

CHAPITRE :
MECANISME DE VIEILLISSEMENT
DES BARRAGES

1- Introduction :

La dégradation des barrages et de leurs ouvrages annexes est un grand problème pour la pérennité des ouvrages. Ainsi le souci de voir apparaître des dégradations sur ces ouvrages doit être une préoccupation permanente durant toute la vie des ouvrages, depuis leur construction jusqu'à leur abandon ou leur démolition. La description de ces phénomènes est donc primordiale pour comprendre et analyser les modes de ruptures et de dégradations liés aux barrages.

2- Les barrages en béton :

2.1- Phénomènes touchent les différents composants du barrage :

| N° | Composants | Phénomènes agissants sur le barrage | | |
|----|-------------------------|-------------------------------------|------------|---------------------------|
| | | vieillessement | Gonflement | Dissolution Et érosion |
| 01 | Parement amont | X | | |
| 02 | Crête | X | X | |
| 03 | Corps du barrage | | X | X |
| 04 | Drainage du barrage | X | | |
| 05 | tirants | X | | |
| 06 | fondations | | | X |
| 07 | Rideaux d'étanchéité | X | | X |
| 08 | Drainage des fondations | X | | |

2.2- Rideaux d'injection et réseaux de drainage :

Le vieillissement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage d'un barrage en béton constitue un cas particulier du mécanisme de dissolution et d'érosion.

Le vieillissement des rideaux d'injection résulte le plus souvent d'un défaut de conception, en particulier d'une mauvaise adéquation entre les matériaux injectés et l'agressivité des eaux, cela conduit alors à la dissolution du coulis d'injection par réaction chimique.

La dégradation des rideaux d'injection peut être également due à une réalisation inadaptée (pression d'injection, volume injecté, densité des injections, profondeur...) cela conduit alors à des percolations à travers les zones de la fondation traitée ou au contournement du rideau d'injection en profondeur ou en rive.

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

Le mécanisme de vieillissement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage peut être détecté par des augmentations de la piézométrie dans la fondation, lié à la percolation dans la partie en aval du rideau d'injection ou du réseau de drainage, en outre, le vieillissement du voile d'injection va se traduire par une augmentation des débits de drainage et à contrario, le vieillissement des réseaux de drainage par leur diminution.

2.3- Parement amont :

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

- **le gel-dégel** : il intéresse la zone supérieure de la retenue. Ainsi les gradients thermiques importants avec les fortes et rapides variations de température ambiante provoquent des contraintes élevées sur le revêtement amont et ces sollicitations thermiques peuvent entraîner la déformation du revêtement amont en membranes souples ou la fissuration d'un masque amont en béton. Ces phénomènes se produisent sur la partie non immergée du barrage, qui n'est pas protégée par l'eau de la retenue.
- **Les eaux pures** : ce processus chimique correspond à l'attaque des revêtements amont, en béton ou en maçonnerie, par les eaux agressives. Les dégradations des revêtements par les eaux pures se produisent sur toute la hauteur du parement, y compris la partie immergée.
- **Les sous-pressions** : apparaissant à l'arrière des revêtements amont lors de la baisse du niveau de la retenue, sont susceptibles de décoller les enduits (ciment, mortier...).

- **Divers agents environnementaux** : les vagues, l'action mécanique des flottants ou encore les glaces peuvent dégrader les revêtements souples en géomembrane.

2.4- Les tirants :

La principale cause de vieillissement des tirants est la corrosion. Les tirants sont souvent dans un milieu saturé et le remplissage des gaines peut être défaillant, surtout dans le cas d'ouvrages anciens. Les ancrages extérieurs sont particulièrement vulnérables.

Le fluage du béton et de l'acier des tirants peut conduire à une perte progressive de précontrainte, qui s'accompagne de déformations anormales, puis de fissurations, pour aboutir à la ruine de l'ouvrage si on n'intervient pas à temps.

2.5- Dissolution et érosion :

Le mécanisme de dissolution et érosion met en jeu des réactions chimiques entre les composants du corps du barrage ou de la fondation et les eaux d'infiltration. Ces attaques chimiques se traduisent par la dissolution des matériaux (béton ou maçonnerie pour le corps du barrage et masse rocheuse, rideaux d'injection, coulis pour les fondations). Ensuite, la circulation d'eau conduit au transport des particules dissoutes puis peut provoquer l'érosion des matériaux et leur entraînement vers l'aval.

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

2.5.1- le corps du barrage :

Ce mécanisme se manifeste par des granulats apparents sur le parement amont, des dépôts et des efflorescences blanchâtres de carbonate de calcium dans les galeries, sur le parement aval et le long des joints. A long terme, l'effet principal de ce mécanisme est une perte de matériaux par dissolution puis érosion, pouvant conduire, si la perte de poids est importante, à une diminution sensible des critères de stabilité. La dissolution des matériaux induit une augmentation de la perméabilité du barrage, conduisant à une augmentation des débits de drainage (alimentant le mécanisme de dissolution) et des sous-pressions (contribuant à diminuer à nouveau les critères de stabilité).

2.5.2 - les fondations :

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

2.6- Gonflement interne

Les réactions de gonflement interne comprennent essentiellement l'alcali-réaction et la réaction sulfatique interne.

L'alcali-réaction est une réaction chimique entre les alcalins contenus dans la phase liquide interstitielle du béton et les granulats du béton. Elle correspond à une attaque des granulats par le milieu basique du béton et provoque la formation de gel de réaction, dont l'expansion peut engendrer un gonflement. Le gonflement met en compression les granulats et en traction le ciment qui finit par se fissurer.

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

- les propriétés des matériaux : granulats, ciments : Cette réaction nécessite la présence de produits réactifs dans les granulats (minéraux ou roches réactifs).

-les effets extérieurs : humidité température et contraintes de compression, ainsi une humidité relative importante (80% ou plus) est très favorable à l'alcali-réaction et à un moindre niveau, la vitesse de la réaction chimique augmente avec la température.

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

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

- des déformations : un barrage étant confiné selon l'axe de sa crête, il se produit toujours un déplacement en crête vers le haut. Par ailleurs, on observe le plus souvent un déplacement axial, vers l'amont ou l'aval selon la configuration du site et de l'ouvrage.

- la fissuration : un premier type de fissures liées au gonflement se produit dans la masse du béton et apparaît en surface sous forme de façades à mailles plus ou moins larges ou en étoiles. Ces fissures favorisent la pénétration d'eau et l'action des sous-pressions. Ces infiltrations, combinées au confinement, continuent à alimenter le gonflement et peuvent alors entraîner un deuxième type de fissures plus profondes : les fissures structurales.

- des exsudats blanchâtres formés de calcite et parfois de gels translucides

- La réaction sulfatique interne, sans faire appel à une source extérieure de sulfate, provoque un gonflement du matériau qui engendre une fissuration de la structure. Le moteur de cette réaction est la formation d'ettringite, un minéral dont la création au sein du béton s'accompagne d'un gonflement significatif. L'ettringite est un trisulfoaluminate de calcium hydraté dont la formation nécessite la consommation d'une grande quantité d'eau, normalement, l'ettringite est un minéral qui se forme au moment de la prise du béton (on parle alors d'ettringite primaire), et celle-ci ne crée pas de pathologie car sa formation se fait à un moment où le béton a encore une certaine viscosité. Par contre, lorsque l'ettringite se forme ultérieurement (on parle alors d'ettringite différée), son expansion se produit au sein d'un matériau organisé et mécaniquement rigide, et les forces d'expansion sont telles que le béton se fissure en traction.

Dans l'état actuel des connaissances sur cette réaction sulfatique, deux causes peuvent être avancées :

- soit l'ettringite primaire n'a pas pu se former au moment de la prise (essentiellement parce qu'une température élevée a été atteinte lors de la prise), et des sulfates se trouvent à l'état libre, ceux-ci sont alors susceptibles d'être remobilisés pour former de l'ettringite secondaire.

- soit l'ettringite primaire a pu se former, mais les conditions de température élevée ont provoqué sa dissolution partielle, ce qui conduit également à un apport en sulfates libres dans la solution interstitielle du béton.

3- Les barrages en remblai :

3.1- Surverse :

La rupture par surverse a représenté environ 40 % des ruptures des barrages en remblai entre 1950 et 1986, en excluant les ruptures pendant la construction. Le mode de rupture par surverse est provoqué par des tassements de la crête du remblai dus eux-mêmes à des déformations du remblai ou de la fondation ce qui entraîne une diminution de la revanche ou par un dimensionnement inadéquat de l'évacuateur de crues. Cette situation génère un affaiblissement de la sécurité du barrage vis-à-vis de la submersion en cas de crue et elle est très dangereuse car la rupture par submersion peut se produire pour un déversement très faible par dessus la crête dans le cas des barrages en terre.

Phénomènes pouvant entraîner une surverse :

Outre un dimensionnement ou un entretien inadéquat de l'évacuateur de crues, les origines de ce mode de rupture sont donc tous les phénomènes qui entraînent une déformation du remblai ou de la fondation à savoir :

- La déformation de la fondation sous l'effet de la dissolution de fondations rocheuses ou par consolidation ou tassement.
- Le compactage et la consolidation du remblai sous l'effet de son poids ou de sollicitations du milieu ou d'exploitation ou encore du fait d'un compactage initial insuffisant.
- L'érosion interne provoquant une perte de matériaux et pouvant entraîner la formation de vides qui généreront à leur tour des déformations de la fondation ou du remblai.
- les glissements du talus ou de la fondation ;
- Les phénomènes d'érosion superficielle qui peuvent dégrader la crête soit directement (pluie ou brève submersion accidentelle de la crête) soit indirectement par la dégradation de la protection du talus amont. Les vagues peuvent déplacer les pierres de poids insuffisant et creuser le remblai, conduisant ainsi à la formation de marches d'escalier dans la zone de

marnage, ce qui peut ensuite conduire à des glissements localisés qui progressent peu à peu en diminuant à terme la largeur en crête du remblai.

3.2- Glissement du remblai ou glissement du remblai et de la fondation

La rupture par glissement a représenté 1,5 % des ruptures des barrages en remblai entre 1950 et 1986, en excluant les ruptures pendant la construction. Le mode de rupture par glissement peut toucher aussi bien la fondation que le remblai. Il est provoqué par une augmentation de la piézométrie qui peut atteindre à terme le talus aval et mettre en danger la stabilité du remblai,

Ce mécanisme trouve donc ses origines dans les phénomènes qui entraînent une saturation des matériaux dans le remblai ou la fondation à savoir :

- La défaillance du système d'étanchéité, vieillissement du rideau d'injection ou fracture du voile d'étanchéité, vieillissement du masque amont.

- Le colmatage, contournement ou le cisaillement du dispositif de drainage.

- L'augmentation de la saturation liée à la nature des matériaux entraîne une augmentation des sous-pressions dans la fondation rocheuse ou instabilité des matériaux en fondation ou en remblai.

- La déformation ou la fracturation du remblai : rupture par cisaillement, consolidation ou tassement de la fondation, poids du remblai, modifications dans les états de contrainte dans le remblai, compactage insuffisant ou encore sollicitations du milieu ou liées à l'exploitation.

Les modifications des états de contrainte de la fondation : vidange rapide, variations des charges hydrostatiques ou l'abaissement de la nappe sous le remblai.

- Un régime pluviométrique défavorable qui tend à saturer le remblai.

3.3- Mécanisme de l' érosion interne.

3.3.1- introduction.

L' érosion interne est un processus qui implique des arrachements de particules et leur transport dans le barrage ou sa fondation. Elle peut conduire à l'instabilité de l'ouvrage.

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. Pour la période jusqu' à 1986, 65% des érosions internes se sont produites dans le remblai, 30% dans la fondation et 5% pourcents du barrage vers la fondation.

3.3.2- phases d' érosion :

Quatre processus d' érosion interne sont identifiés :

- Erosion régressive :

L' érosion régressive implique qu'une fuite existe au niveau d'une surface libre non filtrée (parement aval d'un ouvrage homogène, pied aval du barrage,...) L'eau entraîne les particules en commençant par le débouché à l'aval. L' érosion remonte ensuite vers l'amont en s'accroissant car l'eau a un trajet de plus en plus court à parcourir et sa vitesse augmente.

- Érosion de conduit

L' érosion de conduit apparaît selon un chemin préférentiel tel que des fissures ouvertes ou des trous préexistants. L'infiltration d'eau est suffisante au travers de ce chemin pour initier le détachement de particules de sol de surfaces latérales et leur transport induisant un agrandissement du chemin. Dans le cas de matériaux cohésifs, ces trous conduisent à la formation d'un tunnel continu entre l'amont et l'aval du barrage ou de sa fondation, Dans certaines circonstances, ces ouvertures peuvent être dues à la présence d'éléments structuraux comme les évacuateurs de crues, conduites... . Mais dans une large majorité ces érosions de conduit se produisent dans des sols cohésifs.

- Suffusion :

La suffusion implique l'érosion sélective de particules fines dans la matrice de particules grossières. Les particules fines sont arrachées des espaces entre les particules grossières par le flux et laissant un squelette de sol formé de particules grossières, Ceci entraîne peu ou pas de changement dans le volume de la masse de sol mais une augmentation de la perméabilité et des vitesses de leau.

- **Érosion de contact :**

Contrairement à la suffusion qui concerne un matériau unique, l'érosion de contact implique l'érosion de fines particules au contact avec une couche de matériau plus grossier due au flux au travers de ce dernier matériau. Les particules fines sont lessivées laissant les particules plus grossières en place. Les conséquences de l'érosion de contact dépendent de la position de la couche de particules fines par rapport au matériau grossier au-dessous ou au-dessus. Si elle est située en dessous, les cavités entraînent des tassements, si elle est située en dessus, les cavités peuvent rester stables si le sol est suffisamment cohésif.

3.3.1- Causes de rupture :

Les origines de ce mode de rupture sont tous les phénomènes qui entraînent des circulations d'eau dans le remblai ou la fondation et un transport des particules à savoir

- la défaillance du système d'étanchéité (dissolution du rideau d'injection, fracture du voile d'étanchéité, vieillissement du masque amont, conception et/ou réalisation inadéquates du dispositif d'étanchéité
- L'absence de filtre ou des conditions de filtre non respectées, le contact entre un matériau grossier et un matériau fin ou encore des matériaux dans lesquels la granulométrie n'assure pas l'auto-filtration. ces situations permettent un entraînement des particules fines vers l'aval;
- le colmatage, le contournement ou la rupture du dispositif de drainage, la rupture d'une canalisation.
- L'augmentation des percolations liées à la nature des matériaux : augmentation des sous-pressions dans la fondation rocheuse, instabilités des matériaux en fondation ou en

remblai du fait de sauts de granulométrie entre couches successives, compactage mal réalisé autour d'un instrument d'auscultation ou d'une conduite

3.4- la liquéfaction :

La liquéfaction d'un sol saturé et sans cohésion sous l'effet d'un mouvement sismique se traduit par une diminution de la rigidité du sol et de sa résistance en relation avec l'accumulation de la pression interstitielle et la réduction consécutive des contraintes effectives. Ces pertes de rigidité et de résistance sont susceptibles de produire des déformations permanentes significatives, voir une quasi-annulation de la contrainte effective dans le sol.