :**

- Évacuer et gagner le plus rapidement possible les points hauts les plus proches cités dans le PPI ou, à défaut, les étages supérieurs d'un immeuble élevé et solide.
- Ne pas prendre l'ascenseur.
- Ne pas revenir sur ses pas.
- écouter la radio et suivre les instructions
- ne pas chercher à rejoindre ses proches (ils se sont eux aussi protégés)
- attendre les consignes des autorités ou le signal de fin d'alerte pour quitter son lieu de refuge

➤ **Après :**

- Aérer et désinfecter à l'eau de Javel.
- Ne rétablir l'électricité que sur une installation sèche.
- Chauffer dès que possible.

L'alerte est en fonction de la distance à laquelle la population se trouve du barrage, les moyens d'alerte sont différents :

❖ **dans la zone de proximité immédiate :** il existe

- ✓ un dispositif d'alerte exploitant qui peut être un automate d'appel qui diffuse un message d'alerte
- ✓ le dispositif d'alerte par sirènes EDF (dans la zone du quart d'heure)

❖ **dans la zone située après la zone de proximité immédiate, il existe :**

- ✓ les dispositifs d'alerte des pouvoirs publics qui peuvent être, par exemple :
  - les haut-parleurs sur véhicules
  - des systèmes d'appels téléphoniques en masse mis en place par les Collectivités locales.
- ✓ le réseau national d'alerte (sirène RNA) diffusant le signal national d'alerte

**VI-1- Présentation :**

Le barrage de Taksebt est un barrage en remblai de type remblai en alluvions compactées avec noyau en argile, dont la réalisation a débuté en 1993 a été mis en eau en janvier 2002, soit environ 8 ans après le début des travaux. Sa construction a créé un réservoir de 164 millions m<sup>3</sup> dont l'objectif était d'assurer la couverture en eau potable et en eau industrielle de la région de Tizi Ouzou et le transfert vers Alger.



**Figure VI-1: Construction du barrage de Taksebt**

**VI-2- L'auscultation des ouvrages :**

L'auscultation est réalisée par des instruments de mesure, une surveillance visuelle du barrage et de ses abords doit être réalisée régulièrement par des personnes connaissant bien l'ouvrage, en vue de déceler des anomalies qui ne seraient détectées par aucun dispositif de mesure : fissures et fuites, dégradation locale du matériau, extension de taches d'humidité...

Les dispositifs d'auscultation ont pour but de contrôler, durant la construction et pendant la période d'exploitation du barrage et des ouvrages annexes, leur comportement.

**VI-3- Type de mesures :****VI-3-1- Mesures des déformations :**

Celles-ci comprennent :

- Des repères topographiques,
- Des tassomètres,
- Des inclinomètres,
- Des extensomètres.

**VI-3-1-1- Les repères topographiques :**

Les relevés topographiques consistent en :

- Des mesures des déplacements dans les trois directions de repères topographiques installés sur la crête, le parement aval de la digue, les talus de l'évacuateur et les repères situés au voisinage de l'aménagement ;
- Des mesures de nivellement sur les repères placés dans la galerie de vidange ;
- Des mesures des placements des repères placés en divers endroits des structures en béton ;
- Des relevés des déformètres placés dans la galerie sous digue.



**Figure VI-2: Bornes et repères topographiques**



**Figure VI-3: Bornes topographiques**

Les tassements sont contrôlés à l'aide d'un dispositif topographique constitué de bornes placées en crête de remblai et sur les bermes, on a observé un tassement sur la crête du barrage juste au niveau de la revanche mais qui n'a pas d'effet sur la sécurité du barrage.



**Figure VI-4: Tassement de la revanche du barrage**

**VI-3-1-2- Les tassomètres :**

Les tassomètres 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.

Ce sont des tubes reliés à des anneaux en aimant, la distance entre deux anneaux est de 3 m. Le tassement est mesuré par rapport à l'affaissement de l'anneau.



**Figure VI-5: Tube tassométrique**

**VI-3-1-3- Les inclinomètres :**

Ce sont des appareils relevant les déformations horizontales ou l'inclinaison de la digue par rapport au sol initial (sa rotation).

**VI-3-2- Les barres vinchons :**

Les vinchons permettent de suivre les mouvements des parois de la galerie suivant les différentes dimensions X Y et Z, on mesure la variation d'écartement de la fissure à l'aide d'un pied à coulisse.



**Figure VI-5: Barre vinchon**

### **VI-3-3- Les cellules de pression :**

Ces cellules comprennent :

- Des cellules de mesures de pressions interstitielles ;
- Des cellules de mesures de pressions totales ;
- Des cellules piézométriques.

Les cellules de pressions interstitielles sont installées dans le noyau du corps de digue. Elles ont été doublées par l'installation de cellules de mesures de pressions totales.

La digue est décomposée en sept profils et chaque profil comporte plusieurs cellules de pression. Le dispositif de mesure est composé de trois stations de mesure 1,2 et3.



**Figure VI-6 : Station de mesure N° 1**



Figure VI-7: Station de mesure N° 2



Figure VI-8: Station de mesure N° 3

Chaque station de mesure comporte des boites répartiteurs des câbles des cellules.



Figure VI-9 : Boites répartiteurs des câbles des cellules

- Principe de mesure :



Figure VI-10: Appareil de mesure des cellules

- Les cellules de pressions interstitielles mesurent uniquement la pression de l'eau remplissant les pores du sol à proximité immédiate de l'appareil. Elles sont directement influencées par la surpression générée par le phénomène de consolidation des remblais.
- Les cellules de pressions totales intègrent la pression entre les grains (pression effective) et la pression des fluides remplissant les pores (pression interstitielles). Le bon fonctionnement de ces cellules est lié à l'adéquation des caractéristiques de l'appareil et du terrain.

#### VI-3-4- Piézomètres ouverts :

Les piézomètres sont installés dans les forages débouchant en crête de digue, dans le talus aval aux niveaux 157.00 (berme), 146.00(berme) et 125.00(berme) ainsi qu'à l'aval de la digue et sur le talus de l'évacuateur de crues.

Ces piézomètres mesurent les niveaux d'eau dans les schistes, dans les remblais et dans les alluvions en place en fonction de leur zone crépinée. Ils permettent une mesure directe des niveaux d'eau et, par conséquent fournissent un bon moyen de contrôle du fonctionnement des cellules de mesures de pressions.

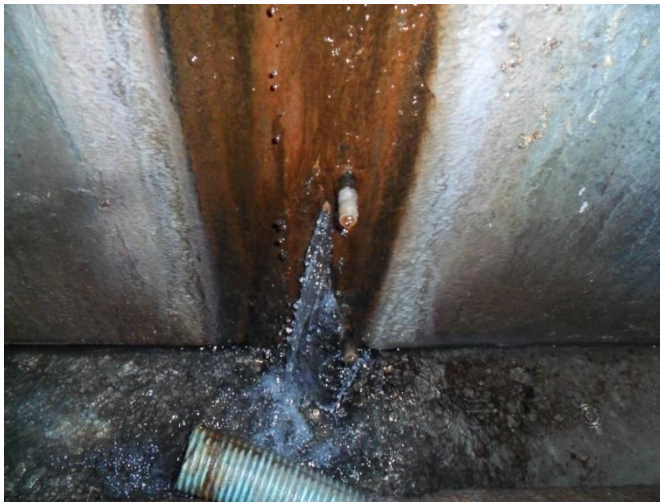


Figure VI-11: Mesure piézométrique

**VI-3-5- Les drains :**

Les débits sont observés :

- A chaque tube de drainage dans la galerie d'injection et dans les galeries latérales de drainage,
- Dans les puisards de la galerie sous digue,
- Sur les caniveaux d'évacuation des galeries de drainage,
- En rive droite, à la jonction de la GDRD avec la galerie d'accès,
- En rive gauche, au débouché de la galerie RG.



**Figure VI-12 : Fuite**



**Figure VI-13 : Drain**

Le débit de fuite et de drain est mesuré à l'aide d'un seau gradué et un chronomètre.



**Figure VI-14 : Mesure du débit**

Au de base de la galerie de drainage (niveau 88,50) est prévu un puisard (d'une contenance d'une vingtaine de m<sup>3</sup>) dans le quel sont installés les équipements de relevage des eaux de drainage. Ces équipements comprennent essentiellement :

- Trois groupes motopompes immergés d'un débit unitaire de 15 à 20 l/s sous une hauteur brute de refoulement de 40cm ;
- Trois tuyauteries (une par pompe) qui remontent les eaux de drainage de la côte 92.00 à la côte 110.00 où elles se déversent dans galerie d'accès rive droite. Chacune des tuyauteries est équipée d'un clapet anti-retour et d'une vanne d'isolement.

La commande des pompes peut se faire, soit en manuel soit en automatique. Le sélecteur de choix manuel/automatique est placé sur le tableau de contrôle.

Le mode manuel ne peut être utilisé que pour les entretiens et les essais. En dehors de ces causes, le mode de fonctionnement normal est automatique.



**Figure VI-15 : Vue d'un puisard**

#### **VI-3-6- Les manomètres :**

Ils sont destinés pour la mesure de pression manométrique ou la pression d'eau exercé sur les parois de la galerie.



**Figure VI-16 : Le manomètre**

## **Conclusion :**

La surveillance des barrages est une activité essentielle qui doit être prise en compte dès la conception du projet et faire ensuite l'objet d'une attention et d'une rigueur exemplaires. Cette surveillance fait partie intégrante de l'exploitation quotidienne des installations, et repose en conséquence sur des acteurs proches du terrain pour les inspections visuelles et la collecte des mesures. Elle fait également appel à des compétences spécialisées, dans des domaines variés : métrologie, topographie, télématique, géotechnique, analyse statistique, gestion de bases de données, ... Elle repose enfin sur le contrôle externe exercé par l'Administration. D'où l'importance à accorder aux aspects organisationnels, définissant les relations entre ces différents intervenants, ainsi que les rôles et la responsabilité de chacun d'eux.

Les outils et méthodes disponibles, dont l'utilité est évidente et que l'on doit encore chercher à améliorer, constituent un appui aux responsables de la surveillance des barrages, mais ne les dispensent pas d'un effort constant de rigueur, d'attention et de bon sens. Le facteur humain reste primordial pour cette surveillance qui repose sur le professionnalisme, la vigilance et la perspicacité des acteurs, à tous les niveaux.

## **Bibliographie :**

- 1- Founémé A. MILLOGO ( ingénieur en hydraulique), Ouvrages Hydrauliques, Aout 2009.
- 2- Edition de décembre 2010, DDRM de la Haute-Vienne, Le risque rupture de barrage en Haute-Vienne.
- 3- Dossiers d'information, Les ruptures de barrages, Le ministère de l'écologie et du développement durable, Direction de la prévention des pollutions et des risques, Sous direction de la prévention des risques majeurs, Décembre 2004.
- 4- Dossier Départemental des Risques Majeurs en Corse-du- Sud, Coriace prédilection.
- 5- Roland Vidal, Auscultation d'ouvrages hydraulique, Etude des normes pour la sécurité hydrauliques et création d'un programme interne de suivi, Projet de fin d'études, INSA Strasbourg, Juin 2010.
- 6- Projet GT PCS , Risque rupture de barrage, Version n°2012, Salaise sur Sanne le 18/03/2013.
- 7- Gérard DEGOUTTE, Petits barrages, Recommandation pour la conception, la réalisation et le suivi, Comité français des barrages, 1997.
- 8- Note d'application, APN-DSMI-FR-2006-03-1000, Instrumentation de sécurité et de surveillance des barrages et digues, Roctest Telemac Smartec.
- 9- Stéphane BONELLI, L'auscultation des barrages en terre : une nécessité, Ingénieries N° 41, Mars 2005.
- 10- Bulletin de liaison n°20, La maîtrise des risques associés aux barrages en Rhône-Alpes, Institut des risques majeurs, juin 2008.
- 11- Alain CARRERE, Doc. C5 555, Barrage, Technique de l'ingénieur, traité construction.

- 12- Christian KERT, Rapport sur l'amélioration de la sécurité des barrages et ouvrages hydrauliques, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2007/2008.
- 13- Patrick Le Delliou, Les barrages et le risque sismique, Extrait du Bulletin du Service Technique de l'Energie et des Grands Barrages n°13, 3<sup>ème</sup> trimestre 1995, Risques Infos n°13 - Juin 2002.
- 14- Sécurité des ouvrages d'accumulation, Documentation de base relative à la surveillance et à l'entretien, Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, série Eaux - Rapport dell'UFAG, serie Acqua, Version 1.0 (Décembre 2002).
- 15- Paul ROYET, Patrice MERIAUX, Daniel POULAIN, Frédéric POREDES. Evaluation de la sécurité des barrages autorisés. Ingénieries-EAT-N°3, Septembre 1995.
- 16- M. POUPART, P. ROYET. La surveillance des barrages. Colloque Technique CFGB, Aix-en-Provence, mai 2001.
- 17- Sécurité des ouvrages d'accumulation. Documentation de base relative à la vérification de la sécurité en cas de crue. Office fédéral de l'énergie OFEN, Section Barrages. juin 2008.
- 18- Corinne CURT. Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances, Application aux barrages en remblai. Thèse de Doctorat. Université Blaise Pascal - Clermont II. Janvier 2008.
- 19- ANDRIES Emilie. Risques hydrauliques induits par la formation et la rupture d'un barrage naturel provoqué par un glissement de terrain. Mémoire d'Ingénieur. Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg. Juin 2008.
- 20- Malika BOUHLALI. Les risques associés aux barrages. Mémoire de magister. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemce, Algérie. 2006.
- 21- Fiche N° 29490. Rupture d'un barrage, Le 2 décembre 1959 Malpasset [Var], France. Ministère du développement durable - DGPR / SRT / BARPI. avril 2009.

22- Dossier de presse. Inspection subaquatique du barrage de Tignes. Septembre 2010.

23- Dossier n°2, Fiche Professeur. Les travaux publics et l'énergie hydraulique, La construction d'un barrage hydroélectrique. Education Développement Durable.