



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Cheikh
Larbi Tébessi. Tébessa

Faculté des Sciences Exactes, des Sciences
de la Nature et de la Vie



Département des Sciences de la Terre et de l'Univers
Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Géologie

Option : Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

Thème:

Stabilité des barrages en terre « Etude Bibliographique »

Présenté par :

AIT SAADI Katia

AIT YAHIA Mohammed Ridha

Devant le jury

Pr. BAALI Fethi
Pr. FEHDI Chems'eddine
Dr. MOUCI Ridha

Professeur U.L.T Tébessa
Professeur U.L.T Tébessa
M.C « B » U.L.T Tébessa

Président
Examineur
Rapporteur

Session Juin 2023

Dédicace

Je dédie ce travail à tous ceux qui me sont très chers,

A la mémoire de mon très cher et regretté père auteur de mes jours et qui n'a pas goûté aux fruits de ses années de souffrance. Il fut irremplaçable : que son âme reçoive ici l'expression bien modeste de ma gratitude et ma reconnaissance.

A ma très chère mère, pour son amour éternel et tous les sacrifices qu'elle a consenti pour mon éducation et mon bien-être, que sa satisfaction me soit accordée après celle de dieu.

A la mémoire de mon frère, cousin, ami Nassim qui nous a quitté très tôt.

A ma sœur Meriem et mon frère Abdelghani pour leurs aides sans cesse et leur amour infailible.

A mes oncles : Boussaad, Mourad, Djamel, Mahmoud, Aziz Bahloul. mes tantes, et toute la famille AIT YAHIA de Tebessa, Setif et Alger pour leur soutien et encouragement.

A tous mes amis.

Ridha

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

*A la mémoire de mon père parti très tôt, ma maman qui m'a soutenu et encouragé
durant
ces années d'études, qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*A mes frères, sœurs, nièce et neveu, à ma famille, mes proches et à ceux qui me
donnent de*

L'amour et de la vivacité.

*A ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation
de ce travail.*

A tous mes ami(e)s qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime.

Katia

Remerciements

Nous voudrions exprimer nos reconnaissances et nos remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont eu l'amabilité de nous prodiguer aides, critiques, suggestions et encouragements dans l'accomplissement du présent travail.

En particulier, notre promoteur **Mr R.Mouici**, qui a bien voulu nous encadrer, et qui nous à fait profiter de ses directives, ses conseils judicieux et les très nombreux moments consacrés à la discussion de nos travaux, qu'il trouve ici l'expression de nos gratitude pour l'intérêt dont il à fait preuve a l'égard de ce travail.

Nos vifs remerciements aux membres de jury qui voudront bien juger ce travail, et tous ceux qui nous ont aidé de pré ou de loin a sa réalisation.

Nous présentons notre plus grand respect à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation et nous leur exprimons notre immense gratitude.

Merci également à tous nos collègues et amis pour leur soutien et encouragements.

ABRÉVIATION

USBR: United States Bureau of Reclamation

CFBR: Comité Français des Barrage et Réservoir

ASDSO: Association of State Dam Safety Officials

USDA: United States Department of Agriculture

USSD: United States Society on Dams

FEMA: Federal Emergency Management Agency

NRCS: Natural Resources Conservation Service

DAJ: Dams Agency Japan

UCDAVIES: University of California Davies Campus

NR: Niveau Normal de la Retenue

PHE: Plus Haute Eau

n

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES BARRAGES

Photo I.01: barrage Mooserboden, Autriche (HydroTech).....	4
Figure I.02: les différents types de barrage (the constructor.org).....	5
Figure I.03: coupe d'un barrage poids (Sadiq, 2022)	6
Figure I.04: coupe d'un barrage poids (CFBR, 2012)	6
Photo I.02: les plots verticaux (flicr.com).....	7
Photo I.03: barrage poids grande-Dixence en suisse le plus haut au monde 284m (Martinezbres).....	7
Figure I.05: fonctionnement en arc (CFBR, 2012)	8
Photo I.4: barrage Katse Lesotho 184m (SkyPixels).....	8
Figure I.06: schéma démonstratif des contreforts (CFBR, 2012)	9
Figure I.07: (CFBR, 2012)	10
Figure I.08: (CFBR, 2012)	10
Figure I.09: (CFBR, 2012)	11
Photo I.06: barrage Daniel Johnson 214m, Quebec (JM Chouinard).....	12

CHAPITRE II: LES BARRAGES EN TERRE

Figure II.01: pourcentage de tous les barrages dans le monde (Adamo, 2020).....	14
Figure II.02: les différents types de barrage en remblais (Benadda).....	15

Figure II.03: coupe d'un barrage homogène (Chegg Inc, 2003).....	16
Figure II.04: coupe d'un barrage homogène (Universalis France).....	16
Photo II.01: vue générale d'un barrage en terre homogène (the constructo.org)....	16
Figure II.05: coupe d'un barrage en terre noyau étanche (Assemblée nationale)...17	
Figure II.06: les types de noyau dans un barrage zoné. (Delliou, 2003).....	18
Photo II.02: barrage zoné Nurek Tajikistan 304m (Tajik Agrarian university).....	18
Figure II.07: barrage avec membrane central. (Delliou, 2003).....	19
Figure II.08: Béton bitumineux (asphalte). (Google image).....	19
Figure II.10: technique paroi moulée. (Advanced construction techniques.com) .	20
Photo II.04: la trancheuse (Advanced Construction techniques.com).....	20
Figure II.11: coupe d'un barrage à membrane centrale. (punmia, 1992).....	21
Photo II.05: barrage Tieton à Washington barrage en terre avec membrane en béton armée (USBR, 2012).....	21
Figure II.12: coupe d'un barrage en enrochement. (Sihong Liu, 2012).....	22
Figure II. 13: coupe d'un barrage en enrochement avec (a) membrane incliné et (b) centrale. (dept.of the army. usa ,1982)	22
Figure II.14: coupe d'un barrage en enrochement avec masque amont (USBR, 1977)	23
Photo II.06: barrage en enrochement Ulla-Forre, Norvège (Martin NH).....	23
Figure II.15: barrage en enrochement (Boukezzi)	24
Photo II.07: Masque en béton armé (barrage New Spicer Meadow, USA).....	24

Photo II.08: barrage de Monne (CFBR, 2012).....	25
Photo II.09: Pose de géomembrane (barrage de Sar Cheshmeh, Iran).....	25

CHAPITRE III : LES CAUSES D'INSTABILITE DES BARRAGES EN TERRE

Figure III.01: les différentes causes de rupture des barrages en terre (FEMA, 2016).....	28
Figure III.02: la submersion d'un barrage en terre (Bouziane, 2020).....	30
Figure III.03: la submersion du barrage conduit à la rupture complète. (Arabtraining.com).....	30
Photo III.01: la rupture du barrage Glashutte- Allemagne par submersion (ASDSO).....	31
Figure III.04: le développement des vagues à cause du vent (USBR, 2012).....	32
Photo III.02: érosion de la face amont par les vagues (the constructor.org).....	32
Figure III.05: l'action du gel - dégel dans le sol. (Viklander, 1997).....	33
Figure III.06: fissure provoqué par le gel - dégel (Jantzer, 2005).....	34
Photo III.03: érosion du pied aval due au débordement de l'évacuateur de crue (The constructor.org).....	35
Photo III.04: protection du parement aval (USBR, 2012).....	35
Figure III.07: battance (splash) et ruissèlement (Bradford et Blanchar, 1997).....	36
Photo III.05: formation des ravins à cause des ruissellements (The constructor.org).....	36
Figure III.08: les bermes (Garg, 2011).....	37
Photo III.06: enrochement + bermes dans la face aval (Civil engineering blog).....	37
Figure III.09: ligne de saturation dans un barrage homogène sans drain (Boukezzi).....	38

Figure III.10: schéma représentatif des divers phénomènes initiateur de l'érosion dans un barrage (Schuler et Brauns, 1996).....	39
Figure III.11: les facteurs affectant l'initiation de l'érosion interne (Bouziane, 2020).....	39
Photo III.07: le piézomètre pour mesuré la charge hydraulique.....	39
Figure III.12: phénomène de boulangerie. (Dr.mouici).....	41
Figure III.13: phénomène d'érosion régressive. (Dr.mouici).....	41
Figure III.14: phénomène de renard (DESODT, 2016).....	42
Figure III.16: renard à travers les fondations (Garg, 2011).....	42
Figure III.17: renard à travers les fondations et ces conséquences.....	43
Photo III.08: rupture du barrage Big Bay Mississippi, 2004 par renard à travers les fondations (Ferguson et al 2014).....	43
Figure III.18: renard à travers la digue (Garg, 2011).....	44
Figure III.19: rupture du barrage par submersion à cause d'un renard (DESODT, 2016)	44
Photo III.09: submersion à cause d'un renard (Mahesh Prakash, 2009).....	45
Figure III.20:Dispositif de réduction d'érosion interne (DESODT, 2016)	46
Figure III.21: glissement de fondation (Garg, 2011)	47
Figure III.22: la pression interstitielle (Jeanne Boussageon)	48
Figure III.23: glissement du talus amont (Garg, 2011).....	48
Figure III.24: glissement du talus aval (Garg, 2011)	49
Photo III.10: glissement du talus amont du barrage Calaveras, California 1918 (UCDavies).....	50
Photo III.11: barrage de Vajont après le glissement de terrain (CFBR, 2012).....	50
Figure III.25: les ondes sismique (Natur'Eau Quant, 2020).....	51

Photo III.12: la rupture du barrage Fujinuma pendant le séisme du Japon 2011 (DAJ, 2011).....	51
Photo III.13: tassement de la crête et l'endommagement de la face amont et aval du barrage Zipingpu lors du tremblement de terre de Wenchuan Chine (Bin xu, 2014).....	52
Figure III.26: liquéfaction de sol (Khalifa, 2016).....	53
Photo III.14: rupture du barrage San Fernando, California par liquéfaction pendant le séisme de 1971 (UC Davies).....	53
Figure III.28: tassement d'un barrage (Ashour, 2012).....	54

CHAPITRE IV: RECOMMANDATION POUR LA JUSTIFICATION DE LA STABILITE DES BARRAGE EN TERRE

Figure IV.01: les cotes RN et PHE (Boukezzi).....	58
Figure IV.02: ligne de fetch (ABEST, 2017).....	59
Figure IV.3: la hauteur des vagues (ABEST, 2017).....	59
Figure IV.04: schéma représentatifs de la revanche et d'autre mesure de sécurité (Sylvain Paquet, 2013).....	60
Photo IV.01: les méthodes de protection de la face amont (Google image).....	61
Photo IV.02: le rip-rap dans le talus amont du barrage horsetooth Colorado, USA (USBR, 2012).....	62
Photo IV.03: protection du talus avec sol-ciment dans le barrage Choke Canyon, Texas, USA (USBR, 2012).....	63
Photo IV.04: barrage portugais, Porto Rico (US Army Corps of Engineers, 2014).....	64

Photo IV.05: protection du talus aval avec des galets dans le barrage de Jordanelle, Utah, USA (USBR, 2012).....	65
Photo IV.06: protection végétale du talus aval du barrage de scoggins, Oregon (USBR, 2012).....	65
Figure IV.05: berme (Simon, 2012).....	66
Figure IV.06: un barrage homogène avec drain dans la face aval (Kunitomo, 2000).....	67
Figure IV.07: les drains filtrant retenir les matériaux fin et évacuer les débits et pressions d'eau.....	67
Figure IV.08: installation d'un drain de fondation (USDA, 2016).....	68
Figure IV.09: le drain vertical offre une protection contre les défauts du noyau (MDNRC, 2010).....	69
Figure IV.10: tapis drainant (Messaid, 2009).....	69
Figure IV.11: le puits de décharge (USDA, 2016).....	70
Figure IV.12: l'installation du puits de décharge (Adamo, 2020).....	70
Figure IV.13: tapis étanche (Bendjema, 2015).....	71
Figure IV.14: installation de la membrane drainante (USDA, 2016).....	72
Photo IV.07: rupture d'un barrage à cause d'une conduite sans membrane (USDA, 2016).....	72
Figure IV.15: l'installation d'une paroi étanche (Schwank, 2019).....	73
Figure IV.16: voile d'injection (Messaid, 2009).....	74
Figure IV.17: les engins de compactage (Djabri, 2021).....	76
Figure IV.18: la courbe de compactage (Tissot).....	76
Figure IV.19: influence de type de sol (P. Vassart).....	77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.01: répartition des ruptures des barrages selon le type (FOSTER, 2000).....	29
Tableau III.02: rupture et non rupture des fondations des barrages selon le type de sol (Lane)....	47
Tableau III.03: ordre de grandeur du coefficient de perméabilité (Schlosser, 1988)	49
Tableau IV.05: les valeurs de F_s (Benmebarek, 2011)	79
Tableau IV.06: pente des talus de barrage (Rolley, Kreitmann et al, 1977)	80

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX.....	1
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I.....	3
GENERALITES SUR LES BARRAGES.....	3
1. INTRODUCTION.....	4
2. DEFINITION D'UN BARRAGE.....	4
3. LES DIFFERENTS TYPES DE BARRAGES.....	4
3.1. BARRAGE POIDS.....	5
3.2. BARRAGE VOUTE.....	7
3.3. BARRAGE A CONTREFORTS.....	9
3.4. LES BARRAGES EN REMBLAIS.....	12
CHAPITRE II.....	13
LES BARRAGES EN TERRE.....	13
1. INTRODUCTION.....	14
2. CLASSIFICATION DES BARRAGES EN REMBLAIS.....	14
2.1. BARRAGE EN TERRE HOMOGENE.....	15
2.2. BARRAGE EN TERRE HETEROGENE ZONE.....	17
2.3. BARRAGE A MEMBRANE CENTRALE.....	18
2.4. BARRAGE EN ENROCHEMENT.....	22
CHAPITRE III.....	27
LES CAUSES D'INSTABILITE DES BARRAGES EN TERRE.....	27
1. INTRODUCTION.....	28
2. LES CAUSES DE RUPTURE DES BARRAGES EN TERRE.....	28
3. CLASSIFICATION DES RUPTURES DES BARRAGES EN TERRE.....	29
3.1. RUPTURE HYDRAULIQUE (EROSION EXTERNE).....	29
3.2. LES RUPTURES D'INFILTRATION (EROSION INTERNE).....	37
3.2.1. MECANISMES D'EROSION INTERNE.....	38

3.3. RUPTURE STRUCTURALE	46
CHAPITRE IV.....	56
RECOMMANDATIONS POUR LA JUSTIFICATION DE LA STABILITE DES BARRAGES EN TERRE.....	56
1. INTRODUCTION	57
2. PROTECTION CONTRE L'EROSION EXTERNE	57
2.1. LA HAUTEUR DU BARRAGE	57
2.2. LA REVANCHE	58
2.3. PROTECTION DU PAREMENT AMONT	61
2.4. PROTECTION DU PAREMENT AVAL	64
3. PROTECTION CONTRE L'EROSION INTERNE.....	66
3.1. LES DRAINS ET FILTRES.....	66
3.2. PAROI ETANCHE (CUTOFF WALLS).....	73
3.3. INJECTION DES FONDATIONS	73
3.4. LARGEUR DE LA CRETE DU BARRAGE	74
4. STABILITE DE LA STRUCTURE	75
4.1. COMPACTAGE.....	75
4.2. RESISTANCE AU CISAILLEMENT	77
4.3. STABILITE AU GLISSEMENT.....	78
4.4. PENTE DES TALUS DE BARRAGE.....	80
CONCLUSION GENERALE	81
Référence bibliographique	83

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une ressource précieuse et indispensable pour tout développement économique à savoir agricole ou industriel, c'est la source de la vie, sa demande est en croissance permanente. Pour satisfaire cette demande en eau, on a recourus à la mobilisation en eau par la réalisation des ouvrages hydrauliques à savoir les barrages et parmi ces ouvrages les barrages en terre.

Les barrages en terre, également connus sous le nom de barrages en remblai, sont des structures construites en compactant différentes couches de matériaux terrestres, tels que le sol et la roche, afin de créer une barrière capable de retenir l'eau. Bien que les barrages en terre soient conçus pour être fiables et durables, ils ne sont pas à l'abri des ruptures. Les ruptures de barrage peuvent avoir des conséquences catastrophiques, notamment des pertes de vies humaines, des dommages matériels et des incidences sur l'environnement.

Dans ce travail on a essayé, de comprendre les différentes causes des ruptures de barrage en terre, tel que, la submersion Lorsque le niveau d'eau dans le réservoir dépasse la capacité du barrage, le renard qui se produit lorsque l'eau s'infiltré à travers le matériau du barrage et le glissement des talus de barrage.

La prévention des ruptures de barrage nécessite une conception, une construction, une surveillance et un entretien minutieux. On a essayé de maitre en œuvre des mesures préventives efficaces est essentielle pour garantir la sécurité et la stabilité de ces structures tel que le rip-rap pour protégé le parement amont du barrage contre l'action érosive des vagues, les drains pour évacuer les l'infiltration d'eau à travers la digue et le compactage pour assurer la stabilité de la structure.

En appliquant ces mesures préventives il est possible de réduire considérablement le risque de rupture des digues en terre.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES

BARRAGES

1. INTRODUCTION

Les barrages sont des infrastructures essentielles pour la gestion des ressources en eau, fournissant une multitude d'avantages, tels que la production d'énergie hydroélectrique, la régulation des cours d'eau, l'irrigation, le contrôle des inondations et l'approvisionnement en eau potable. Ce chapitre est consacré à citer les différents types de barrages selon les matériaux de Construction et leurs formes.



Photo I.01: barrage Mooserboden, Autriche (HydroTech)

2. DEFINITION D'UN BARRAGE

Un barrage est un ouvrage d'Art placé en travers d'un cours d'eau, destiné à retenir et stocker de l'eau. Il sert également, à l'écroulement de certains cors d'eau sauvages.

3. LES DIFFERENTS TYPES DE BARRAGES

Les deux principaux types de barrages sont les barrages en remblai et les barrages en béton. La structure et les matériaux de construction du barrage jouent un rôle essentiel dans la manière dont il s'oppose aux principales forces hydrauliques ou dans la résistance à l'érosion et aux pressions dues à l'infiltration d'eau.

Les barrages en béton et les barrages en remblai sont complètement différents dans leur conception structurale et leur susceptibilité à certaines ruptures. Pour comprendre les causes et les méthodes de prévention des défaillances et des incidents des barrages, il est important de comprendre d'abord leur conception et leur composition en matériaux

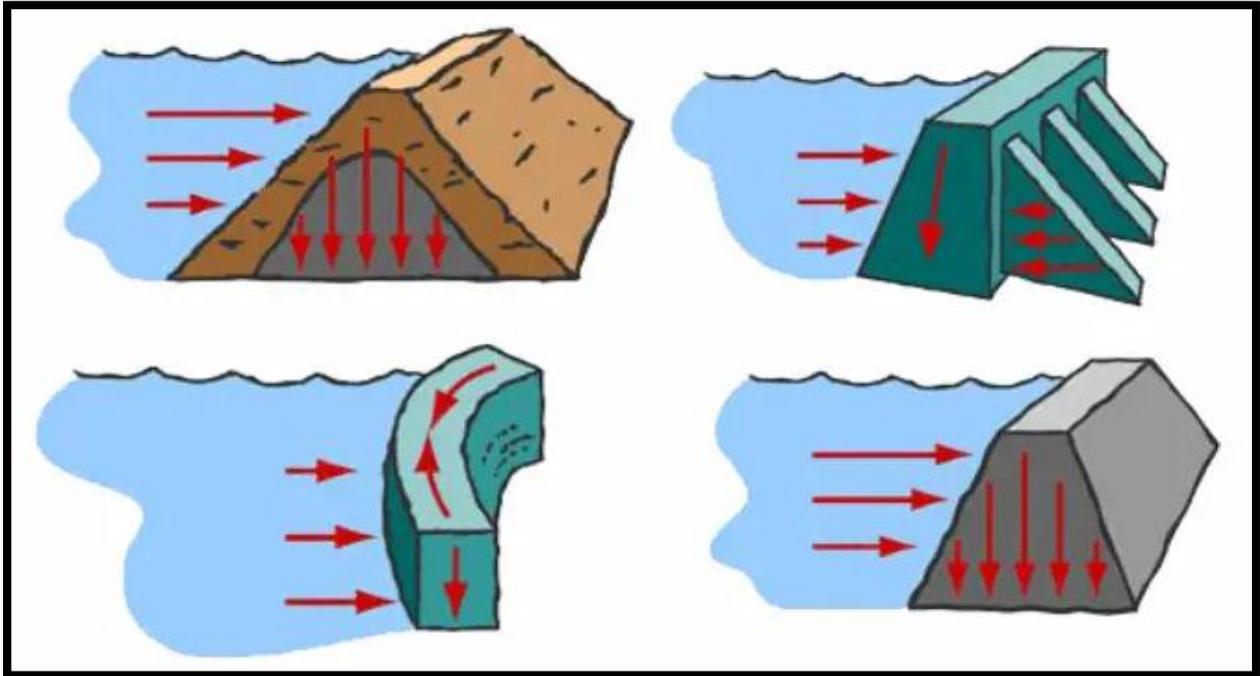


Figure I.02: les différents types de barrage (the constructor.org)

3.1. BARRAGE POIDS

Un barrage-poids est un bloc (en maçonnerie ou en béton), conçu de telle sorte que son poids soit suffisant pour assurer la stabilité contre les effets de toutes les forces imposées.

La maçonnerie a été utilisée dans de nombreux barrages dès le XVIIe siècle.

Cependant, le béton est devenu plus courant à partir de 1900 ou la théorie de l'élasticité et la résistance des matériaux, commença à être définie avec les études de MERY (1840), SAZILLY (1853), DELOCRE (1865), RANKINE (1872-1873) et LEVY(1885). (CFBR, 2012).

Une coupe transversale d'un barrage-poids présente généralement une forme triangulaire.

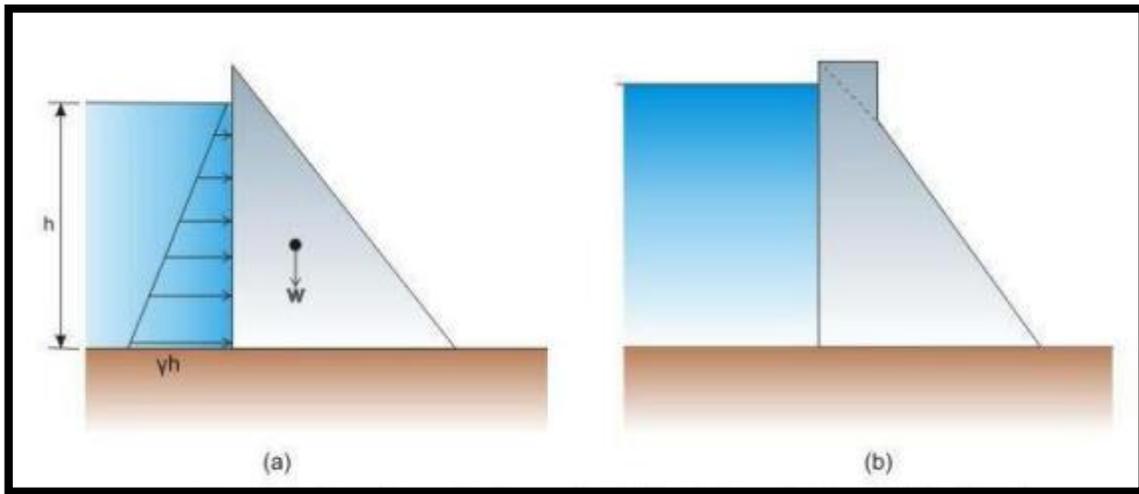


Figure I.03: coupe d'un barrage poids (Sadiq, 2022)

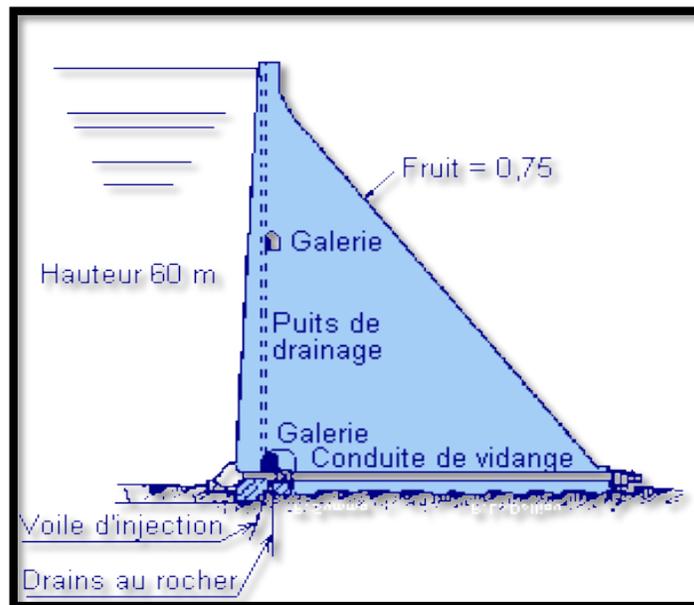


Figure I.04: coupe d'un barrage poids (CFBR, 2012)

Les barrage-poids étaient à l'époque construits en maçonnerie de moellons; en suite été réalisés en béton. Il s'agit de béton non armé, très peu dosé pour réduire les phénomènes thermiques lors de la prise du béton.

A la construction, le barrage est découpé en plots verticaux. Des étanchéités entre les plots sont mises en œuvre avant le remplissage de la retenue. (CFBR, 2012)

- moellons : Pierre de petites dimensions, brute, ébauchée ou équarrie employée avec du mortier pour maçonner un mur (Larousse.fr)



Photo I.02: les plots verticaux (flicr.com)



Photo I.03: barrage poids grande-Dixence en suisse le plus haut au monde 284m (Martinezbres)

3.2. BARRAGE VOÛTE

Les barrages-voûtes sont des ouvrages remarquables par leurs dimensions et leur finesse. Les barrages-voûtes sont constitués d'un seul mur en béton en forme d'arc, avec une courbe convexe vers l'amont. L'effet de voûte permet de transférer la pression de l'eau et d'autres forces

aux rives. La crête d'un barrage-voûte est approximativement triangulaire, comme celle d'un barrage-poids, mais elle est comparativement plus mince. Les barrages-voûtes conviennent parfaitement aux vallées étroites et profondes. Des masses rocheuses solides dans les pentes sont nécessaires pour résister aux forces transférées par l'action de la voûte.

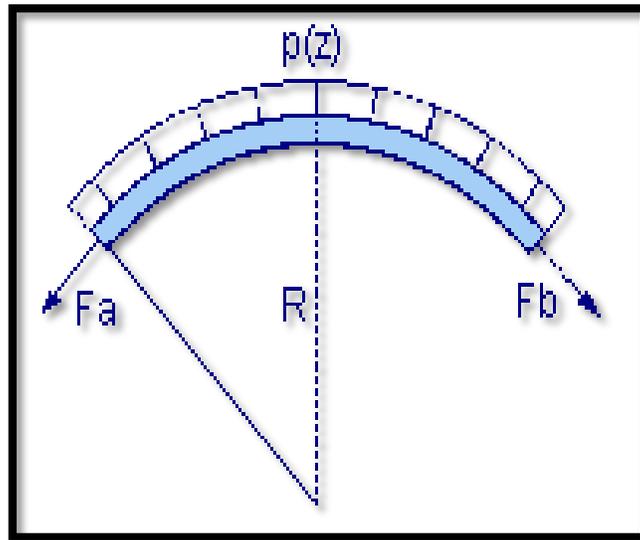


Figure I.05: fonctionnement en arc (CFBR, 2012)

C'est le type de barrage le plus achevé en ce sens que c'est celui qui utilise le mieux les matériaux employés. Ses progrès sont allés de pair avec l'amélioration de la qualité des ciments et la maîtrise de la fabrication et de la mise en place des bétons. (CFBR ,2012)



Photo I.4: barrage Katse Lesotho 184m (SkyPixels)

3.3. BARRAGE A CONTREFORTS

Les barrages à contreforts sont un type de barrage qui utilise une série de contreforts en béton armé pour supporter le poids du barrage et résister à la force de l'eau qui pousse contre lui.

Les barrages à contreforts sont constitués :

- des murs, ayant généralement une forme triangulaire, construits dans la vallée parallèlement à l'axe de la rivière
- des bouchures entre les contreforts pour maintenir l'eau de la retenue. Ces bouchures s'appuient sur les contreforts auxquelles elles transmettent la poussée de l'eau.

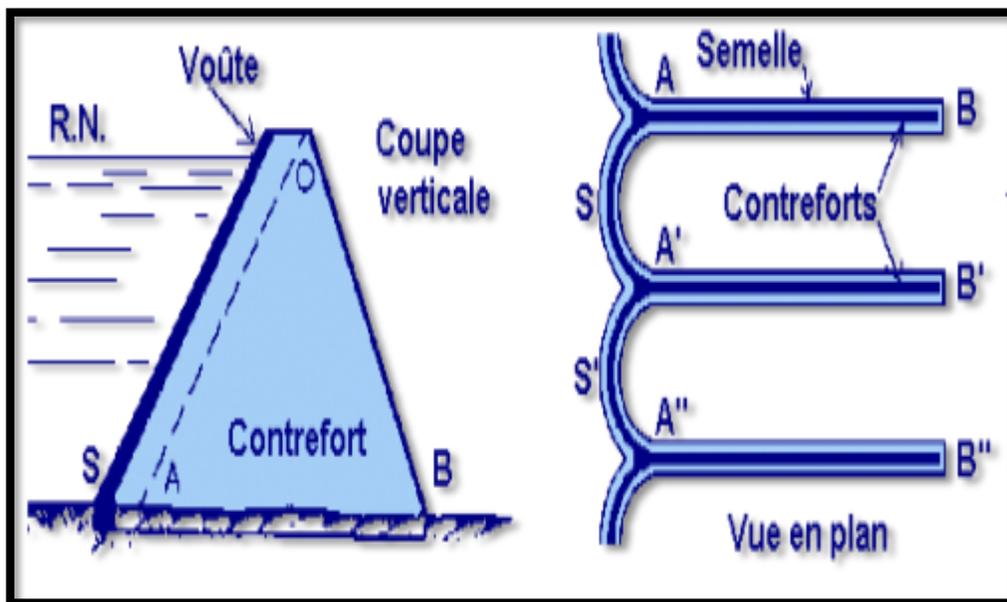


Figure I.06: schéma démonstratif des contreforts (CFBR, 2012)

- bouchure : Élément mobile d'un barrage dont la manœuvre permet de régler le niveau amont du cours d'eau. (Larousse)

Les bouchures sont très souvent inclinées vers l'aval pour que la poussée de l'eau soit orientée vers le bas de façon à améliorer la stabilité des contreforts. Elles-mêmes peuvent être de plusieurs types :

- un épaissement amont du contrefort.

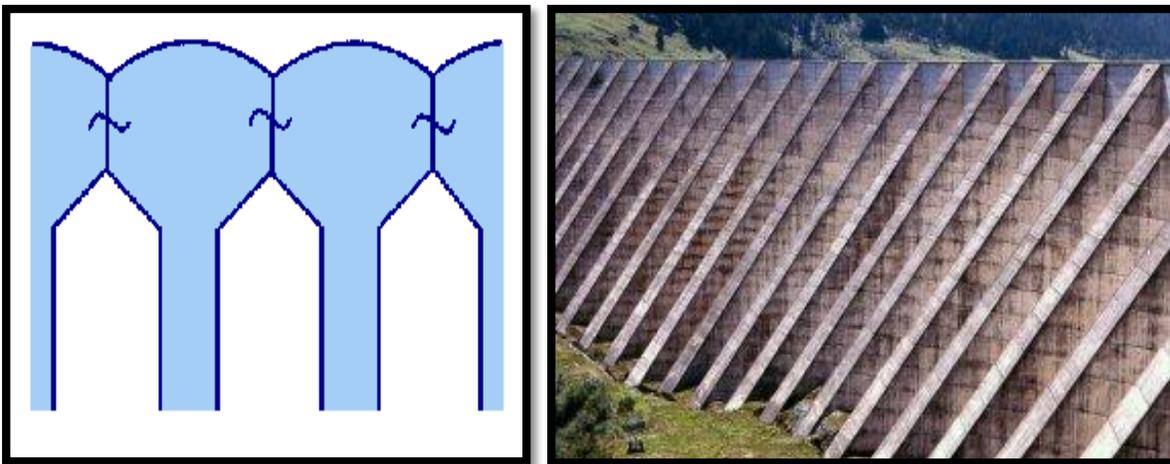


Figure I.07: (CFBR, 2012)

- une dalle plate en béton armé.

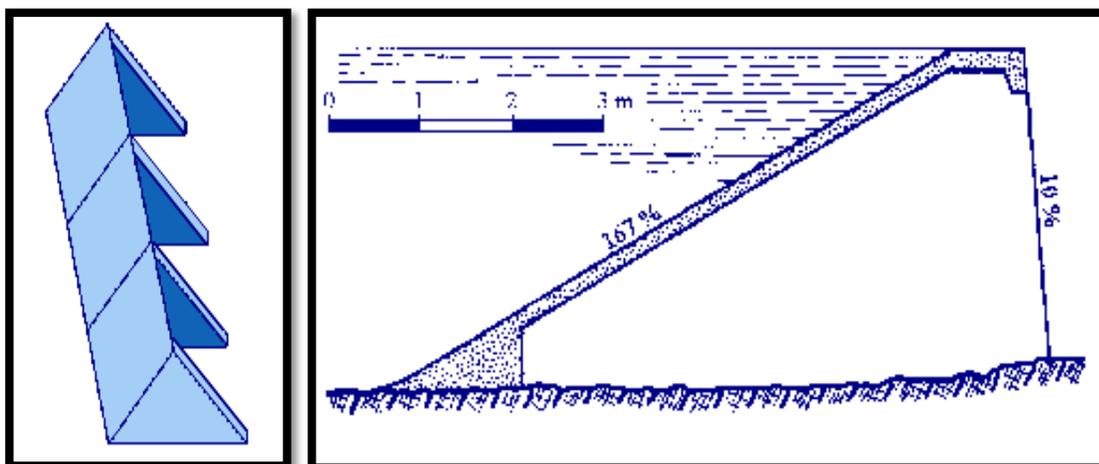


Figure I.08: (CFBR, 2012)

- une voûte de faible dimension.



Figure I.09: (CFBR, 2012)

Les barrages à contreforts nécessitent moins de béton et de matériaux de construction, ce qui en fait une option rentable par rapport à un barrage-poids de même hauteur.

Bien que les contreforts en béton armé offrent une grande stabilité, il existe un risque d'instabilité si le barrage n'est pas correctement réalisé et aussi ils sont plus sensibles aux effets thermiques et aux séismes et qui nécessitent une attention particulière pour le contact avec le rocher de fondation. (CFBR, 2012)



Photo I.05: vue générale du barrage Roselend France (geosoc.fr)



Photo I.06: barrage Daniel Johnson 214m, Quebec (JM Chouinard)

3.4. LES BARRAGES EN REMBLAIS

Les barrages en remblai sont des barrages constitués de matériaux meubles allant de l'argile fine à des éléments très grossiers (roche). Ils regroupent plusieurs catégories en fonction de la méthode employée pour assurer l'étanchéité. Ce type d'ouvrage très ancien est le plus communément utilisé. Ces barrages seront vus avec plus de détails au chapitre II.

CHAPITRE II

LES BARRAGES EN

TERRE

1. INTRODUCTION

Les barrages en terre appelés aussi barrage en remblais, sont construits essentiellement avec des matériaux naturels provenant de la terre, principalement le sol et la roche. Ils sont très utilisés et présentent de nombreux avantages par rapport aux barrages en béton en ce qui concerne la topographie du site et le coût. Ils peuvent être construits sur des fondations rocheuses ou sur le sol, ce qui les rend applicables à de nombreux sites où les barrages en béton ne peuvent pas être construits.

Le fait que les barrages en remblai sont construits à partir de matériaux extraite sur le site du barrage ou à proximité signifie que la construction est plus économique que la production de béton.

Les barrages en terre représentent près de 70% du parc mondial des barrages.

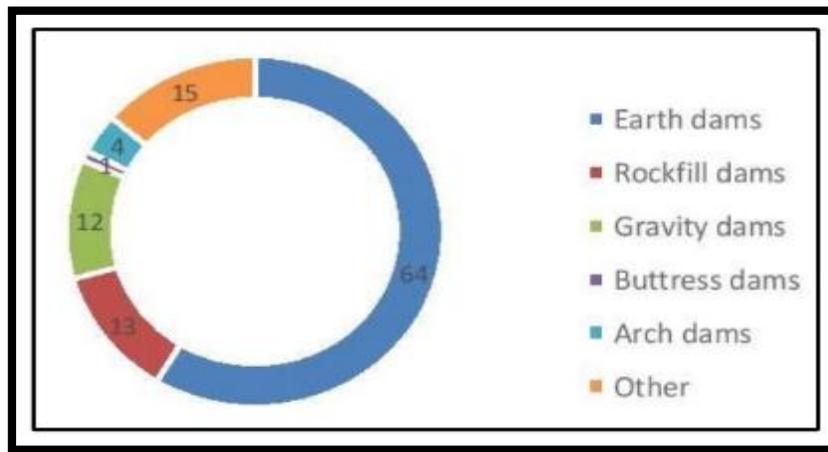


Figure II.01: pourcentage de tous les barrages dans le monde (Adamo, 2020)

2. CLASSIFICATION DES BARRAGES EN REMBLAIS

Les barrages en remblais peuvent être classés en fonction de différents critères, notamment leurs matériaux de construction, leurs caractéristiques structurales et leurs fonctions prévues.

Voici quelques classifications courantes des barrages en terre :

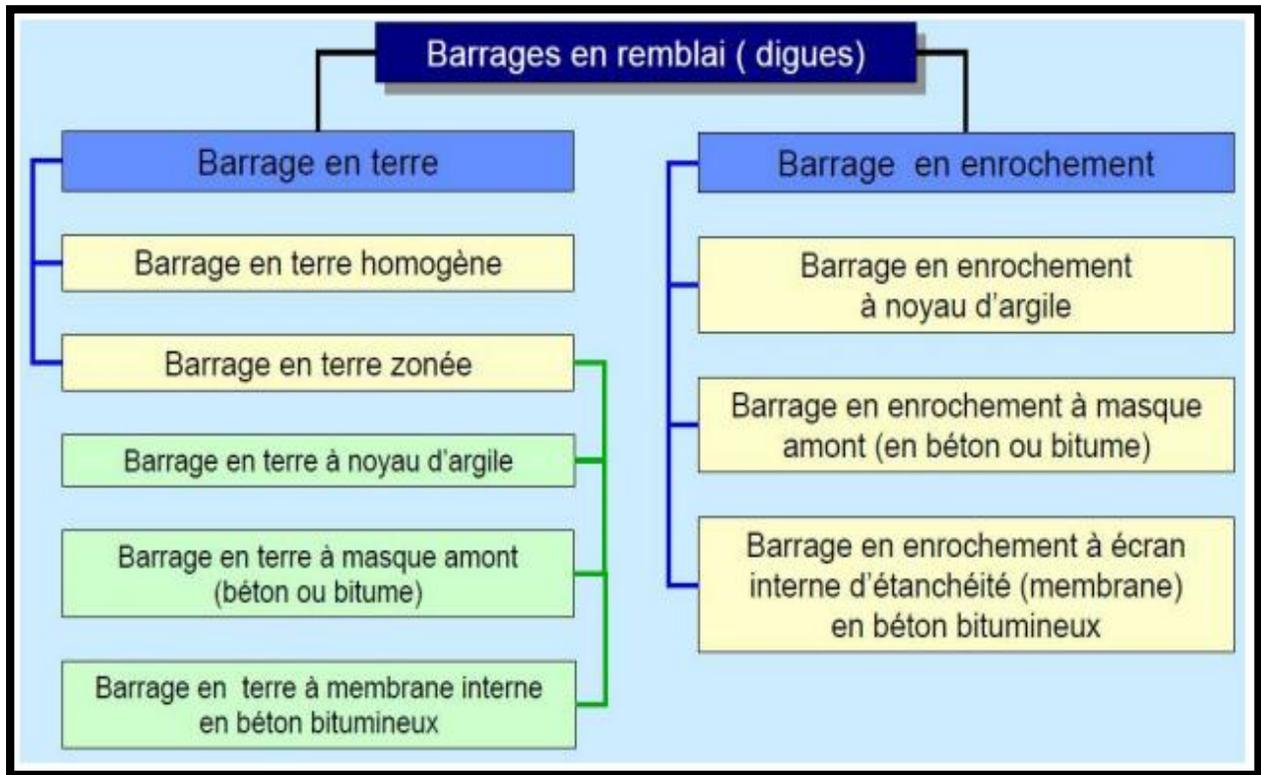


Figure II.02: les différents types de barrage en remblais (Benadda)

2.1. BARRAGE EN TERRE HOMOGENE

Un barrage homogène est un barrage composé presque totalement d'un seul matériau, qui est généralement imperméable, le barrage homogène est le type de barrage le plus simple à construire et à entretenir et, sans aucun doute, le plus ancien.

Il consiste à construire en travers du lit de la rivière un massif en terre dont les pentes sont assez douces pour assurer la stabilité et la terrasse imperméable (typiquement de l'argile) pour éviter l'infiltration d'eau.

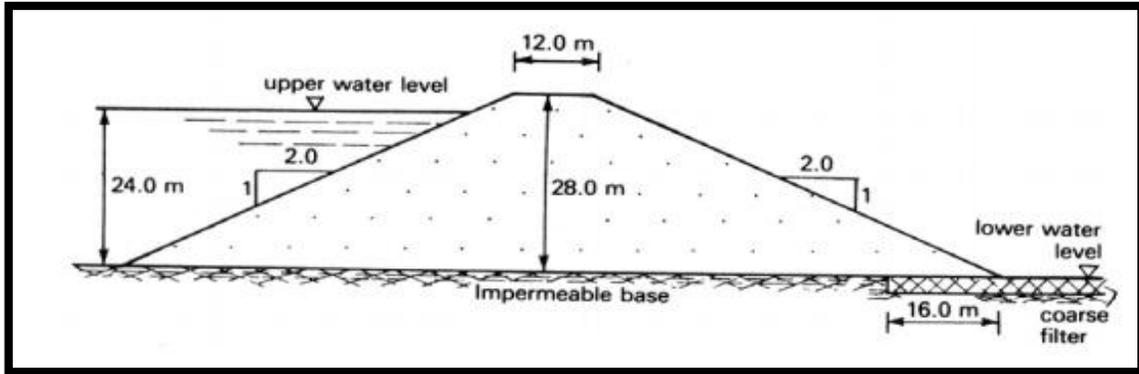


Figure II.03: coupe d'un barrage homogène (Chegg Inc, 2003)

Les barrages homogènes sont principalement utilisés pour les petits barrages de stockage, les barrages de dérivation et les barrages de retenue d'eau pour les animaux.

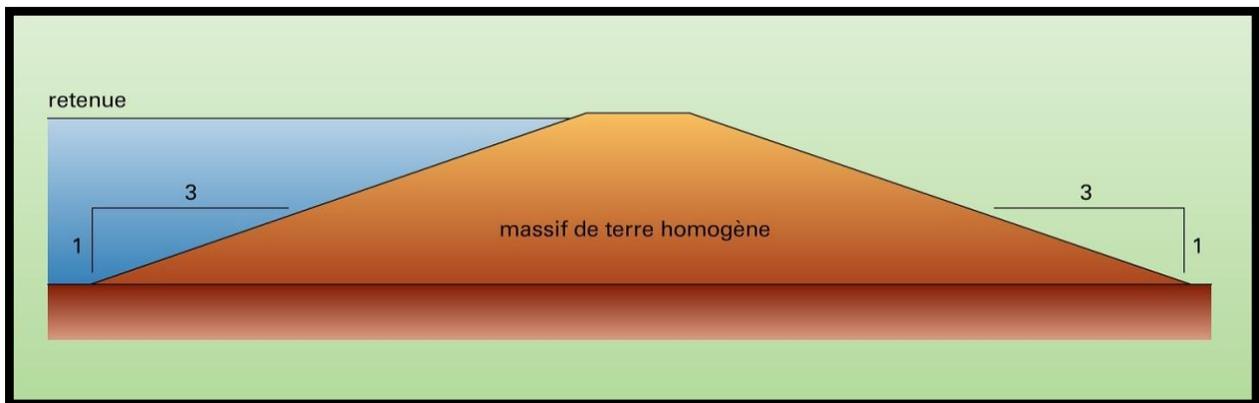


Figure II.04: coupe d'un barrage homogène (Universalis France)



Photo II.01: vue générale d'un barrage en terre homogène (the constructo.org)

2.2. BARRAGE EN TERRE HETEROGENE ZONE

Par rapport aux barrages homogènes, les barrages noyau étanche sont généralement construits dans des zones où plusieurs types de matériaux sont disponibles, tels que les argiles, les limons, les sables, les graviers et les roches.

Ce sont des barrages composés d'une zone centrale, appelée noyau, qui assure le rôle d'étanchéité. Placée au cœur du remblai, le noyau (vertical ou incliné) est constitué de matériaux argileux imperméables, et les zones extérieures sont composées d'enrochements ou en terre plus grossière. Pour se prémunir contre des phénomènes d'érosion interne et protection contre la rupture de noyau. (USBR, 2012)

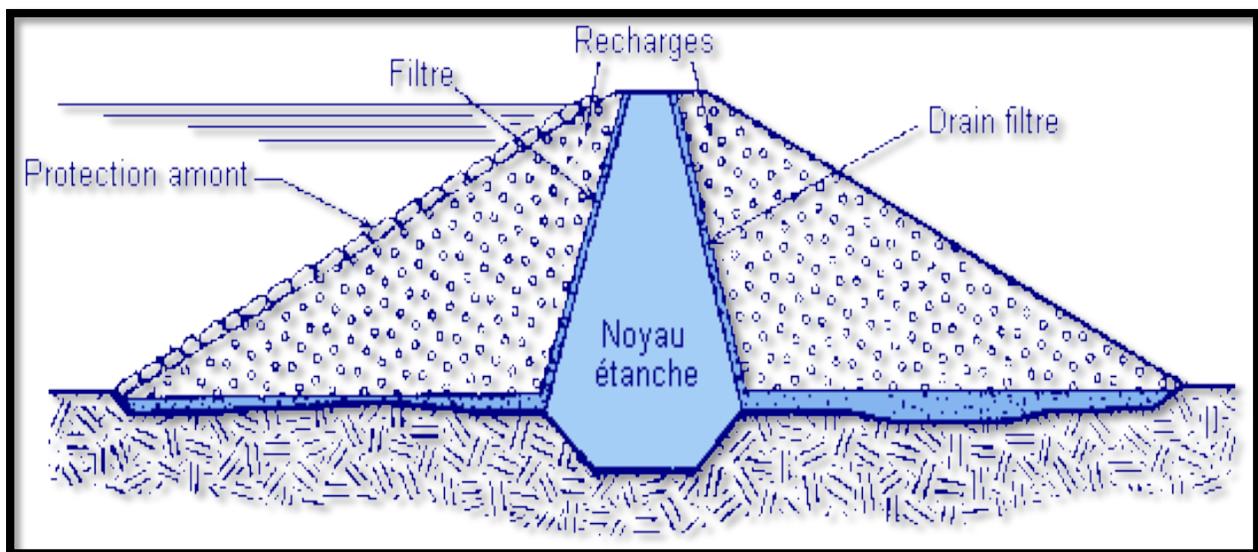
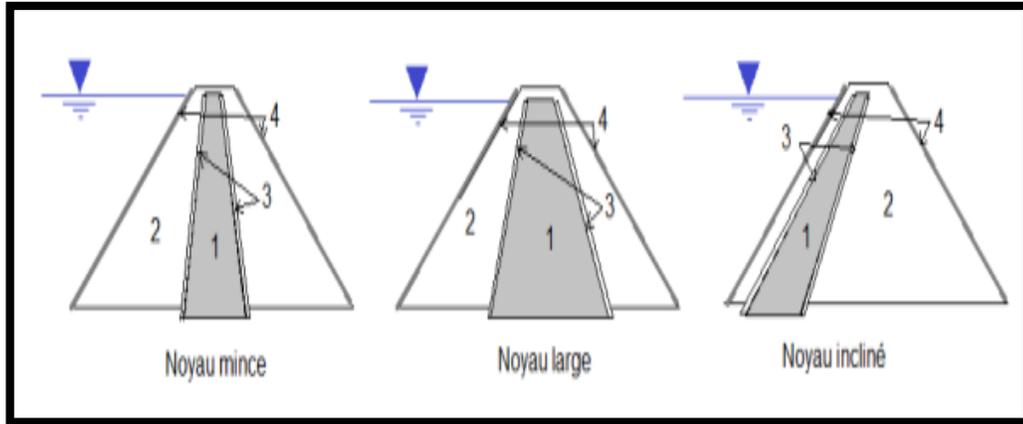


Figure II.05: coupe d'un barrage en terre noyau étanche (Assemblée nationale)

- L'épaisseur du noyau dépend (delliou, 2003) :
 - D'une largeur minimale en crête pour le passage des engins.
 - De la disponibilité des terres imperméables.
 - Du gradient hydraulique en contact avec la fondation.



1/noyau 2/recharge 3/filtre 4/riprap (protection de talus)

Figure II.06: les types de noyau dans un barrage zoné. (Delliou, 2003)



Photo II.02: barrage zoné Nurek Tajikistan 304m (Tajik Agrarian university)

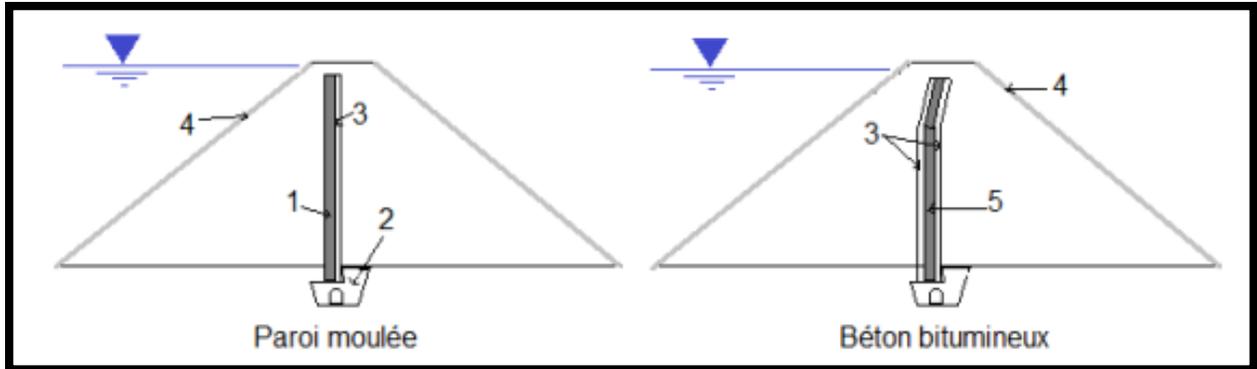
Si les différents types de sols sont disponibles, un barrage zoné sera automatiquement choisi car il est généralement supérieur en termes de stabilité et de résistance à l'infiltration et l'économie. (USB, 2012)

2.3. BARRAGE A MEMBRANE CENTRALE

Dans ce type de barrage, la plus grande partie du remblai est construite en matériau perméable (sable, gravier ou roche) et une mince membrane de matériau imperméable est placée à l'intérieur du remblai pour former une barrière à l'eau. La position de cette membrane

impermeable peut être placée sur la face amont ou dans la partie centrale, La membrane peut être constituée de béton bitumineux, de métaux, de remblais compactés ou de paroi moulée.

Deux types de membranes sont généralement mises en œuvre (figure II.07) :



1 : membrane (Bentonite + ciment) 2 : Galerie d'injection 3 : Zones de transitions 4 : Protection de surface 5 : Membrane bitumineuse

Figure II.07: barrage avec membrane central. (Delliou, 2003)

- **Béton bitumineux** : est un type de matériau de construction constitué d'un mélange de pierres et d'autres formes d'agrégats assemblés par un liant. Ce liant, appelé "bitume", est un sous-produit du raffinage du pétrole, Il a une texture dense et collante, puis forme une surface solide et dense une fois qu'il est sec, Le béton bitumineux est aussi connu sous le nom d'asphalte dans de nombreuses régions du monde.

Cette méthode est très utilisée comme une membrane centrale du fait de la flexibilité du matériau lors des tassements et du tremblement de terre.



Figure II.08: Béton bitumineux (asphalte). (Google image)

- Paroi moulée : La technique consiste à réaliser un mur en béton armé puis la bentonite après achèvement du remblai puis excavation à partir de la crête. Elle n'est applicable que pour des barrages de faibles hauteurs du fait de la rigidité des parois moulées qui crée des difficultés en cas de tassement ou de tremblement de terre. (Bouslah Soraya univannaba)

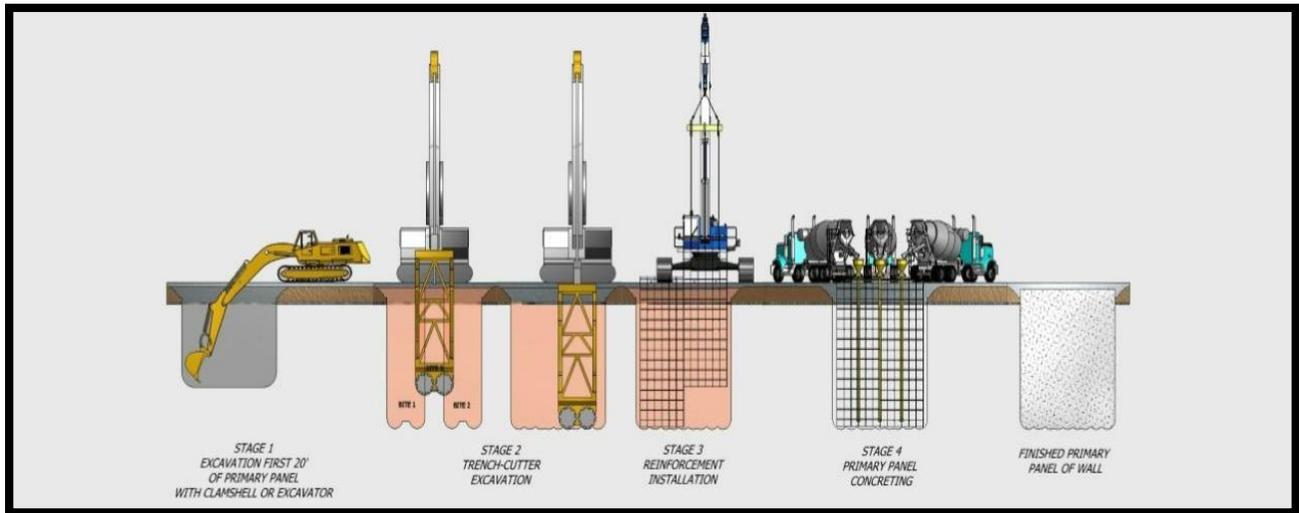


Figure II.10: technique paroi moulée. (Advanced construction techniques.com)



Photo II.04: la trancheuse (Advanced Construction techniques.com)

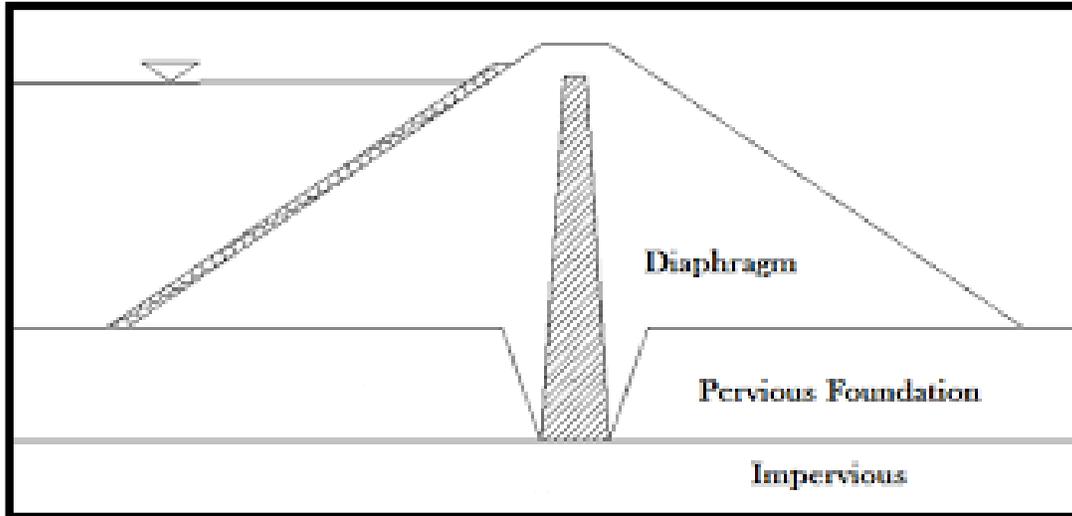


Figure II.11: coupe d'un barrage à membrane centrale. (punmia, 1992)

La solution d'un barrage avec membrane centrale est à envisager lorsque le matériau nécessaire au noyau n'est pas disponible à proximité du site.

Les membranes étanches ont l'inconvénient de ne pas être facilement accessibles pour l'inspection ou la réparation d'urgence en cas de rupture due à un défaut de matériau ou à un tassement du barrage ou fondations. (USBR2012)



Photo II.05: barrage Tieton à Washington barrage en terre avec membrane en béton armée (USBR, 2012)

2.4. BARRAGE EN ENROCHEMENT

Les barrages en enrochement sont apparus il y a plus de 100 ans. Les barrages en enrochement est un barrage qui s'appuie sur la roche compactée en couches relativement minces, en tant qu'élément structural majeur, une membrane imperméable est utilisée comme barrière à l'eau et peut être placée soit à l'intérieur du remblai, soit sur le talus en amont. Différents matériaux ont été utilisés pour cette membrane, comme le sol imperméable, le béton armé, les métaux, le béton bitumineux et le bois. (USBR, 2012)

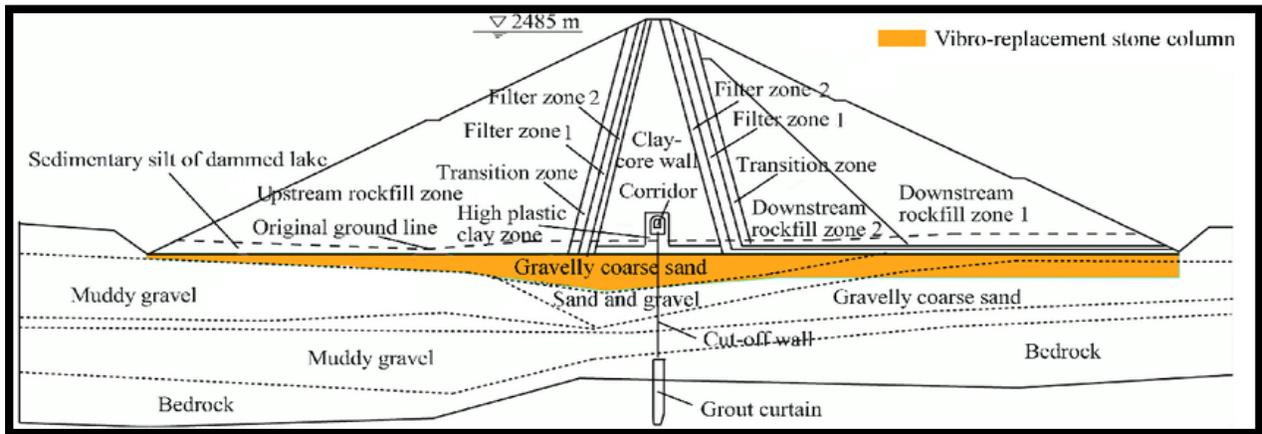


Figure II.12: coupe d'un barrage en enrochement. (Sihong Liu, 2012)

Les barrages en enrochement peuvent être classés en trois groupes, en fonction de l'emplacement de la membrane, comme suit : (1) noyau central, (2) noyau incliné et (3) masque amont

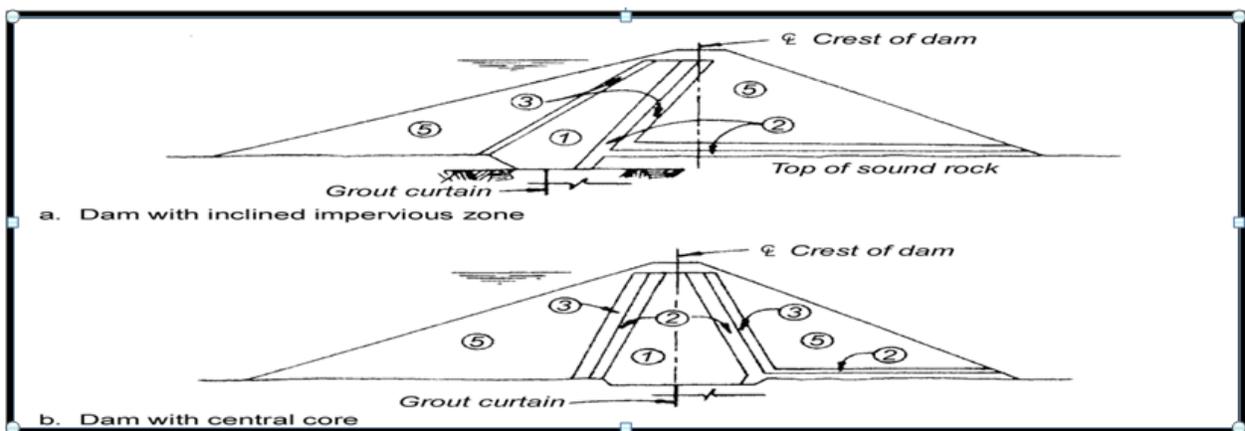


Figure II. 13: coupe d'un barrage en enrochement avec (a) membrane inclinée et (b) centrale. (dept.of the army. usa ,1982)

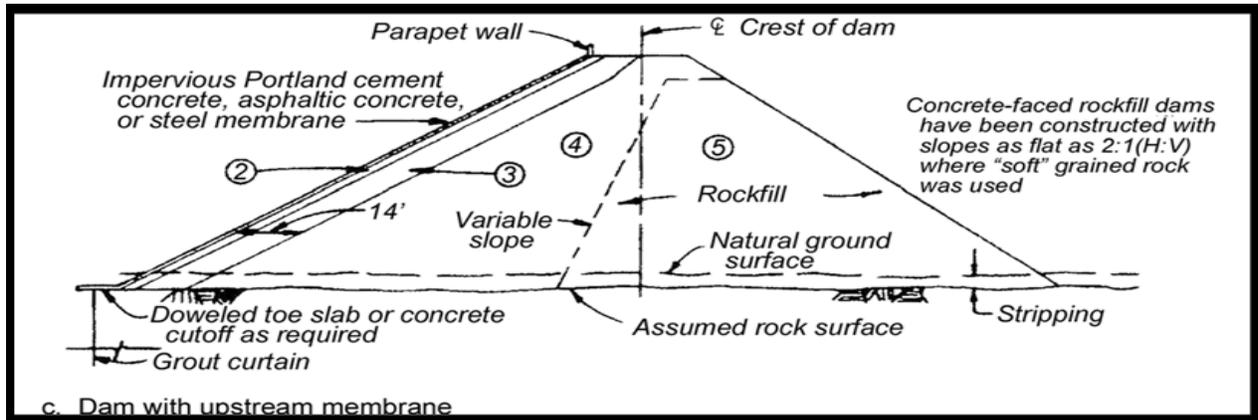


Figure II.14: coupe d'un barrage en enrochement avec masque amont (USBR, 1977)

- (1) matériau imperméable(2) filtre(3) roche compacté(4) roche de petite taille(5) roche de bonne qualité et dure compacté

La construction des barrages en enrochement a augmenté depuis 1960 et cette augmentation est attribuée à l'utilisation de sites plus éloignés, à d'extraction et de mise en place plus économiques, à l'utilisation de matériaux d'excavation dans des zones variées, à de meilleurs détails de conception, à une meilleure connaissance générale des enrochements.

D'autres facteurs peuvent rendre l'utilisation d'un barrage en enrochement bénéfique :

- La possibilité de placer des enrochements tout au long de l'hiver dans les régions froides,
- La possibilité d'injecter des mortiers dans la fondation simultanément à la mise en place du remblai, et un degré élevé de stabilité sismique. (USBR 2012)



Photo II.06: barrage en enrochement Ulla-Forre, Norvège (Martin NH)

2.4.1. BARRAGE A MASQUE AMONT

Il est généralement formé par un massif en enrochement qui assure la fonction de stabilité. L'étanchéité est obtenue par une couche appelée masque, posée à l'amont du massif. Le masque est étanche sur toute sa surface. (CFBR ,2012)

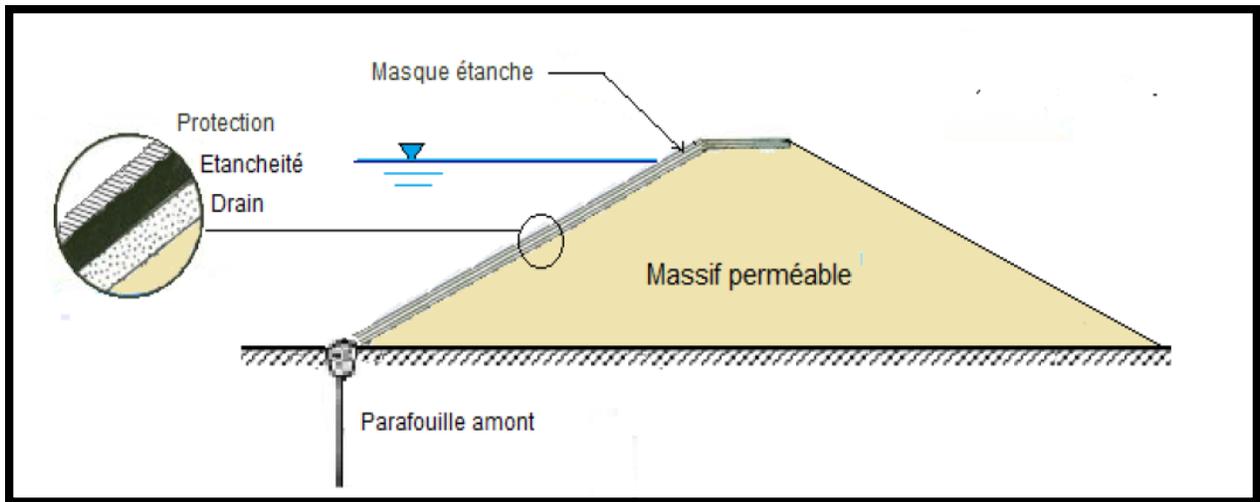


Figure II.15: barrage en enrochement (Boukezzi)

Le masque lui-même peut être réalisé :

- Par une dalle de béton armé coulée par plots successifs sur toute la surface du parement amont (figure)

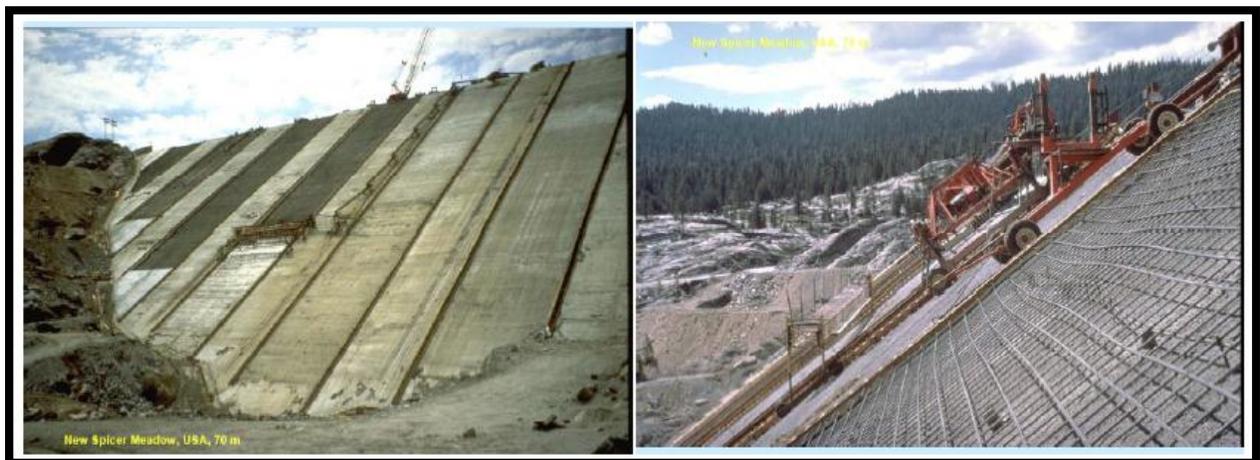


Photo II.07: Masque en béton armé (barrage New Spicer Meadow, USA)

- Par une ou des couches de béton bitumineux mises en place par des engins routiers adaptés. (figure)



Photo II.08: barrage de Monne (CFBR, 2012)

- Par des géomembranes (typiquement des feuilles de PVC de forte épaisseur) livrées en lés et soudées les unes aux autres. Les feuilles sont posées sur une couche de transition en matériau fin (pour éviter de déchirer la membrane qui s'appuierait directement sur les enrochements) et protégées par des dalles ou des pavés (figure)



Photo II.09: Pose de géomembrane (barrage de Sar Cheshmeh, Iran)

La conception et la construction des barrages en enrochement à masque amont à améliorées au cours des 40 dernières années. Ce type de barrage s'est prouvé d'être une structure sûre à long terme et est bien adapté pour résister aux charges géodynamique.

Les barrages à masque amont peuvent offrir une alternative avantageuse dans les vallées larges et profonde par rapport à d'autres types de barrage en terre et en béton. (GHD experience, 2016)

CHAPITRE III

LES CAUSES

D'INSTABILITE DES

BARRAGES EN TERRE

1. INTRODUCTION

Les barrages en terre sont les plus utilisés dans le monde, pour le stockage d'eau et la lutte contre les inondations. Cependant, malgré leur utilisation répandue, ils peuvent être susceptibles à la rupture, comme la plupart des ouvrages d'art, Ce qui peut avoir des conséquences désastreuses. Les causes de rupture des barrages en terre sont nombreuses et peuvent inclure une mauvaise conception, des matériaux de construction inadéquats, des techniques de construction inappropriées, un mauvais entretien et des catastrophes naturelles telles que des tremblements de terre.

Ces ruptures peuvent avoir des conséquences catastrophiques telles que les effondrements de barrages, des inondations, des dégât matériels et humains. Dans ce chapitre, on essaye de contribuer à éclaircir certains phénomènes relatifs à la stabilité des barrages en terre.

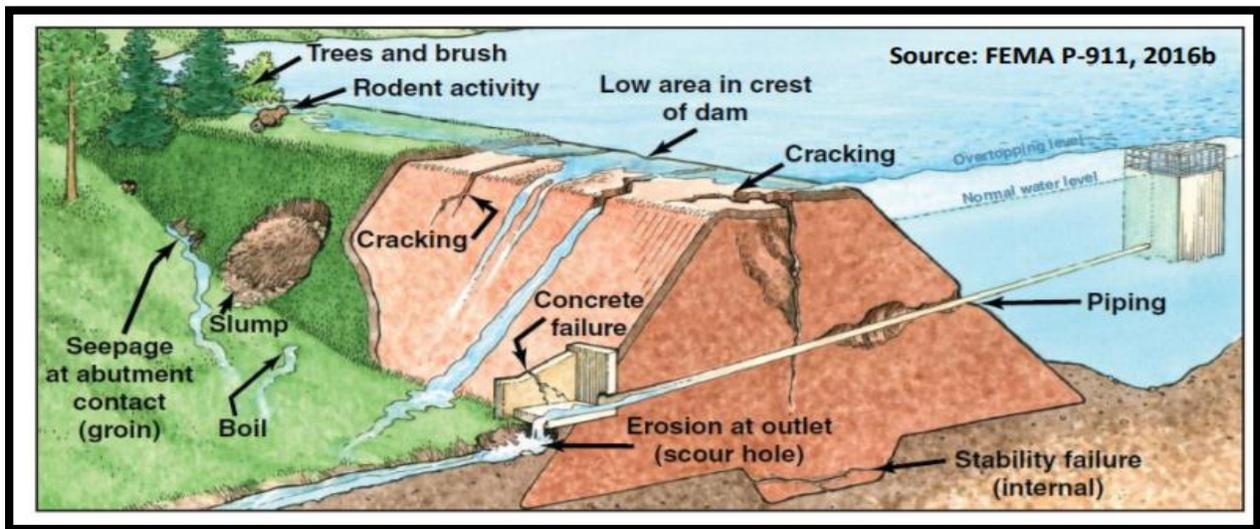


Figure III01: les différentes causes de rupture des barrages en terre (FEMA, 2016)

2. LES CAUSES DE RUPTURE DES BARRAGES EN TERRE

Les barrages en remblais, constitués principalement de matériaux d'enrochement et de la terre, donc ils sont moins rigides et plus susceptibles à la rupture, il s'agit de structures complexes à évaluer en raison de problèmes tels que l'infiltration d'eau, les problèmes d'érosion et la résistance des sols.

Chaque rupture passée de ce type de barrage a contribué à l'amélioration des connaissances sur la construction des barrages en terre.

- **Définition du mot rupture :** La fonction principale d'un barrage ou d'une digue est de retenir l'eau. En conséquence, à l'instar de la CIGB, la perte de cette fonction principale est appelée rupture. Tout mouvement du remblai ou de ses ouvrages annexes, engendrant une incapacité à contenir la masse d'eau, est considéré comme une rupture. Nous l'étendons également à des ruptures en d'autres situations telles que la fin de construction. (CIGB)

3. CLASSIFICATION DES RUPTURES DES BARRAGES EN TERRE

Les ruptures des barrages en terre peuvent être classées en trois catégories générales (Garg 2011) :

- I. Rupture hydraulique (érosion externe)
- II. Rupture d'infiltration d'eau (érosion interne)
- III. Rupture structurale

Tableau III.01: répartition des ruptures des barrages selon le type (FOSTER, 2000)

Mode de rupture des barrages	Erosion externe	Erosion interne	Instabilité au glissement (y compris liquéfaction)
% des ruptures dans le monde	48%	46%	6%

3.1. RUPTURE HYDRAULIQUE (EROSION EXTERNE)

Les ruptures hydrauliques sont dues à l'action érosive de l'eau sur et à côté de la digue.

Les ruptures hydrauliques peuvent être liées directement ou indirectement aux éléments suivants:

3.1.1. LA SUBMERSION

La submersion se produit lorsque le niveau de l'eau dépasse la hauteur de la crête du barrage, ce qui provoque un débordement. L'érosion de la crête du barrage se produit et enlève des quantités massives de matériaux, Ces matériaux constituent le poids qui maintient le barrage en place contre les forces hydrauliques qui agissent pour niveler le barrage. (k.Garg 2011)

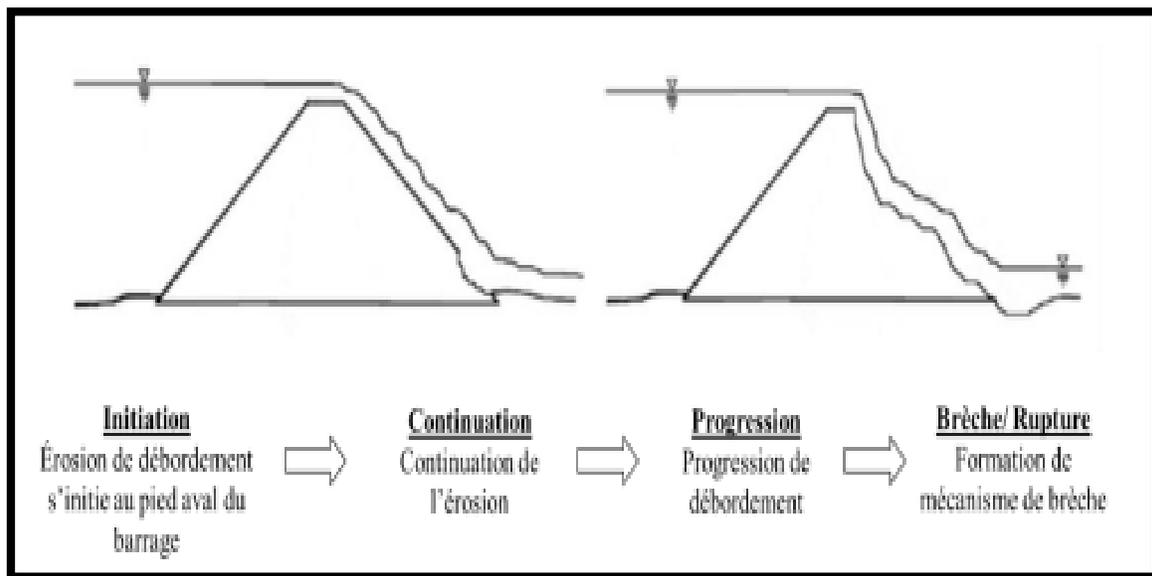


Figure III02: la submersion d'un barrage en terre (Bouziane, 2020)

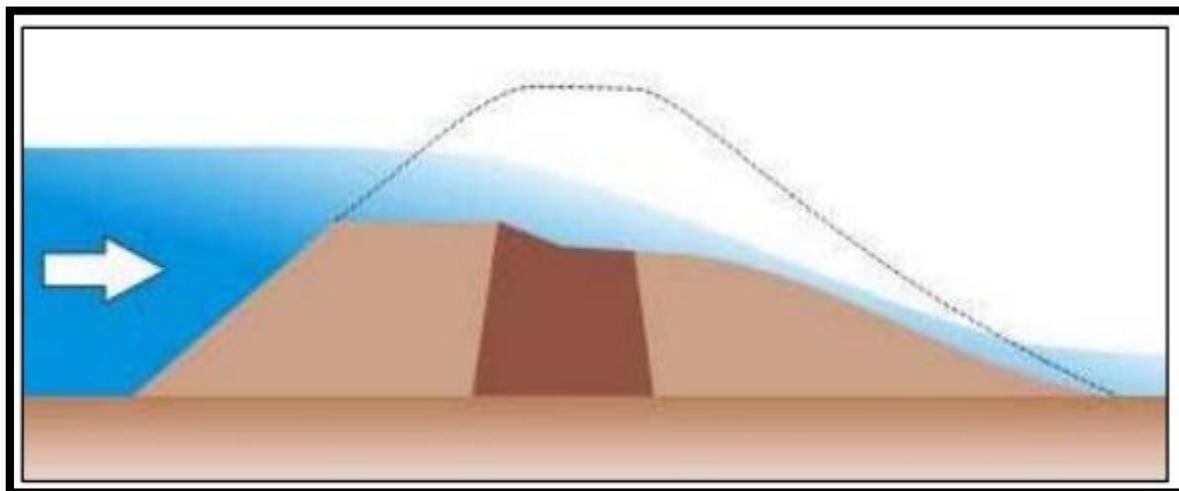


Figure III03: la submersion du barrage conduit à la rupture complète. (Arabtraining.com)

La plupart des barrages débordent en raison de niveaux d'eau élevés et de fortes pluies. La capacité de leur déversoir peut être insuffisante par rapport au niveau d'eau qui se produit. Si l'évacuateur de crues est, conçu que pour absorber un faible pourcentage du débit de crues maximale probable (CMP) de la zone, un événement météorologique extrême peut provoquer le débordement du barrage. (ASDSO)



Photo III.01: la rupture du barrage Glashutte- Allemagne par submersion (ASDSO)

Il est important d'avoir une revanche adéquate pour garantir la sécurité et la stabilité du barrage, car une revanche insuffisante peut augmenter le risque de surverse, ce qui peut entraîner une érosion, et la rupture du barrage.

3.1.2. ÉROSION DE LA FACE AMONT

L'érosion par les vagues peut constituer un problème important pour les digues en terre. Lorsque les vagues s'écrasent contre la digue, elles peuvent provoquer une érosion en transportant les particules de sol, ce qui peut affaiblir la structure et, finalement, la rupture du barrage.

Les vagues se développent près de la surface de l'eau en raison des vents, généralement une surface importante en amont est suffisante pour développer des vagues.

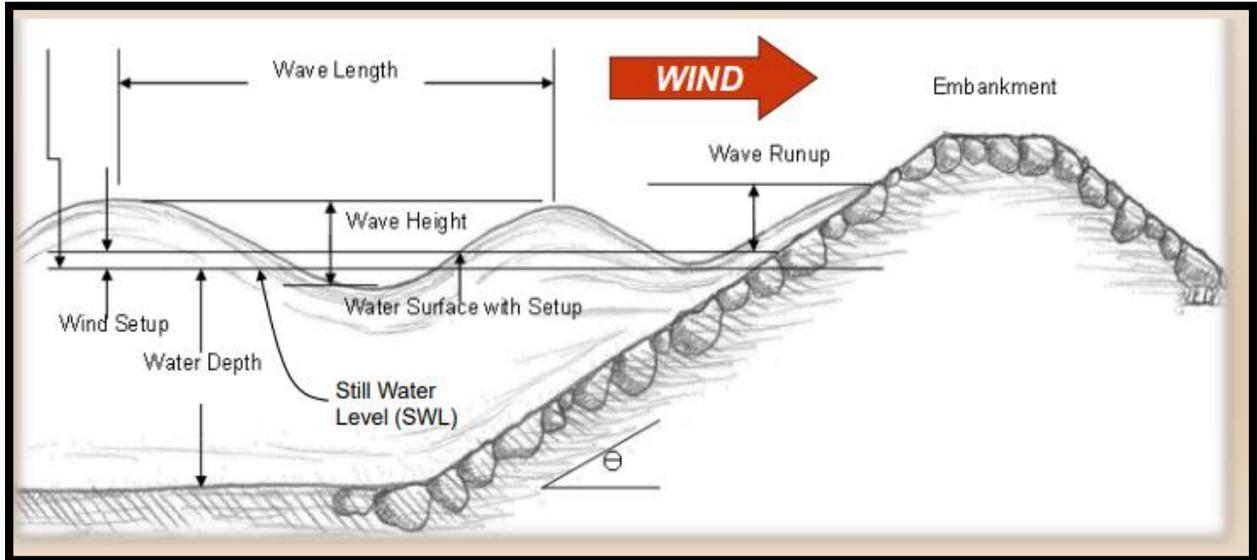


Figure III.04: le développement des vagues à cause du vent (USBR, 2012)

Plusieurs facteurs peuvent contribuer à l'ampleur de l'érosion par les vagues sur une digue en terre, notamment la taille et la fréquence des vagues, la résistance du matériau de la digue, ainsi que la pente et l'angle de la digue. Par exemple, un remblai avec une pente abrupte est plus susceptible à l'érosion par les vagues qu'un remblai avec une pente plus douce, car les vagues sont plus susceptibles de se briser contre la structure.



Photo III.02: érosion de la face amont par les vagues (the constructor.org)

Pour prévenir l'érosion par les vagues, diverses stratégies peuvent être utilisées, telles que l'utilisation du riprap qui peut être renforcé, en enrochement, constitué d'un mélange sol-ciment

et ou en béton dans la face amont, On peut aussi choisir le site de réalisation de sorte qu'il soit protégé du vent et diminuer ainsi l'effet des vagues.

3.1.3. RUPTURE PAR L'ACTION DU GEL-DEGEL

Les structures de génie civil peuvent être affectées de l'impact du climat de différentes manières. Le gel dans le sol peut provoquer un gonflement et une réduction de la capacité portante au moment du dégel. Une structure exposée à des processus répétés de gel et de dégel peut subir des changements dans son volume et sa structure, affectant ainsi des propriétés telles que la résistance, la compressibilité ou la conductivité hydraulique. (Viklander, 1997).

L'action du gel-dégel peut avoir un impact significatif sur les barrages en terre, en particulier dans les zones où les températures fluctuent autour de 0degré.

Les fluctuations les plus significatives sont les fluctuations diurnes et nocturnes. Lorsque l'eau dans le sol gèle, elle se dilate et peut provoquer la fissuration et l'affaiblissement de la structure, ce qui peut provoquer l'infiltration d'eau à travers la digue et finalement la rupture du barrage.

La figure suivante montre l'effet du gel-dégel dans les terrains naturels.

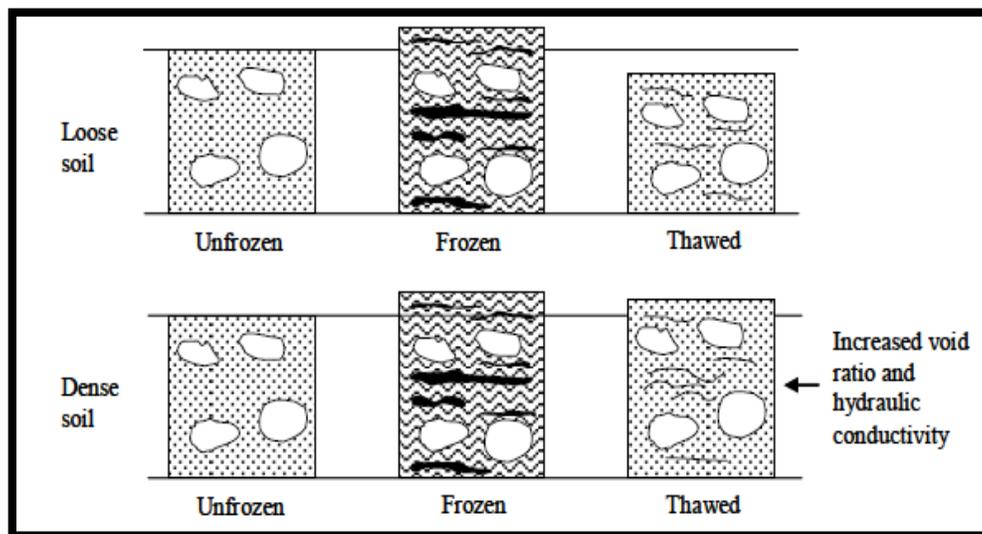


Figure III.05: l'action du gél - dégel dans le sol. (Viklander, 1997)

Dans un barrage en terre, les effets du gel -dégel peuvent être particulièrement prononcés dans les couches exposées. Où l'eau est plus susceptible de s'accumuler et de geler. Au fil du temps, cela peut conduire à la formation de lentilles de glace, qui peuvent causer des fissures supplémentaires et la déstabilisation du sol.



Figure III.06: fissure provoqué par le gel - dégel (Jantzer, 2005)

Pour prévenir les effets du gel et du dégel sur les barrages en terre, diverses stratégies peuvent être employées. Par exemple, l'utilisation de systèmes de drainage peut aider à éliminer l'excès d'eau et l'empêcher de geler. De plus, l'utilisation de matériaux isolants, tels que des géotextiles ou du gravier, peut aider à protéger les couches exposées contre les fluctuations de température.

3.1.4. ÉROSION DU PIED AVAL

L'érosion du pied aval des barrages en terre est un problème courant qui peut entraîner une perte de stabilité de la structure. Elle se produit lorsque l'eau s'écoule au pied du barrage et érode le sol, créant une tranchée ou une fosse qui affaiblit la fondation.

L'érosion du pied aval est souvent causée par un débordement de l'évacuateur de crue ou par une infiltration d'eau à travers la digue du barrage. Elle peut également être causée par une mauvaise conception ou construction du barrage, notamment en ce qui concerne la protection contre l'érosion et la gestion des eaux de ruissellement. (Garg, 2011)



Photo III.03: érosion du pied aval due au débordement de l'évacuateur de crue (The constructor.org)

Pour éviter ce problème, il faut mettre en place un enrochement sur la face aval du barrage, est pour éviter le débordement du déversoir, les parois latérales du déversoir doivent être construites avec une hauteur et une longueur suffisantes. (Kiran Yarrakula)



Photo III.04: protection du parement aval (USBR, 2012)

3.1.5. ÉROSION DE LA FACE AVAL PAR LA FORMATION DES RAVINS

Lorsque la face aval du barrage est soumise à de fortes pluies, l'eau de pluie ou de ruissellement s'écoule à grande vitesse vers le bas, ce qui provoque l'érosion du sol sur la face aval et peut également conduire à la formation des ravins.

L'érosion par les ravins sur le côté aval d'un barrage en terre peut menacer sa stabilité et son intégrité. En s'approfondissant et en s'élargissant, les ravins peuvent éroder les fondations du barrage, ce qui risque de provoquer sa rupture. L'érosion peut exposer le matériau de base ou les couches de protection, réduisant ainsi leur efficacité de prévention.

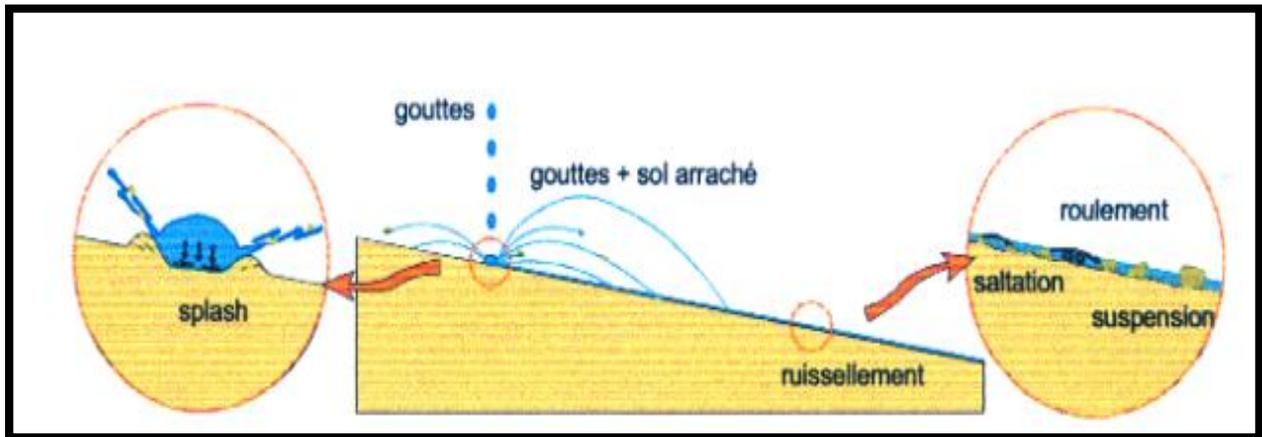


Figure III.07: battance (splash) et ruissèlement (Bradford et Blanchar, 1997)



Photo III.05: formation des ravins à cause des ruissèlements (The constructor.org)

Ce phénomène peut être évité en installant des bermes sur la face aval à des hauteurs appropriées. Des installations de drainage doivent être prévues au niveau de ces bermes afin que les eaux de ruissellement soient collectées avant d'atteindre une vitesse de descente élevée, ce qui permet d'éliminer l'érosion.

La végétation ou l'enrochement de la face aval permet également d'éviter l'érosion due au ruissellement. Il est également important d'inspecter et de remplir les ravins ou les coupes avec de la terre neuve de temps en temps pendant les saisons des pluies. (Richard.K.Frivert)

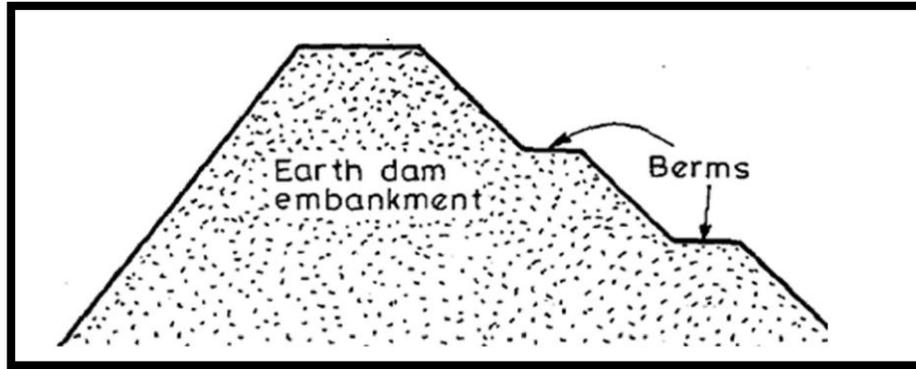


Figure III08: les bermes (Garg, 2011)



Photo III06: rip-rap + bermes dans la face aval (Civil engineering blog)

3.2. LES RUPTURES D'INFILTRATION (EROSION INTERNE)

D'après l'historique des ruptures de barrages en terre au dix-neuvième et vingtième siècles. et du vingtième siècle, il est probable que les ruptures d'érosion interne dans les barrages se soient produites depuis que les premiers barrages ont été construits. (Richard & Reddy 2007)

Selon Foster et al. (2000), Wan et Fell, et Zhang et al. (2009), 46% des dégâts observés sur les ouvrages en terre proviennent de l'érosion interne.

L'érosion interne est l'une des principales causes de rupture des barrages et l'un des mécanismes de rupture potentiels les plus difficiles à prévoir. Une infiltration contrôlée ou uniforme limitée est inévitable dans tous les barrages en terre et, en général, elle ne produit

aucun danger. Mais on ne sait pas quand elles se produisent et quel chemin elles prendront. Beaucoup de ces chemins peuvent ne jamais être vus ou détectés pendant la durée de vie d'un barrage. Le véritable problème commence lorsque l'infiltration commence à arracher et à déplacer des particules de sol d'un endroit à un autre dans ce que l'on appelle l'érosion interne.

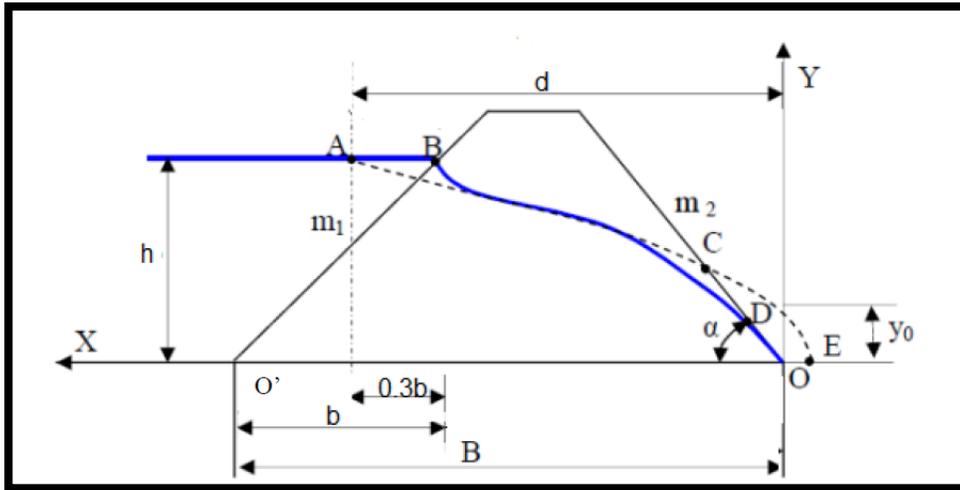


Figure III.09: ligne de saturation dans un barrage homogène sans drain (Boukezzi)

- Ligne de saturation : La ligne de saturation est une ligne suivant laquelle la pression à l'intérieur du massif est égale à la pression atmosphérique, elle sépare la zone humide de la zone sèche.

3.2.1. MECANISMES D'ÉROSION INTERNE

Le processus entier de l'érosion interne peut survenir selon quatre processus d'initiation (ASDSO 2015) :

- a) La suffusion
- b) Erosion de contact entre deux sols
- c) Erosion de trou
- d) La Boulance
- e) L'érosion régressive
- f) Renard hydraulique

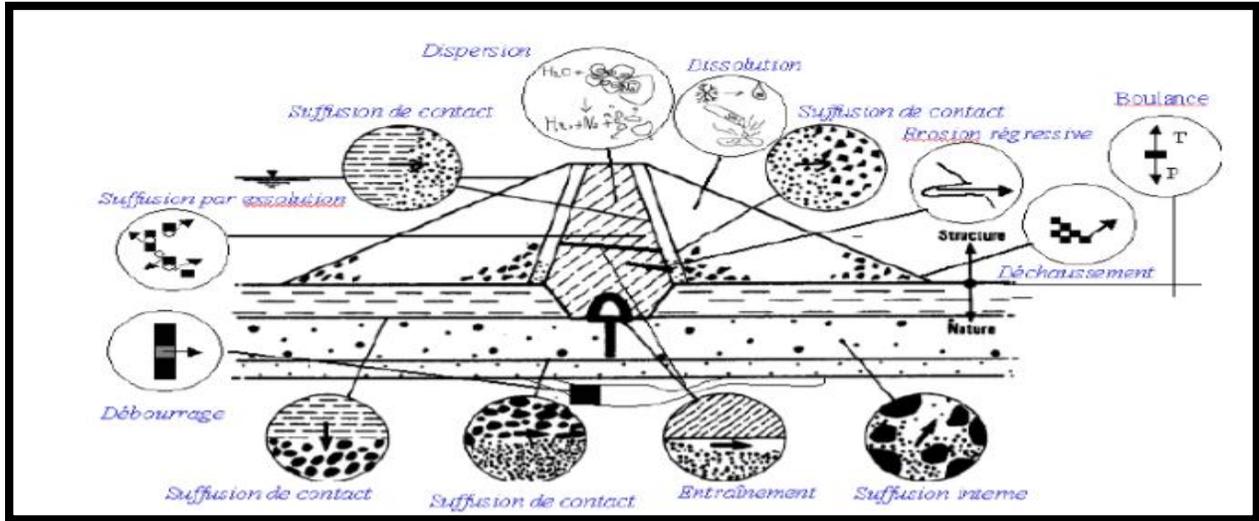


Figure III.10: schéma représentatif des divers phénomènes initiateur de l'érosion dans un barrage (Schuler et Brauns, 1996)

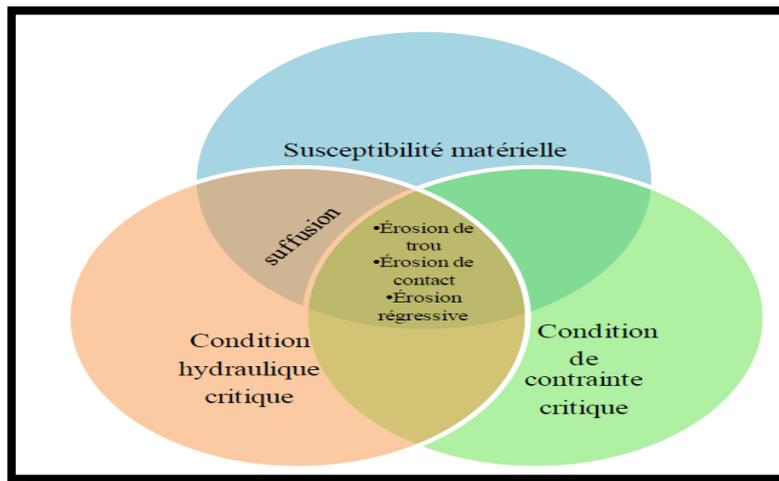


Figure III.11: les facteurs affectant l'initiation de l'érosion interne (Bouziane, 2020)



Photo III.07: le piézomètre pour mesuré la charge hydraulique

3.2.1.1. LA SUFFUSION

La suffusion est la forme d'érosion interne dans laquelle la matrice grossière d'un sol ne satisfait pas la condition d'autofiltration. Par conséquent, les particules fines sont éliminées par les vides entre les particules grossières. Le sol est donc considéré intérieurement instable.

3.2.1.2. ÉROSION DE CONTACT ENTRE DEUX SOLS

Ce type d'érosion interne se manifeste à l'interface d'un matériau fin en contact avec un matériau grossier. L'écoulement étant parallèle au plan contact, il érode les particules fines dans et à travers le sol grossier. Ce processus affecte généralement la surface de contact fondation-digue.

3.2.1.3. ÉROSION DE TROU

D'après Sherard (1979). Ce mode d'érosion interne se produit par un écoulement concentré dans une fissure au sein d'un ouvrage en terre. Lorsqu'elle apparaît une fissure par laquelle s'écoule de l'eau, cette dernière érode les parois de cette fissure et conduit à la formation d'un trou. L'apparition des fissures dans les ouvrages en terre peut être due à plusieurs causes telles que les tassements différentiels, compactage insuffisant des matériaux et la dessiccation. (Bouziane 2020)

3.2.1.4. LA BOULANCE

La boullance est un phénomène qui apparaît principalement dans les sols pulvérulents, lorsque le gradient hydraulique dû à un écoulement d'eau est vertical ascendant. Il s'agit d'un phénomène d'instabilité générale. Sous l'influence de l'écoulement, le sol vient à se comporter comme un liquide. En effet, lorsque la pression de l'eau sur le sol est suffisante pour compenser le poids déjaugé des particules, la contrainte effective entre grains s'annule et les particules de sol flottent dans une phase liquide continue. (Dr.mouici)

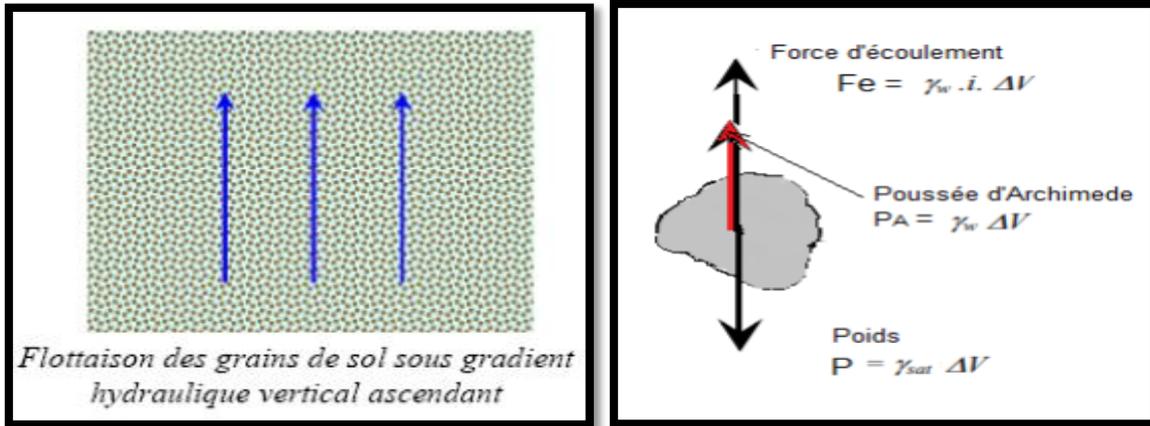


Figure III.12: phénomène de boullance. (Dr.mouici)

3.2.1.5. L'ÉROSION REGRESSIVE

L'érosion régressive est le phénomène d'arrachement des particules de sol une à une, sous l'effet de la pression du fluide qui percole à travers le remblai. Ce processus apparaît d'abord à l'aval de l'ouvrage pour se propager ensuite vers l'amont. Il y a alors formation d'un renard hydraulique. (Dr.mouici).

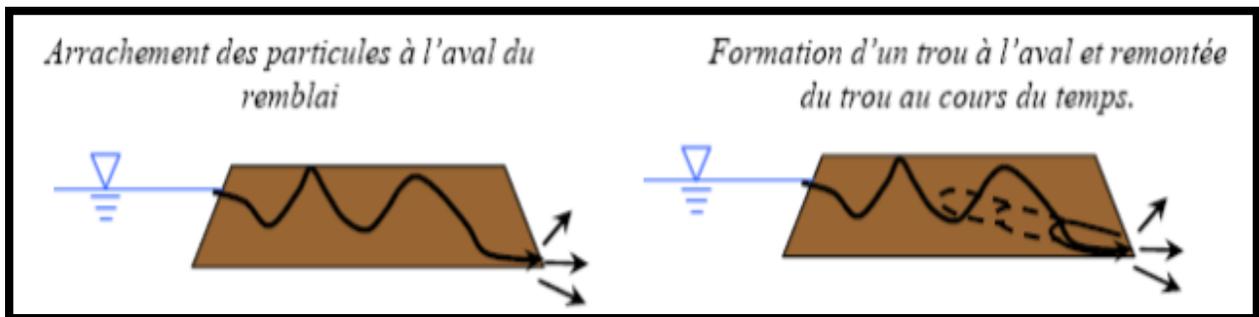


Figure III.13: phénomène d'érosion régressive. (Dr.mouici)

3.2.1.6. RENARD HYDRAULIQUE

Le renard hydraulique appelé piping en anglais est un processus d'érosion interne qui se produit avec l'augmentation des vitesses d'écoulement de l'eau sous une fondation ou un remblai ou à travers la digue. L'eau atteint localement des vitesses susceptibles d'entraîner progressivement les éléments les plus fins du sol et augmente ainsi le débit. Progressivement des éléments plus gros sont entraînés, l'arrachement des particules progresse vers l'amont générant

un conduit depuis l'aval, est progressé jusqu'à l'amont, l'eau s'engouffre et désorganise le sol. (DESODT, 2016)

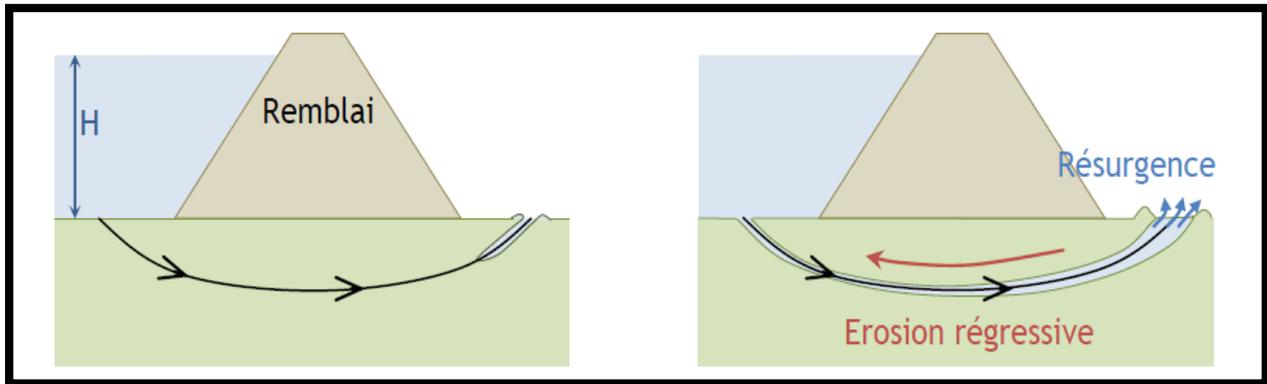


Figure III.14: phénomène de renard (DESODT, 2016)

Le phénomène de renard peut avoir lieu :

A/ A TRAVERS LES FONDATIONS

Parfois, lorsque des cavités ou des fissures très perméables ou des strates de sable grossier ou de gravier sont présentes dans les fondations du barrage, l'eau peut commencer à s'infiltrer à grande vitesse à travers ces ouvertures. ce qui finit par créer des cavités sous les fondations. La digue peut s'effondrer dans la cavité ainsi formée, provoquant sa rupture. (Garg, 2011)

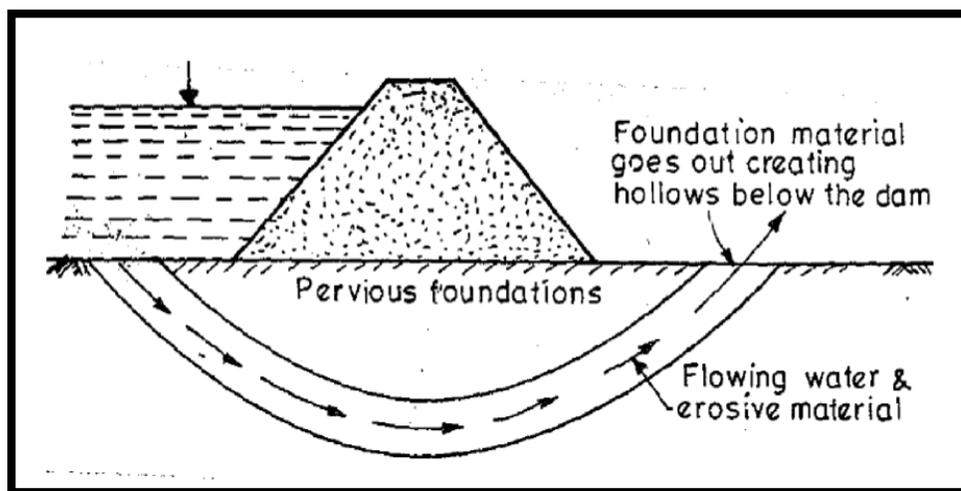


Figure III.16: renard à travers les fondations (Garg, 2011)

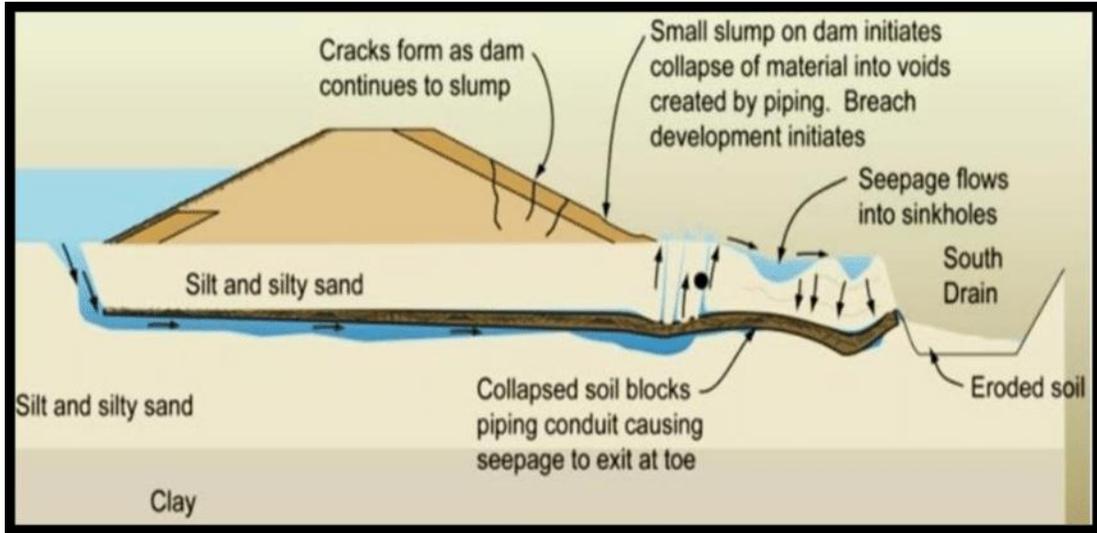


Figure III.17: renard à travers les fondations et ces conséquences



Amont



aval

Photo III.08: rupture du barrage Big Bay Mississippi, 2004 par renard à travers les fondations (Ferguson et al 2014)

B/ A TRAVERS LA DIGUE

Lorsque les canaux d'écoulement concentrés se développent dans le corps du barrage, le sol peut être enlevé de la même manière que dans le renard de fondation, ce qui provoque la formation de cavités dans le corps de la digue et l'affaissement ultérieur de la digue. (Garg, 2011)

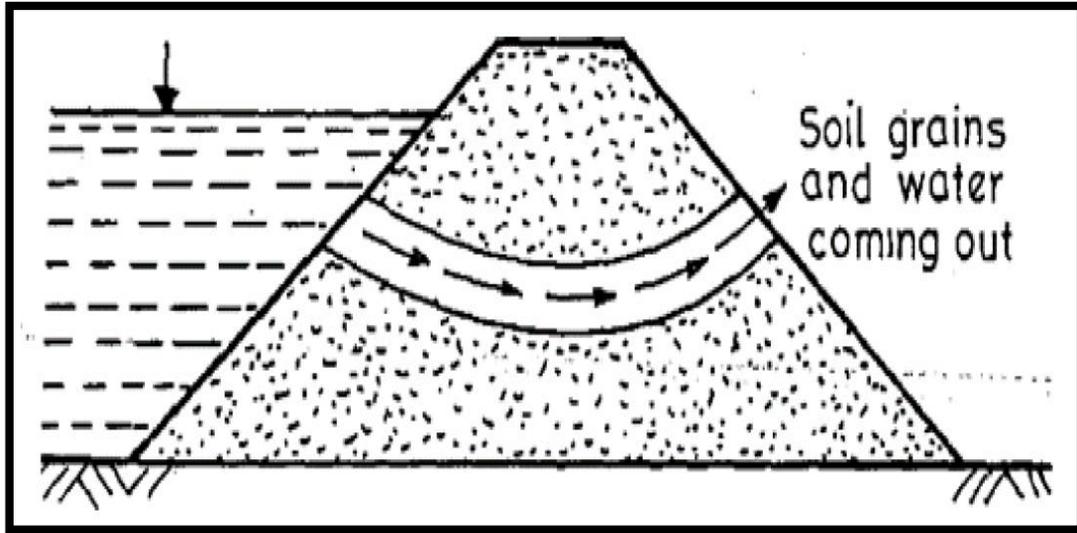


Figure III.18: renard à travers la digue (Garg, 2011)

Le phénomène de renard difficilement détectable et à évolution très rapide, et ces conséquence est la rupture du barrage par ouverture d'une brèche soit par effondrement de l'ouvrage avec submersion.

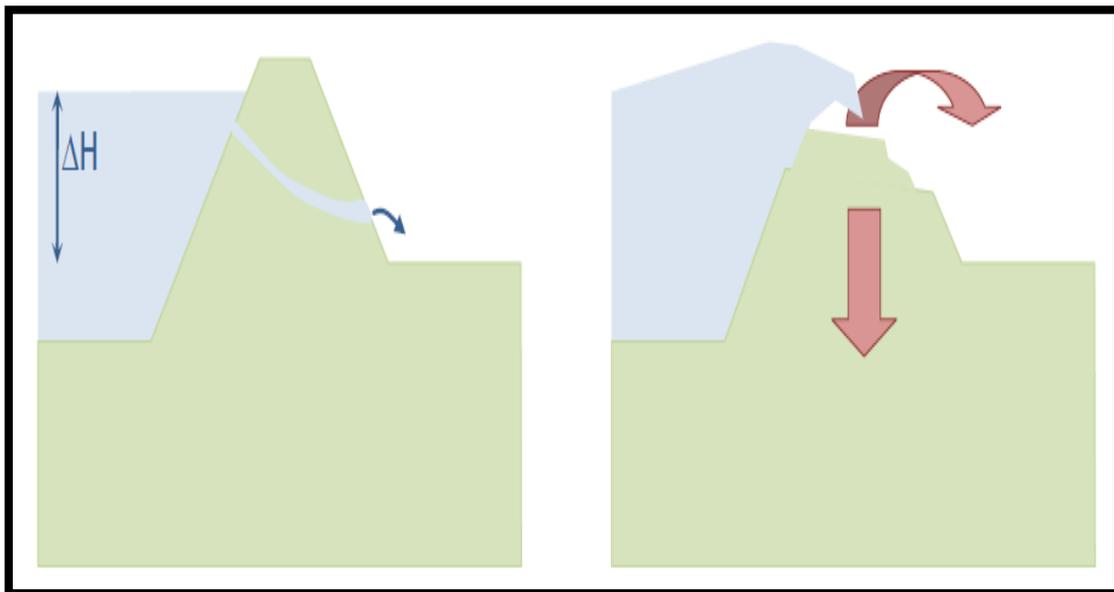


Figure III.19: rupture du barrage par submersion à cause d'un renard (DESODT, 2016)

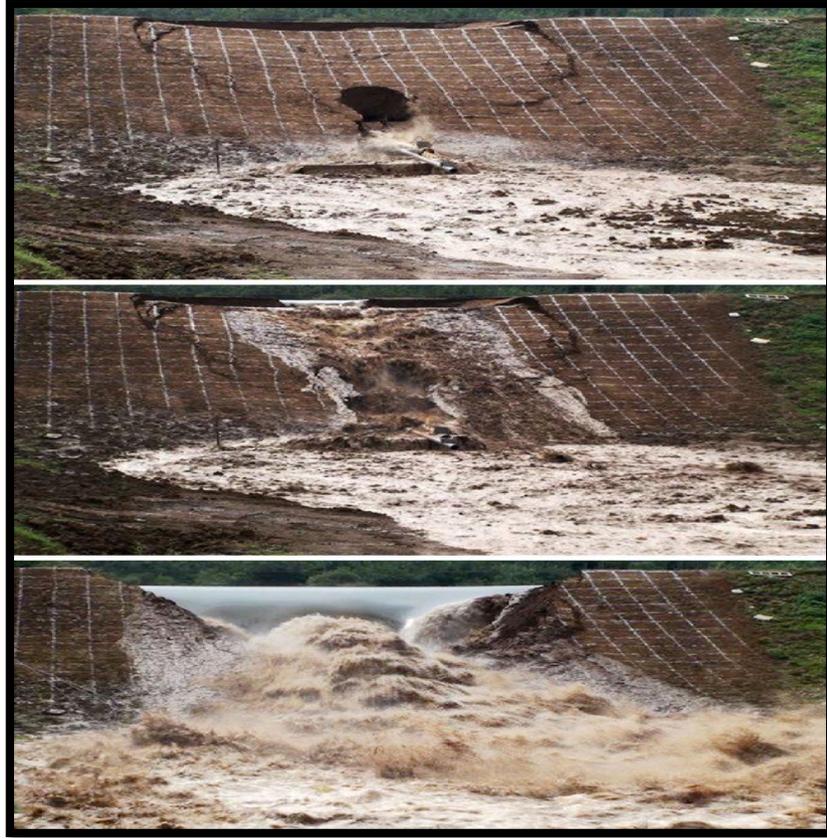


Photo III.09: submersion à cause d'un renard (Mahesh Prakash, 2009)

La longueur d'écoulement est un paramètre important dans l'apparition du renard hydraulique, la longueur de l'écoulement est directement liée au gradient hydraulique. Un des moyens de se prémunir de l'érosion interne par renard est d'augmenter la longueur de l'écoulement, diminuant les gradients hydrauliques et éloignant les risques d'atteindre une valeur critique du gradient hydraulique. Plusieurs dispositifs sont susceptibles d'être mis en œuvre (DESODT, 2011) :

- un tapis de matériaux imperméables en amont,
- des barrières verticales étanches sous le barrage pour détournent l'écoulement,
- un tapis drainant et un filtre en aval maintiennent les grains, est empêche le soulèvement des grains,
- Toujours en aval, un puits de décharge permet une mise à la pression atmosphérique de la couche perméable annulant les éventuels forts gradients.

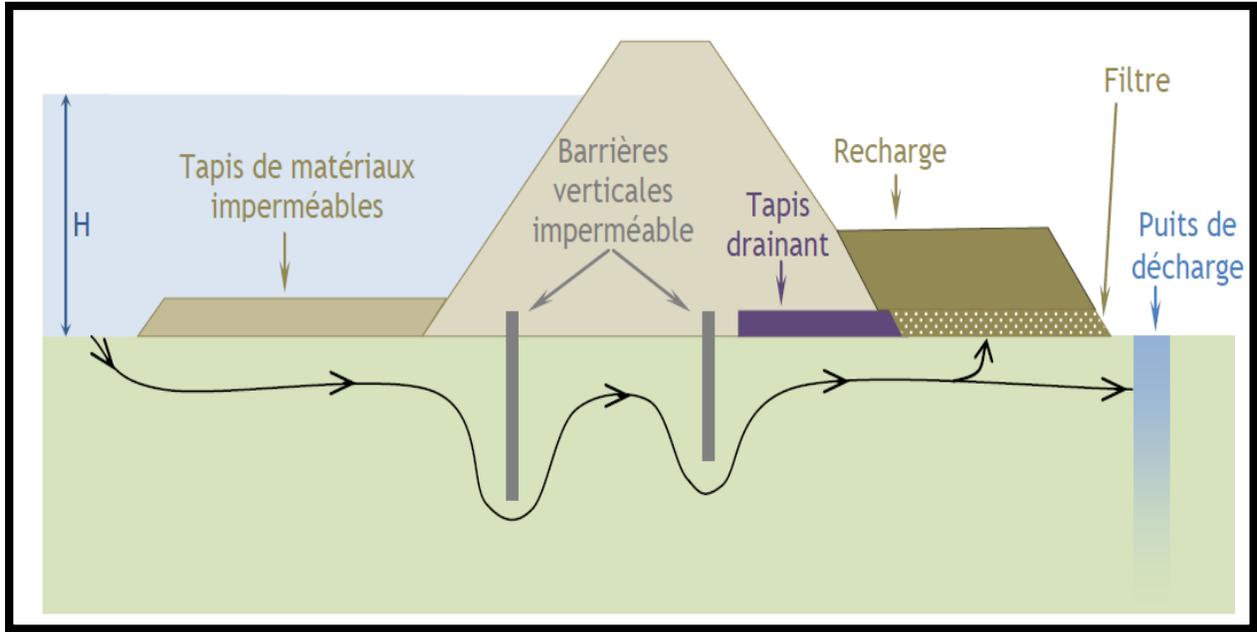


Figure III.20:Dispositif de réduction d'érosion interne (DESODT, 2016)

3.3. RUPTURE STRUCTURALE

Les ruptures structurales du barrage ou de ses fondations représentent environ un cinquième du nombre total de ruptures. Les ruptures structurales sont généralement dues à des ruptures par cisaillement, qui provoquent des glissements.

3.3.1. GLISSEMENT DE FONDATION

Lorsque les fondations des barrages en terre sont constituées de matériaux fins, tels que le limon, l'argile, etc., le barrage entier peut glisser sur les fondations.

Parfois, des couches de roches fissurées, de schiste ou d'argile molle, peuvent exister sous la fondation, et le barrage peut glisser sur certains d'entre eux, entraînant sa rupture. Dans ce type de rupture, la crête de la digue se fissure et s'affaisse, la pente inférieure se déplace vers l'extérieur en formant de grandes vagues de boue près du pied. (Voir figure)

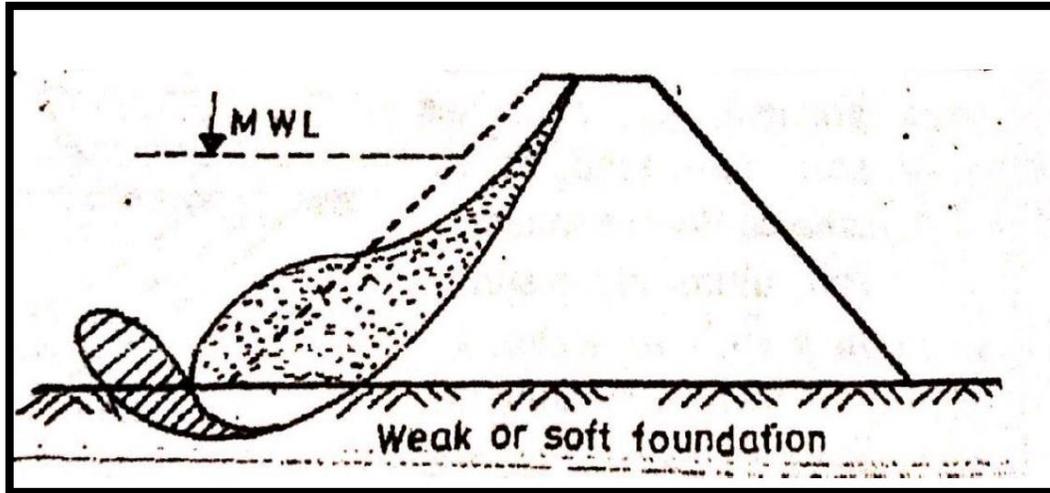


Figure III.21: glissement de fondation (Garg, 2011)

Tableau III.02: rupture et non rupture des fondations des barrages selon le type de sol (Lane)

Sol de fondation	rupture	Non-rupture	total
Argile compacté	3	76	79
Gravier, pavé, roche	8	77	85
Sable grossier	1	22	23
Sable, sable fin, silt	9	55	64
			251

Une autre forme de rupture de fondation se produit en raison d'une pression interstitielle excessive dans les pores confinés de limon ou de sable.

La pression de l'eau interstitielle dans les pores confinés, la pression hydrostatique dans les culées ou la consolidation des argiles intercalées avec les sables ou les limons, réduisent la résistance du sol jusqu'à ce qu'il ne soit plus capable de résister aux contraintes de cisaillement induites par le barrage ou sa charge d'eau. Le mouvement se développe très rapidement sans avertissement.

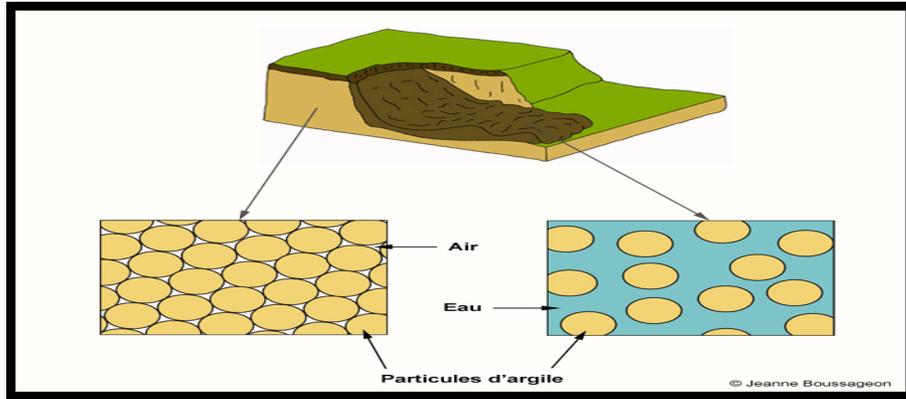


Figure III.22: la pression interstitielle (Jeanne Bousageon)

3.3.2. GLISSEMENT DANS LA DIGUE

Les glissements de talus peuvent se produire lorsque la pente est trop forte pour la résistance du sol. En général, le mouvement se développe lentement et précédé par des fissures sur le sommet de la pente, près de la crête.

La condition la plus critique du glissement du talus amont est l'abaissement soudain du réservoir (figure III.23), et le talus aval est plus susceptible de glisser lorsque le réservoir est plein (figure III.24).

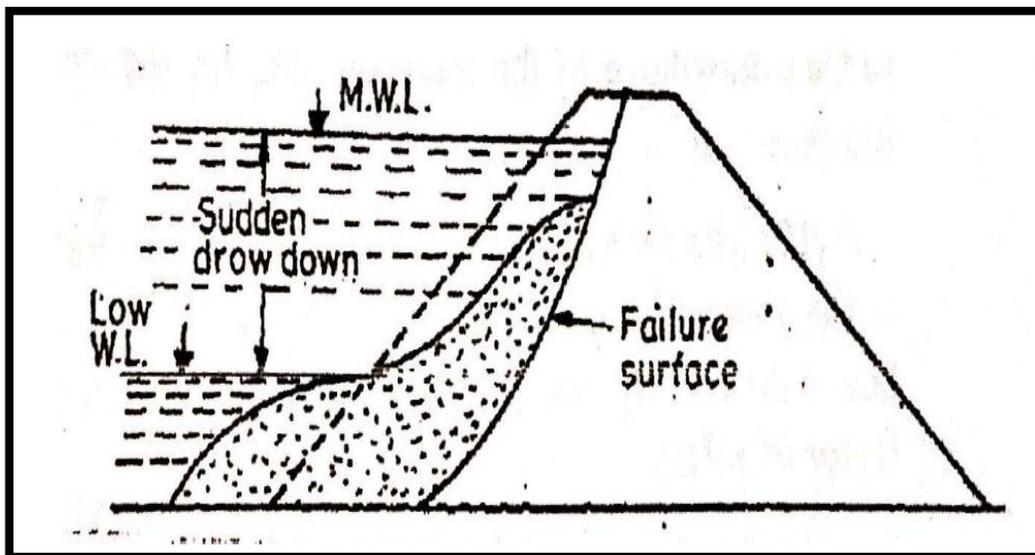


Figure III.23: glissement du talus amont (Garg, 2011)

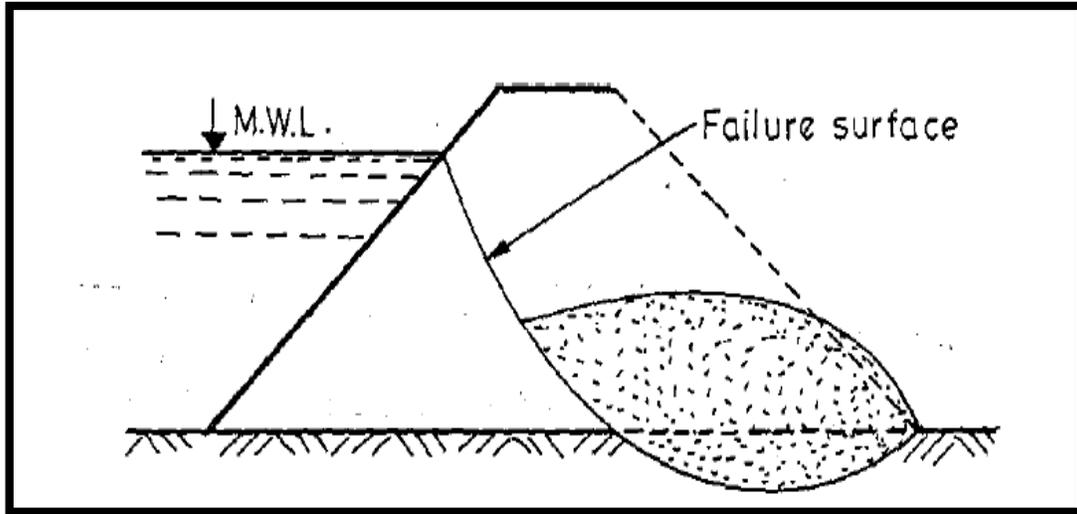


Figure III.24: glissement du talus aval (Garg, 2011)

Ces ruptures sont généralement dues à un développement de pressions interstitielles excessives non prises en compte, qui peuvent réduire la résistance au cisaillement des sols, comme expliqué dans le glissement de fondation.

Les ruptures de ce type sont généralement dues à des défauts de conception et de construction, De nombreux remblais peuvent se rompre pendant le processus de consolidation, au moment de la construction ou après la construction.

Tableau III.03: ordre de grandeur du coefficient de perméabilité (Schlosser, 1988)

Type de sol	perméabilité	Ordre de grandeur (m/s)
Argile compact	Imperméable	10^{-9} à 10^{-12}
Limon	Faible	10^{-7} à 10^{-9}
Sable très fin	Très faible	10^{-5} à 10^{-7}
Petit gravier, sable	Assez élevée	10^{-3} à 10^{-5}
Gravier moyen à gros	Très élevée	10^{-1} à 10^{-2}



Photo III.10: glissement du talus amont du barrage Calaveras, California 1918 (UCDavies)

3.3.3. GLISSEMENT DANS LES BERGES DES BARRAGES

Les glissements de terrain des berges des retenues peuvent représenter un risque potentiel pour les barrages. La rentrée brutale dans la retenue d'un vaste volume de terre suffisamment rapide, est susceptible de provoquer une vague pouvant déferler par dessus le barrage.

En 9 octobre 1963, un énorme glissement de terrain d'une vitesse estimée à 90 km/h s'est produit dans la retenue à l'occasion du premier remplissage de barrage Vajont en Italie , Ce glissement a provoqué une vague de plus de 200m de hauteur qui a franchi le barrage, et causé la destruction massive du bourg de Longarone et de trois autres villages, faisant plus de deux milles victimes

Un accident du type de ce qui s'est produit à Vajont en 1963 rest extrêmement rare.



Photo III.11: barrage de Vajont après le glissement de terrain (CFBR, 2012)

3.3.4. RUPTURE SISMIQUE

Les barrages et les grands réservoirs construits dans des zones à forte sismicité présentent un risque élevé pour la vie et les biens en aval.

Lorsqu'un tremblement de terre se produit, les ondes sismiques se propagent de la source jusqu'à la surface du sol. Provoquant une secousse du sol. Les effets des tremblements de terre peuvent être différents, tels que les dommages structuraux, la liquéfaction du sol et les glissements de terrain.

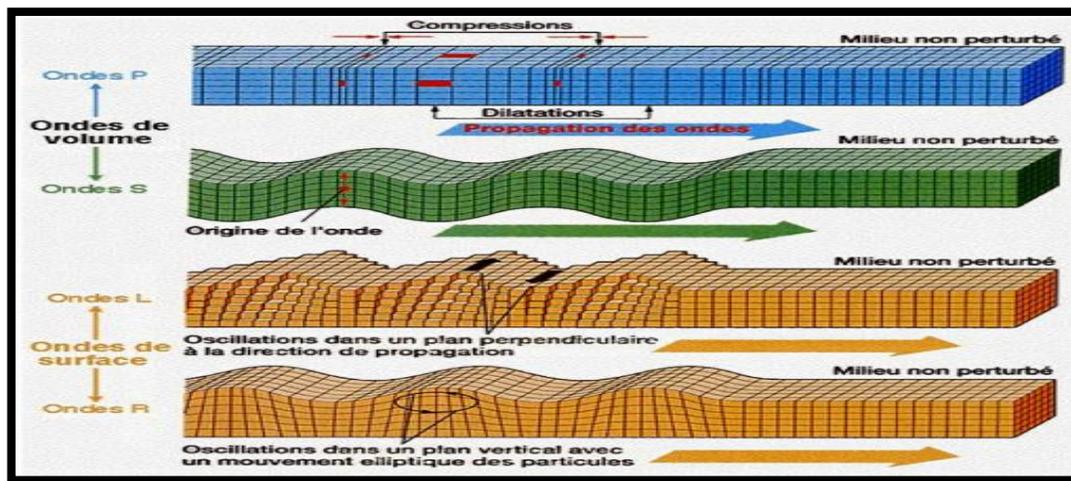


Figure III.25: les ondes sismique (Natur'Eau Quant, 2020)



Photo III.12: la rupture du barrage Fujinuma pendant le séisme du japon 2011 (DAJ, 2011)



Photo III.13: tassement de la crete et l'endommagement de la face amont et aval du barrage Zipingpu lors du tremblement de terre de Wenchuan Chine (Bin xu, 2014)

3.3.4.1. LIQUEFACTION DE SOL

La liquéfaction dans les barrages en terre est un phénomène par lequel un sol saturé ou partiellement saturé perd sa résistance et se comporte comme un liquide lors d'un tremblement de terre ou d'autres événements de charge dynamique. Elle se produit lorsqu'il y a une augmentation de la pression de l'eau interstitielle dans le sol, ce qui entraîne une perte de contact entre les particules du sol et rend le sol instable

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, les barrages en remblais sont généralement construits de sol ou d'enrochements. Ces matériaux contiennent des vides qui peuvent être remplis d'eau. Lors d'un tremblement de terre, les secousses provoquent un réarrangement des particules du sol et une augmentation de la pression de l'eau interstitielle. Si l'augmentation de la pression de l'eau interstitielle est importante, elle peut dépasser la contrainte effective du sol, ce qui entraîne une perte de résistance au cisaillement et un risque de liquéfaction

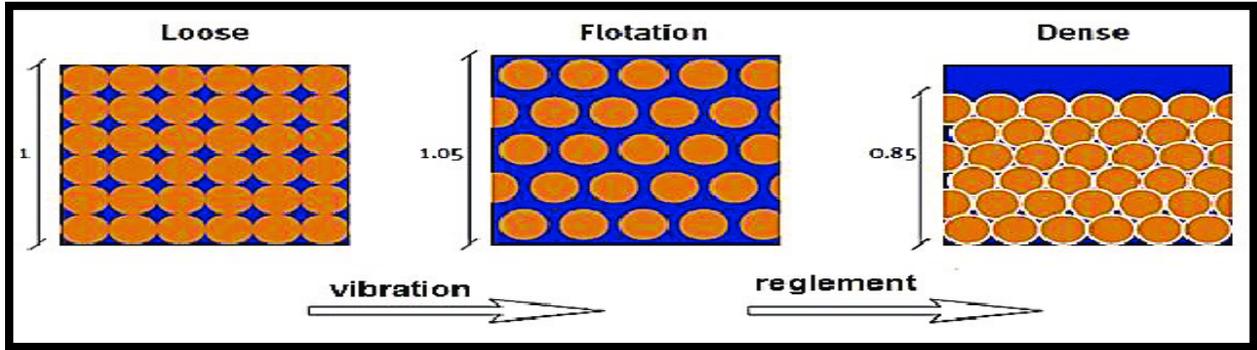


Figure III.26: liquéfaction de sol (khelalfa, 2016)

La transformation soudaine du sol en un état liquide peut entraîner des dommages structuraux au barrage, tels que des fissures ou des déformations et aussi des glissements.



Photo III.14: rupture du barrage San Fernando, California par liquéfaction pendant le séisme de 1971 (UCDavies)

3.3.5. RUPTURE PAR TASSEMENT

Le tassement différentiel des remblais peut être attribué à la différence des conditions du sol, des conditions de charge et des propriétés des matériaux. Ce dernier point est particulièrement vrai pour les barrages en enrochement dont le noyau est imperméable. L'enrochement possède

une rigidité beaucoup plus élevée que le noyau. Cependant, une déformation peut être observée même dans le cas de remblais homogènes. Le tassement différentiel peut provoquer des fissures internes dans les remblais et dans les fondations. (Ashour, 2012)

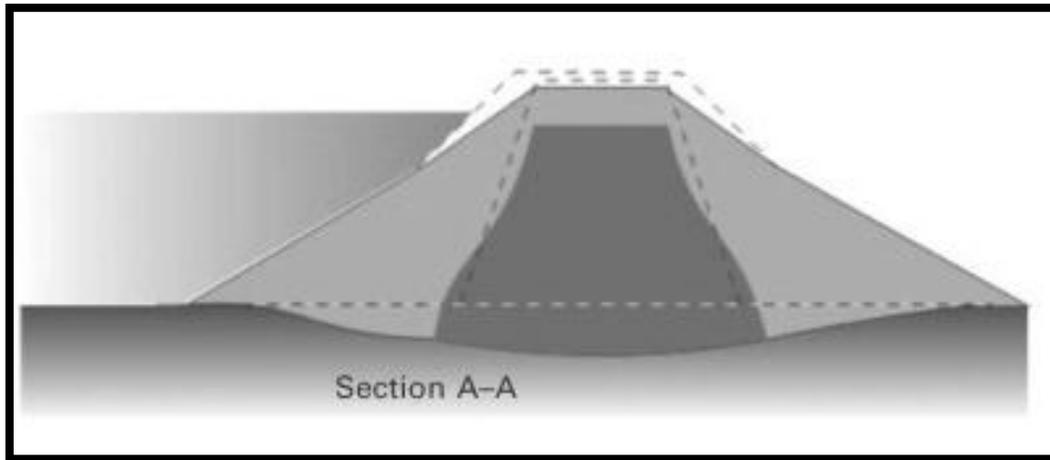


Figure III.27: tassement d'un barrage (Ashour, 2012)

Des tassements importants sont observés lors de la première mise en eau. (Ashour, 2012)

La prévention de la rupture structurale dans les barrages en terre nécessite une planification, une conception et une construction minutieuses, ainsi qu'une surveillance et un entretien continus. Voici quelques mesures clés qui peuvent contribuer à réduire les risques:

- Les pentes du barrage doivent être conçues avec des angles et des dimensions appropriés pour maintenir la stabilité. Des facteurs tels que le type de sol, la résistance au cisaillement doivent être pris en compte dans le processus de conception. Appliquer les facteurs de sécurité appropriés et les méthodes d'analyse de la stabilité des pentes.
- un système de drainage pour contrôler l'eau interstitielle. Un drainage adéquat permet d'éviter une augmentation excessive de la pression de l'eau, qui peut contribuer à l'instabilité des pentes et réduire la capacité portante des fondations.
- Un compactage approprié du matériau de la digue pendant la construction est crucial pour assurer la stabilité.

Compte tenu des conséquences potentiellement catastrophiques d'une rupture structurale d'un barrage ou d'une perte incontrôlée de réservoir, l'évaluation sismique doit être prise en compte

dans la conception de ces structures. L'activité sismique à proximité du site d'un barrage doit être déterminée pendant la phase de conception d'un projet et les éléments de conception défensive nécessaires doivent être inclus au fur et à mesure de l'avancement du projet. L'emplacement, les matériaux et les caractéristiques de conception doivent être pris en compte pour minimiser les effets de la charge sismique. (ASDSO, 2023)

CHAPITRE IV

**RECOMMANDATIONS
POUR LA JUSTIFICATION
DE LA STABILITE DES
BARRAGES EN TERRE**

1. INTRODUCTION

La prévention des ruptures de barrages en terre est un aspect vital de l'ingénierie et de la gestion des barrages pour assurer la sécurité publique, protéger l'environnement et préserver les ressources essentielles. Diverses techniques et stratégies sont employées pour atténuer les risques associés aux ruptures de barrage et améliorer la stabilité et l'intégrité des barrages en terre. Ce chapitre vise à fournir une vue d'ensemble de certaines techniques clés utilisées dans la prévention des ruptures de digues en terre. Ces techniques englobent un large champ de disciplines, notamment l'ingénierie géotechnique, l'hydrologie, la conception structurale et les pratiques de construction.

2. PROTECTION CONTRE L'ÉROSION EXTERNE

L'érosion externe peut affecter la stabilité des barrages en terre. Il s'agit de l'érosion du sol ou des matériaux rocheux causée par la force de l'eau qui s'écoule. L'érosion hydraulique se produit principalement dans les zones où la vitesse d'écoulement de l'eau est élevée, comme les évacuateurs de crues, ou les parements amont et aval du barrage.

Voici quelque remède pour prévenir ce phénomène :

2.1. LA HAUTEUR DU BARRAGE

La hauteur totale du barrage est égale à la hauteur normale de retenue majorée par la charge maximale au dessus du seuil déversoir et la revanche. Pour calculer cette hauteur il est donc nécessaire de connaître:

- Niveau normale de retenue(NR) : Il est calculé compte tenu de la capacité utile à stocker majorée par la tranche morte éventuellement prévue au fond de la retenue pour emmagasiner les dépôts solides. Elle correspond au volume engendré par la côte des plus hautes eaux diminuée de la charge (H) sur le déversoir, selon la régularisation :

$$NR = PHE - H \quad [EQ 1]$$

- Niveau des plus hautes eaux (PHE) : Il correspond au niveau de la crête de la retenue diminué de la revanche « R »

$$PHE = NC - R \quad [EQ 2]$$

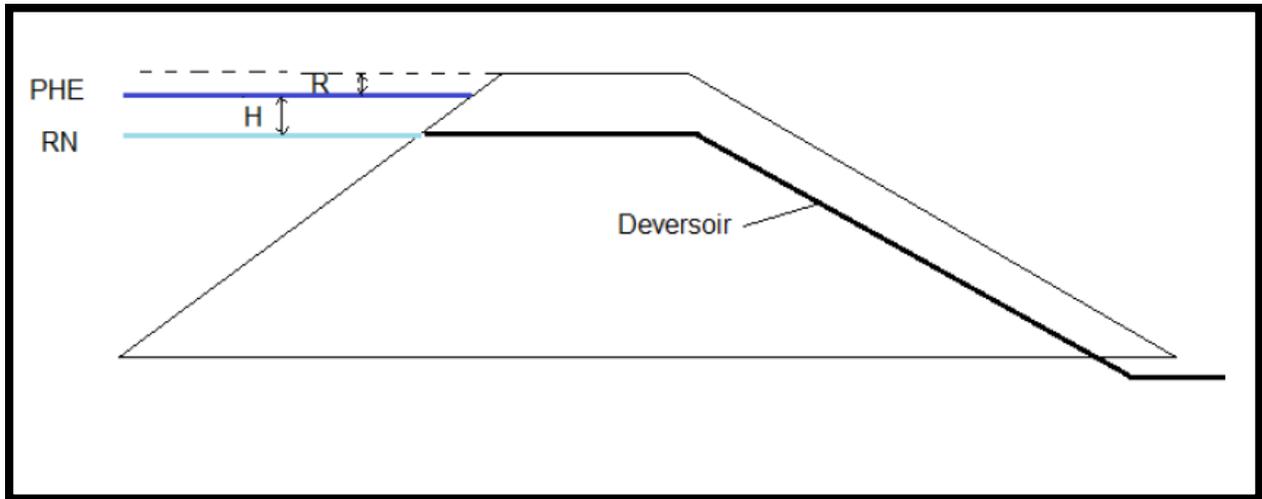


Figure IV.01: les cotes RN et PHE (Boukezzi)

2.2. LA REVANCHE

La revanche minimale est la distance verticale entre la crête du barrage et les plus hautes eaux de la retenue, pour éviter la submersion du barrage par les vagues. Pour calculer la revanche il faut d'abord connaître la vitesse « v » et la hauteur « h » des vagues qui se forment à cause du vent, celle-ci peut être estimée à partir de la formule de STEVENSON- MOLITOR (Rolley, Kreitmann et al. 1977):

$$V = 1.5 + 2h \quad [EQ3]$$

V : la vitesse de propagation des vagues (m/s)

H : la hauteur des vagues (m)

La hauteur des vagues dépend de la vitesse du vent horaire « V » et du fetch « F » (longueur rectiligne perpendiculaire mesurée de l'axe de la digue au la ligne de la cuvette la plus éloignée.)

$$\text{Si } F < 30\text{km} \quad h = 0.76 + 0.032 \cdot \sqrt{V \cdot F} - 0.26 \cdot \sqrt{F} \quad [\text{EQ 4}]$$

$$\text{Si } F > 30\text{km} \quad h = 0.032 \cdot \sqrt{V \cdot F} \quad [\text{EQ 5}]$$

H : hauteur des vagues (m)

V : vitesse des vents (km/h)

F : fetch (km)

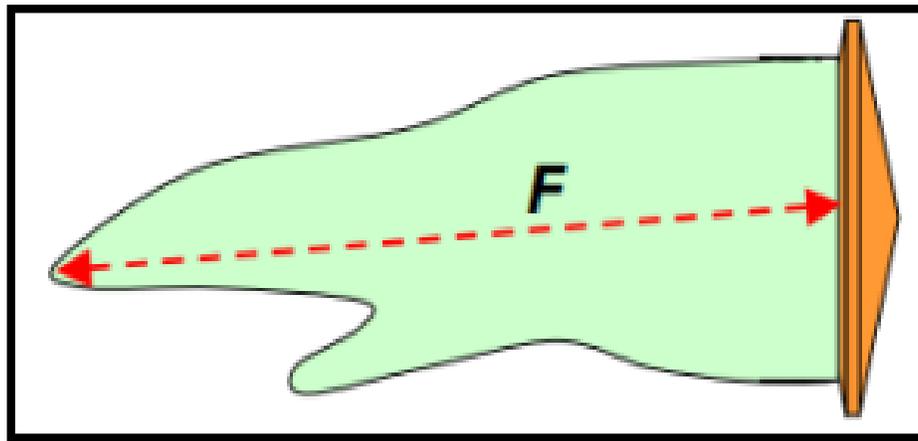


Figure IV.02: ligne de fetch (ABEST, 2017)

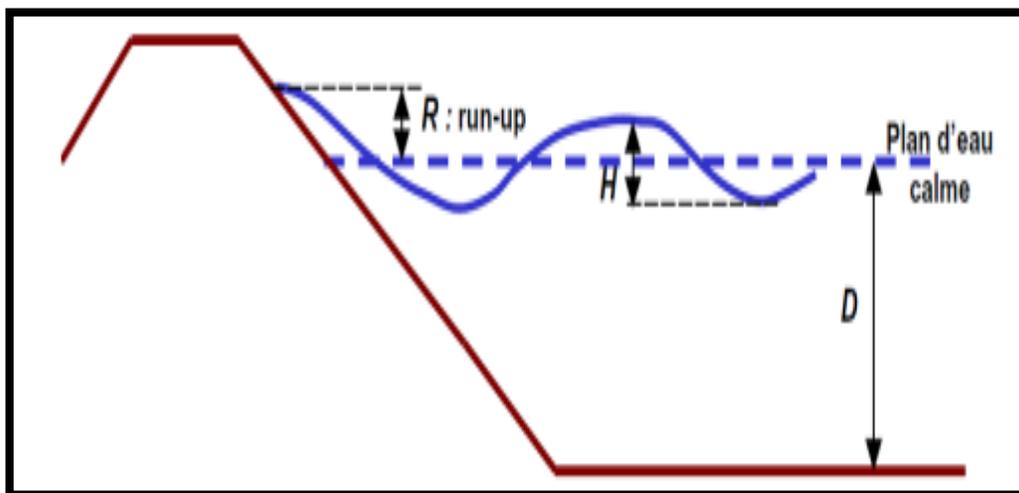


Figure IV.3: la hauteur des vagues (ABEST, 2017)

La formule empirique de Gaillard permet de calculer la hauteur de revanche :

$$R_{min} = 0.75h + \frac{v^2}{2g} \quad (m) \quad [EQ 6]$$

H: hauteur des vagues (m)

V : vitesse de propagation des vagues (m/s)

Tableau IV.01: valeurs recommandées pour la revanche (USBR 2012)

Fetch (km)	Revanche minimale (m)	Revanche normal (m)
<1.5	1.00	1.25
1.5	1.25	1.50
4.0	1.50	1.80
8.0	1.80	2.50
15.0	2.20	3.00

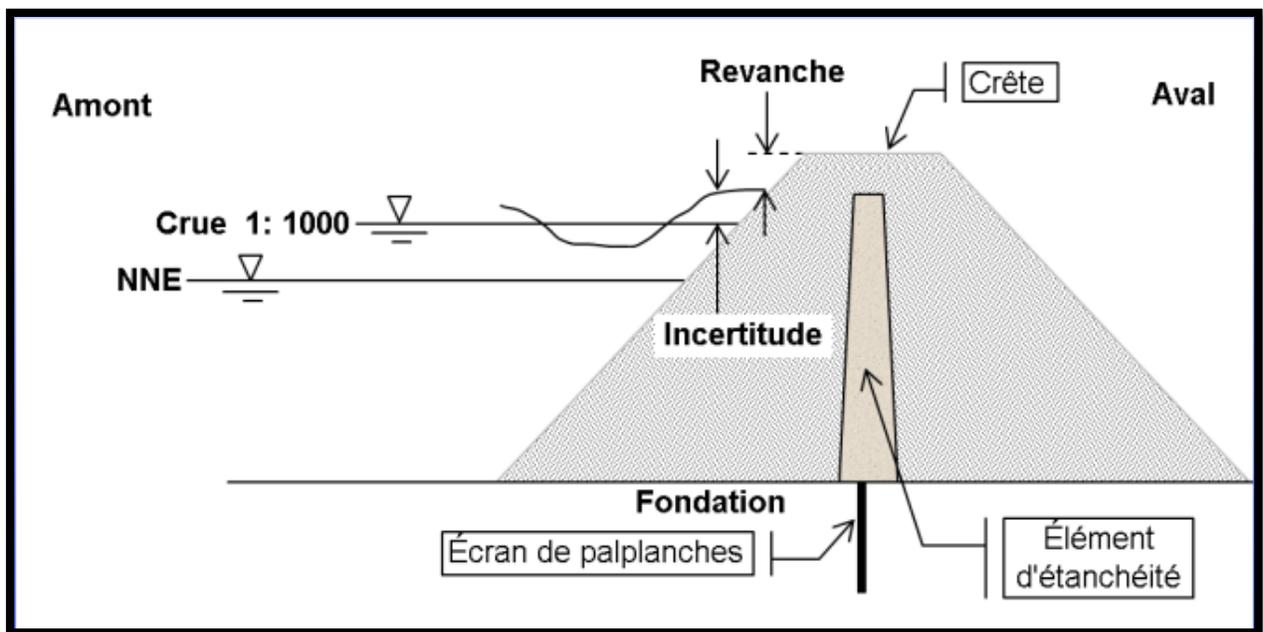


Figure IV.04: schéma représentatifs de la revanche et d'autres mesures de sécurité (Sylvain Paquet, 2013)

2.3. PROTECTION DU PAREMENT AMONT

Les talus amont des barrages en remblai doivent être protégés contre l'action destructive des vagues. Les types de protections de surface habituels pour le talus amont sont, les riprap et le sol-ciment. D'autres types de protection ont été utilisés : béton, béton bitumineux, blocs de béton préfabriqués et (sur des structures petites et relativement peu importantes) bois et béton en sacs. (USBR 2012)



Photo IV.01: les méthodes de protection de la face amont (Google image)

La protection de la face amont commence normalement à la crête du barrage et s'étend jusqu'à une distance sûre en dessous de la surface de l'eau (environ 1.5m).

2.3.1. RIP-RAP

Le rip-rap consiste en une distribution bien calibrée de pierres ou de fragments de roches qui sont déposés sur place sur le talus amont d'une digue pour la protéger de l'action des vagues. L'excellent service rendu par les riprap est illustré par le cas du barrage de Horsetooth, Colorado (Photo IV.02) montre l'excellent état des riprap sur le talus amont de ce barrage après plus de 60 ans de service. (USB, 2012)



Photo IV.02: le rip-rap dans le talus amont du barrage horsetooth Colorado, USA (USB, 2012)

La supériorité de riprap pour la protection des talus amont et son faible coût d'entretien, par rapport à d'autres types de protection des talus, ont été démontrés de manière si convaincante qu'il a été jugé économique d'importer des roches depuis des distances considérables pour éviter la construction d'autres types de protection des talus pour les grands barrages. (USB, 2012)

2.3.2. SOL – CIMENT

Le sol-ciment est un mélange bien compacté de terre, de ciment Portland et d'eau. ces dernières années, l'utilisation du sol-ciment comme matériau de revêtement pour les barrages en terre s'est avérée économique lorsqu'il n'y a pas d'enrochements appropriés à proximité du site.

Aucune caractéristique de conception inhabituelle ne doit être incorporée dans la digue. Les procédures normales de construction de digues sont utilisées, avec peut-être une attention particulière pour assurer un minimum de consolidation de la digue et de tassement de la fondation après la construction.



Photo IV.03: protection du talus avec sol-ciment dans le barrage choke canyon, Texas, USA (USBR, 2012)

Le sol-ciment est généralement placé et compacté en couches horizontales comme les escaliers, Cela permet de garantir une efficacité maximale de la construction et de l'exploitation. le sol-ciment serait probablement utilisé à la place des rip-rap. Cette préférence repose sur l'hypothèse que les facteurs de coût favorisent l'option sol-ciment.

2.3.3. BETON COMPACTE AU ROULEAU

Le béton compacté au rouleau est très similaire à la protection des talus par sol-ciment. La différence la plus significative est la granulométrie et la qualité des agrégats. Les agrégats pour le béton compacté au rouleau ressemblent plus à des agrégats de béton qu'à de la terre. (USSD,2011)

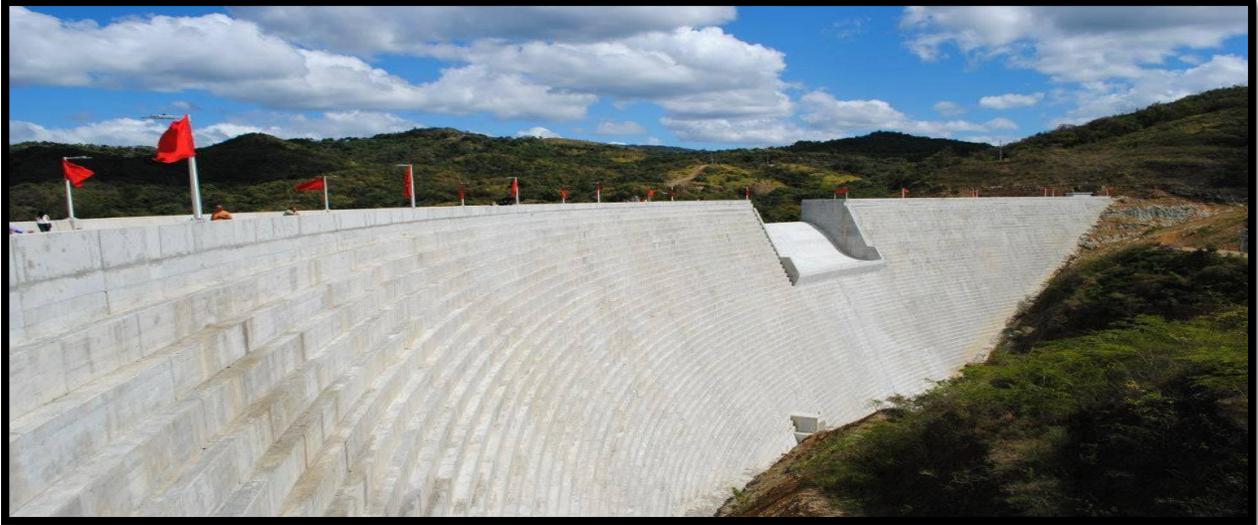


Photo IV.04: barrage portugues, porto rico (US army corps of engineers, 2014)

Le bcr est un mélange raide sans affaissement de granulats inertes, de ciment, d'eau et d'adjuvants, mise en place par compactage à l'aide des engins de travaux publics (rouleau compresseur vibrant, plaque vibrante...) pour être bien consolidé. Le bcr n'est pas armé et sa mise en place se fait sans coffrage. Le béton compacté au rouleau est fréquemment utilisé pour la protection des talus en amont des barrages lorsqu'une capacité supplémentaire de l'évacuateur de crues est nécessaire pour laisser passer des crues

2.4. PROTECTION DU PAREMENT AVAL

Si le parement aval d'un barrage est constitué d'un remblai de roches, il n'est pas nécessaire de procéder à un traitement spécial de la surface du talus. Les parements avals des barrages homogènes ou des barrages avec des zones extérieures de sable et de gravier doivent être protégés contre l'érosion causée par le vent et le ruissellement de surface à l'aide d'une couche de roches, de galets ou de gazon. En raison de la difficulté d'obtenir une protection adéquate des talus avec un couvert végétal sur de nombreux barrages, en particulier dans les régions arides, la protection des talus à l'aide de galets ou de rochers est préférable et devrait être utilisée lorsque le coût n'est pas prohibitif. (USB, 2012)



Photo IV.05: protection du talus aval avec des galets dans le barrage de Jordanelle, Utah, USA (USBR, 2012)



Photo IV.06: protection végétale du talus aval du barrage de scoggins, Oregon (USBR, 2012)

2.4.1. BERME (RISBERME)

On a discuté dans le chapitre précédent que les fortes pluies qui tombent directement sur la face aval et l'action érosive de l'eau en mouvement peuvent conduire à la formation des ravins qui peut menacer la stabilité et même la rupture du barrage.

Une risberme réduit la vitesse des eaux de ruissèlement sur les surfaces des talus avals. des dispositions de drainage appropriées sont mise en place pour l'évacuation des eaux de pluie collectées dans le risberme.

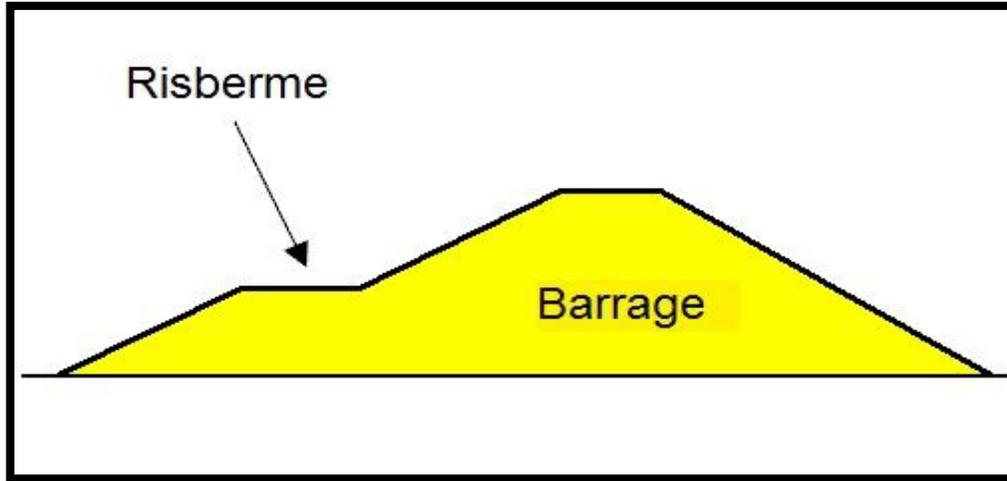


Figure IV.05: berme (Simon, 2012)

3. PROTECTION CONTRE L'ÉROSION INTERNE

L'érosion interne est un phénomène dans lequel l'eau s'infiltré et s'écoule à travers le corps de la digue ou sa fondation, provoquant l'érosion et le déplacement des particules de sol. Si elle n'est pas contrôlée, l'érosion interne peut conduire à la rupture du barrage.

Voici quelque méthodes pour contrôlée ce phénomène :

3.1. LES DRAINS ET FILTRES

Le drainage associé aux barrages a pour but de contrôler les infiltrations et d'empêcher l'accumulation de pressions interstitielle excessives. Il n'est pas pratique de construire une structure avec une barrière complètement imperméable dans la fondation ou la digue.

Dans ce cas, les ingénieurs peuvent réaliser un système de drainage pour permettre la collecte et le passage des eaux d'infiltration en toute sécurité. (USDA, 2016)

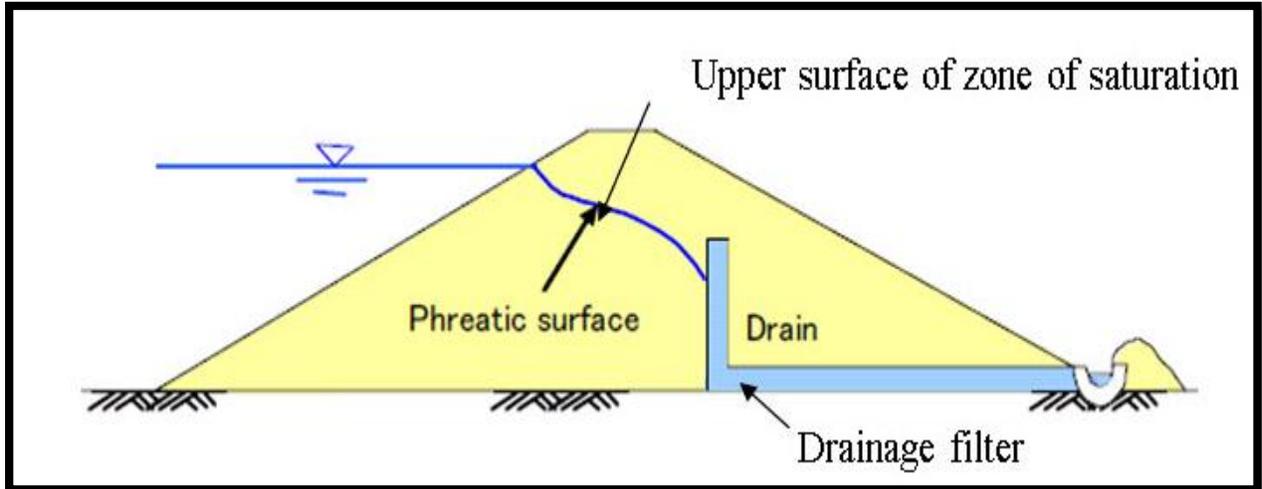


Figure IV.06: un barrage homogène avec drain dans la face aval (Kunitomo, 2000)

L'eau d'infiltration suivra toujours le chemin de moindre résistance. il peut s'agir d'une fondation ou d'un remblai perméable. Les systèmes de drainage sont conçus pour intercepter les eaux d'infiltration avant qu'elle n'atteigne une sortie en aval.

Les filtres sont des minces couches successives de matériaux perméables dont la grosseur des éléments augmente dans la direction de l'écoulement. Ces filtres doivent assurer une transition entre une couche à granulométrie donnée vers une couche à granulométrie plus grossière.

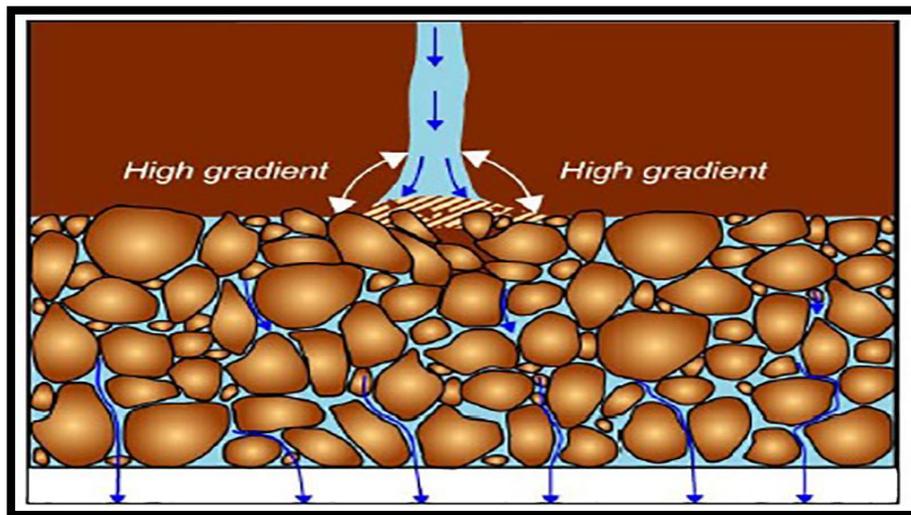


Figure IV.07: les drains filtrant retenir les matériaux fin et évacuer les débits et pressions d'eau

3.1.1. DRAINS DE FONDATION

Un drain de fondation est parfois appelé drain de pied car il est généralement situé près du pied aval d'un barrage en remblai. Le but du drain de fondation est d'intercepter l'eau qui pourrait infiltrer à travers les sols ou les roche poreux des fondations afin qu'elle ne remonte pas à la surface en aval du barrage. Généralement, le drain de fondation est construit dans une tranchée verticale avec un tuyau perforé. (USDA, 2016)

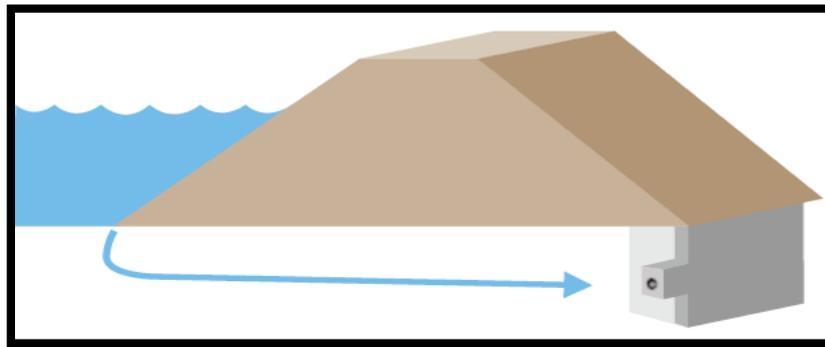
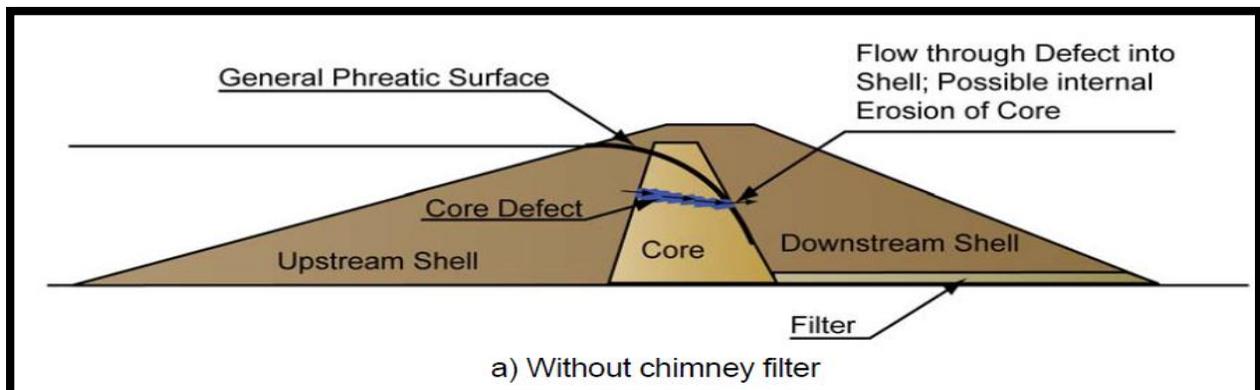


Figure IV.08: installation d'un drain de fondation (USDA, 2016)

3.1.2. DRAIN VERTICAL (DRAIN CHEMINEE)

Avec le temps, la plupart des digues en terre développent une ligne de saturation, qui peut provoquer une érosion interne ou un renard, il existe de nombreux barrages qui ont été construits sans filtre horizontal et qui ont fonctionné de manière satisfaisante, un filtre à cheminée offre des avantages substantiels. Un drain bien réaliser offre une protection contre les fissures potentielles du noyau de remblai dans lequel l'eau peut s'infiltrer et provoque l'érosion interne.



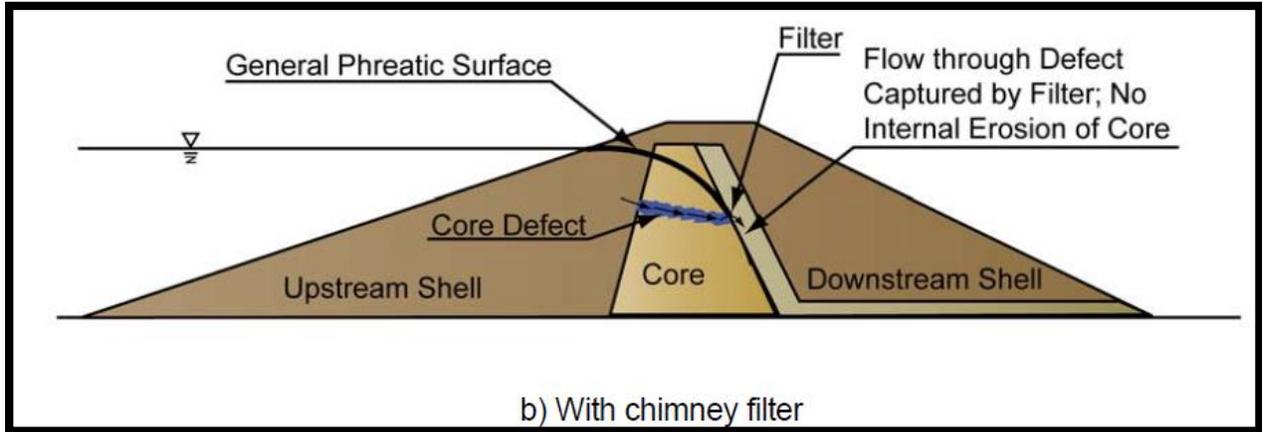


Figure IV.09: le drain vertical offre une protection contre les défauts du noyau (MDNRC, 2010)

Le drain cheminé a une hauteur variable. L'option du rabattement de la nappe par un drain mis en place jusqu'à la côte de retenue normale RN (ou la côte des plus hautes eaux) est la solution généralement privilégiée. (Lautrin, 2002)

3.1.3. DRAIN HORIZONTAL (TAPIS DRAINANT)

Un drain tapis est posé au contact fondation-remblai dans la partie aval du barrage. Il est destiné à rabattre la ligne de saturation à l'intérieur du massif et réduire les pressions interstitielles dans le talus aval. L'objectif du drain tapis est de collecter les eaux d'infiltration de la fondation et de la digue et les évacuer en toute sécurité. (USDA, 2016)

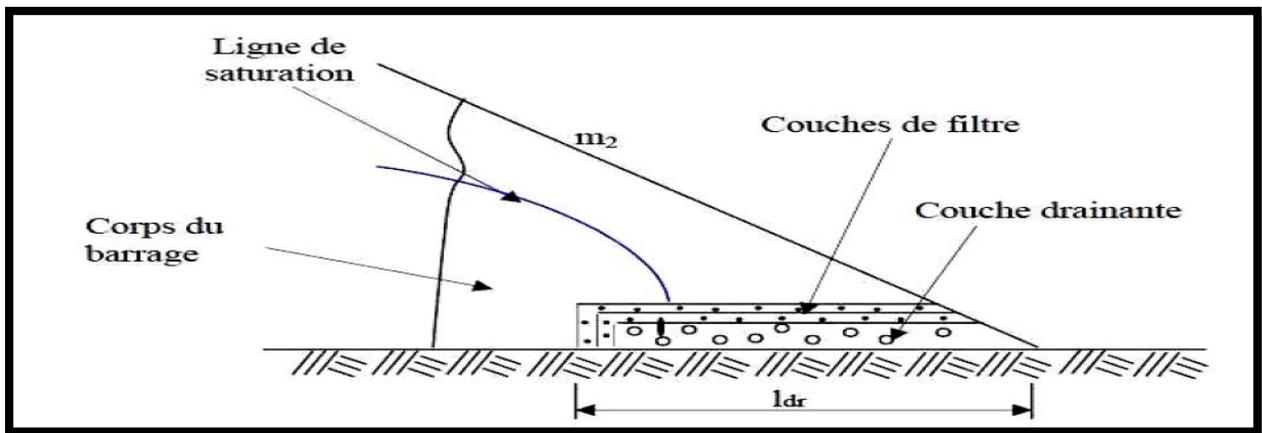


Figure IV.10: tapis drainant (Messaid, 2009)

3.1.4. PUIITS DE DECHARGE

L'objectif d'un puits de décharge est de réduire les pressions d'eau qui pourraient mettre en danger l'intégrité d'une structure. Le puits de décharge est constitué d'un tuyau perforé entouré d'un matériau filtrant conçu pour empêcher la migration du matériau de fondation dans le puits.

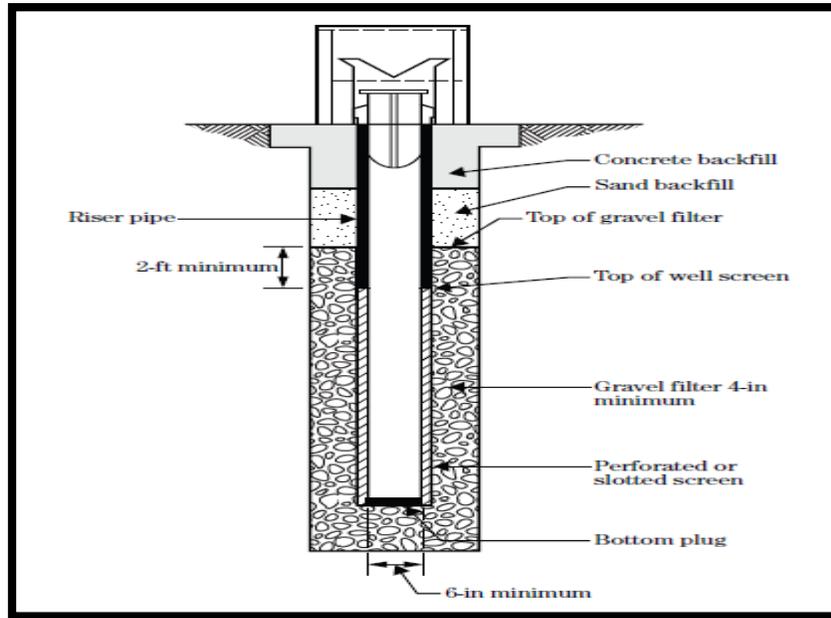


Figure IV.11: le puits de décharge (USDA, 2016)

La taille et la profondeur du puits de décharge seront déterminées par les ingénieurs et sont basées sur l'analyse des sols et de la géologie du site

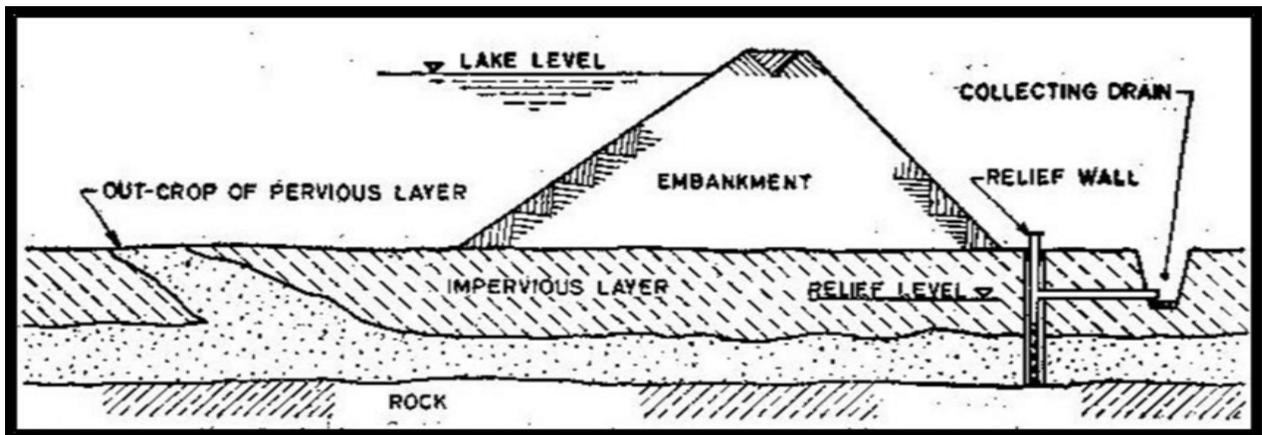


Figure IV.12: l'installation du puits de décharge (Adamo, 2020)

3.1.5. TAPIS ETANCHE

Lorsque l'étanchéité de la retenue ne peut pas être réalisée par une coupure en aval du barrage, la solution consiste à étancher la cuvette totalement ou partiellement à l'aide d'un tapis en matériaux argileux compactés.

On peut adjoindre aux matériaux argileux des produits d'étanchéité, des polymères synthétiques et de la bentonite pour améliorer son efficacité.

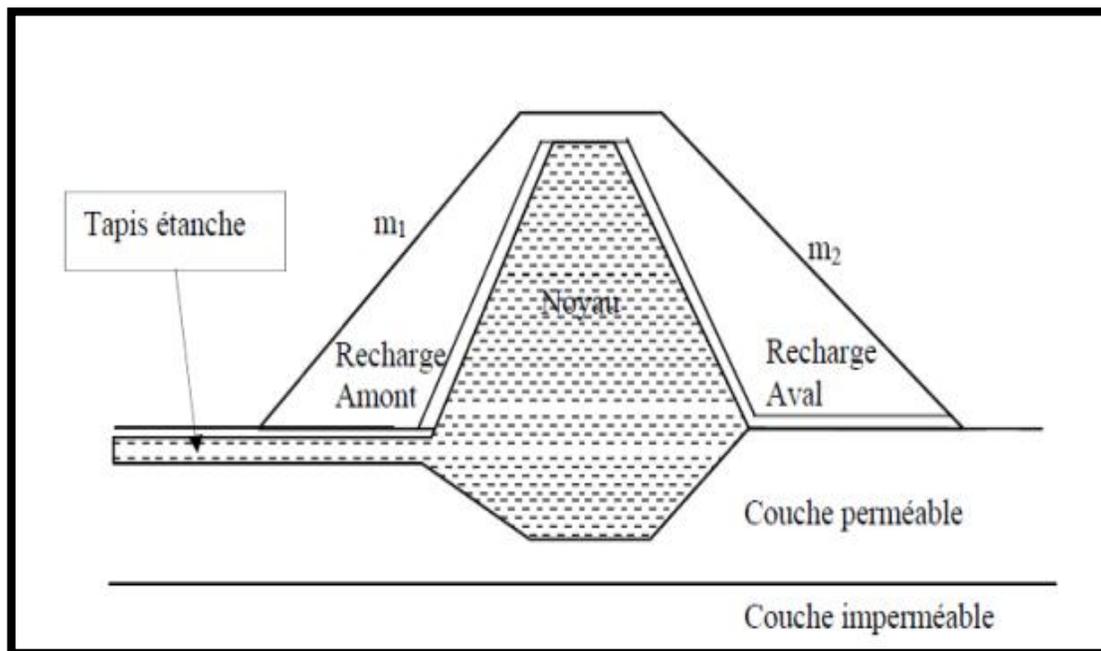


Figure IV.13: tapis étanche (Bendjema, 2015)

3.1.6. MEMBRANE DRAINANTE (FILTER DIAPHRAGM)

La membrane est une zone de matériau filtrant (généralement du sable) construite autour d'une conduite. I

l s'agit d'une mesure défensive standard pour prévenir les problèmes liés à l'infiltration ou à l'érosion interne dans les barrages avec une conduite. La membrane est conçue pour intercepter l'eau qui peut s'écouler à travers les fissures qui peuvent se produire pendant le compactage du remblai avec une conduite. (USDA, 2016)

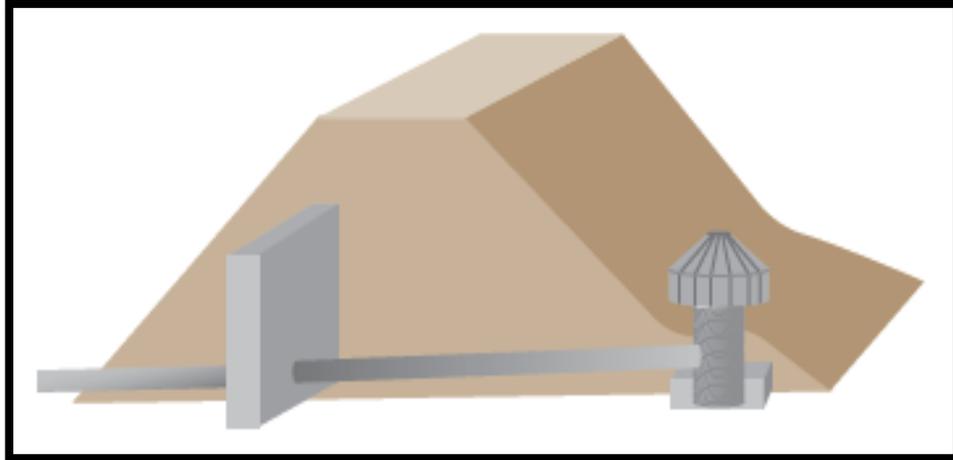


Figure IV.14: installation de la membrane drainante (USDA, 2016)



Photo IV.07: rupture d'un barrage à cause d'une conduite sans membrane (USDA, 2016)

La théorie qui justifie l'utilisation d'une membrane drainante est basée sur des essais approfondis réalisés dans le laboratoire de mécanique des sols du NRCS à Lincoln (Nebraska, USA) dans les années 1980. Les essais ont démontré que même les sols argileux très érosifs et avec une fissure ne s'érodent pas lorsqu'ils sont protégés par une couche filtrante de sable bien conçue (Sherard, 1989)

- La conduite : Les conduites transportent l'eau d'un réservoir à travers, sous ou autour d'un barrage en remblai, Les conduits jouent le rôle de déversoirs primaires ou secondaires pour assister l'évacuateur de crue, il peut être aussi utilisé pour générer l'électricité. (FEMA, 2005)

3.2. PAROI ETANCHE (CUTOFF WALLS)

La paroi étanche est un élément qui permet d'empêcher l'infiltration d'eau à travers les fondations ou le remblai du barrage, ce qui pourrait conduire à l'érosion interne. En créant une barrière, la paroi intercepte et redirige l'infiltration d'eau.

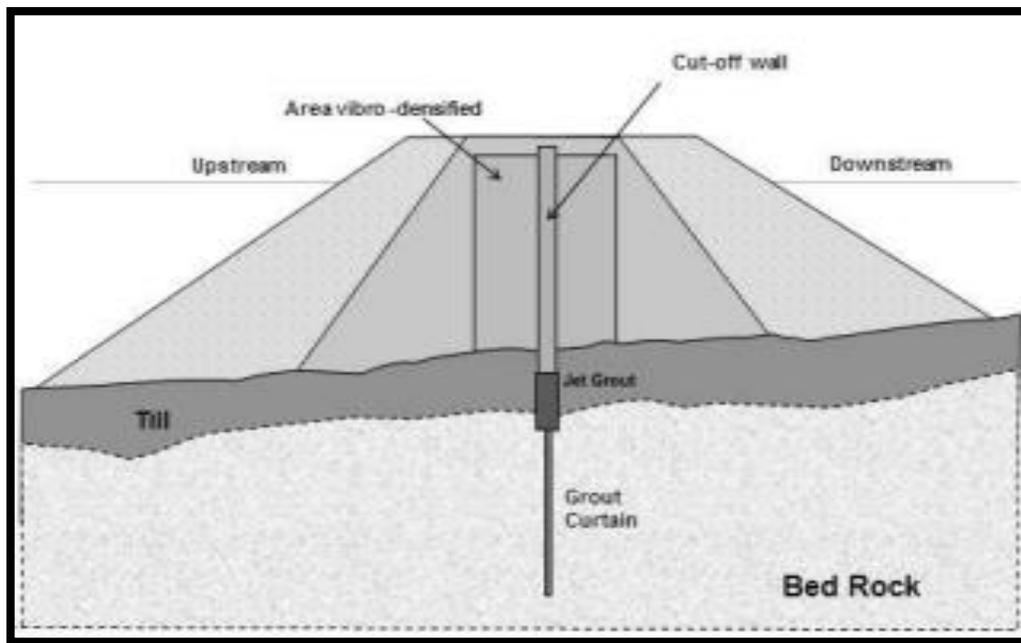


Figure IV.15: l'installation d'une paroi étanche (Schwank, 2019)

Ils sont construits en creusant une tranchée dans la fondation ou le remblai du barrage, puis en la remplissant d'un matériau imperméable (généralement du béton, ciment+bentonite). La profondeur et la longueur de la paroi dépendent de divers facteurs, notamment des conditions géologiques du site, des caractéristiques hydrologiques de la région et des exigences de conception du barrage. Il est important que la paroi s'étende profondément dans la fondation pour intercepter les infiltrations potentielles. (USB, 2012)

3.3. INJECTION DES FONDATIONS

Une fondation rocheuse ou sableuse perméable implique la nécessité d'injection pour remédier aux problèmes de perméabilité, de fissuration et de faille. L'injection des sols est une technique de traitement des terrains dont les propriétés mécaniques initiales, médiocres,

permettent difficilement la construction d'ouvrages du génie civil. Elle consiste à introduire, sous pression, un coulis plus au moins fluide qui circule dans les interstices du sol, jusqu'à sa prise. Le résultat en est une amélioration de l'étanchéité des terrains par diminution de la perméabilité (barrages, barrière étanche contre la migration des particules du sol) et de la résistance mécanique du sol.

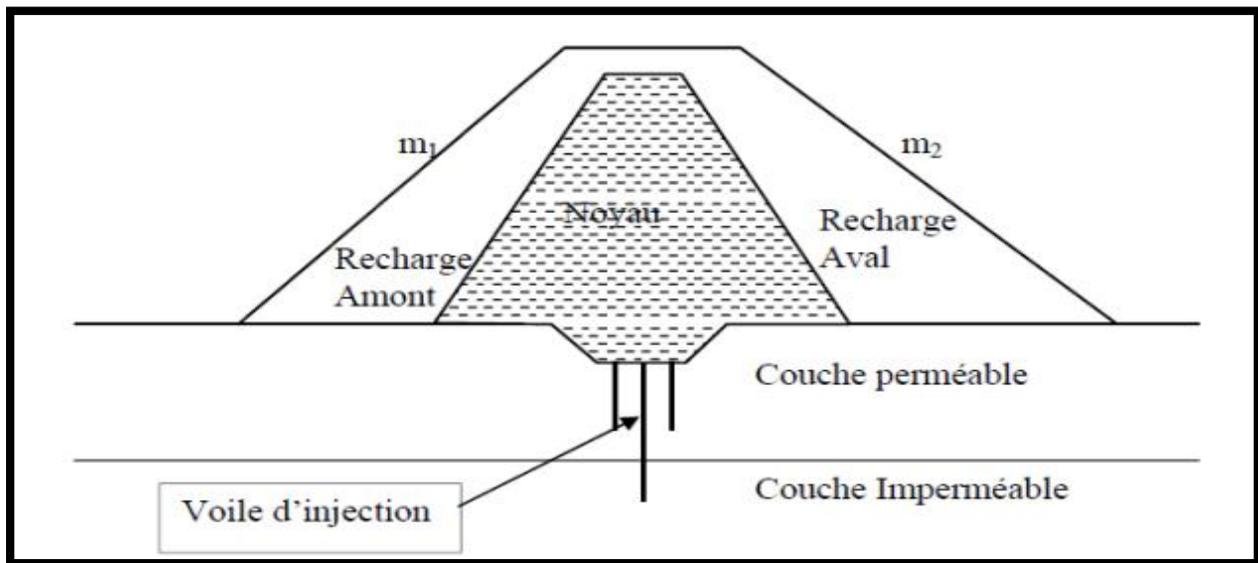


Figure IV.16: voile d'injection (Messaid, 2009)

Les produits d'injection étant adaptés au matériau traité (coulis de bentonite et ciment, résine). La coupure comporte le plus souvent, trois lignes de forages, comme l'injection ne peut être efficace en surface, soit on Dispositifs de protection des barrages en terre recoupe les premiers mètres injectés par une clé d'étanchéité, soit on traite à partir d'une certaine hauteur de remblai. (Messaid, 2009)

3.4. LARGEUR DE LA CRETE DU BARRAGE

La largeur de la crête d'un barrage en terre dépend de plusieurs considérations telles que :

- les propriétés des matériaux de remblai et la distance minimale d'infiltration admissible à travers le remblai au niveau normal de l'eau du réservoir,

- exigences des routes, pour le passage des engins de terrassement pendant la réalisation et ultérieurement pour son entretien
- la conception des barrages dans les zones à forte activité sismique,

La largeur de la crête doit permettre d'obtenir une infiltration faible à travers la digue au niveau du réservoir maximal.(USBR, 2012)

Parfois elle est calculée par les formules de Knappen et rolley :

$$L = 1.65\sqrt{H} \quad (\text{m}) \quad [\text{EQ 7}]$$

$$L=3.6\sqrt[3]{H} - 3 \quad (\text{m}) \quad [\text{EQ 8}]$$

L : largeur de la crête

H : hauteur du barrage

4. STABILITE DE LA STRUCTURE

La rupture structurale est provoquée par des ruptures de cisaillement qui provoquent des glissements, des fissures et des déformations dans les remblais ou la fondation.

4.1. COMPACTAGE

Le compactage du sol est le processus dans lequel une énergie mécanique est appliquée à un sol provoquant une densification lorsque l'air est expatrié des pores entre les grains du sol, La teneur en eau w du sol n'est donc pas modifiée. Le poids volumique du sol γ_h , par contre, sera augmenté, et avec lui, le poids volumique sec γ_d .

Le compactage resserre la texture du sol ce qui réduit les déformations, les tassements. La perméabilité est augmentée et assure la stabilité des talus et remblais. (Djabri, 2021)



Figure IV.17: les engins de compactage (Djabri, 2021)

Le compactage est fonction de quatre paramètres : la teneur en eau, la masse (le poids) volumique du sol sec, l'énergie de compactage et du type de sol (granulométrie, minéralogie, présence d'argile, etc.). Les résultats de compactage sont donnés sous forme d'une courbe (courbe de compactage). Cette courbe est tracée à partir des teneurs en eau (w) et de poids volumique sec du sol (γ_d) ou la densité sèche (le rapport du poids volumique sec du sol par rapport au poids volumique de l'eau).

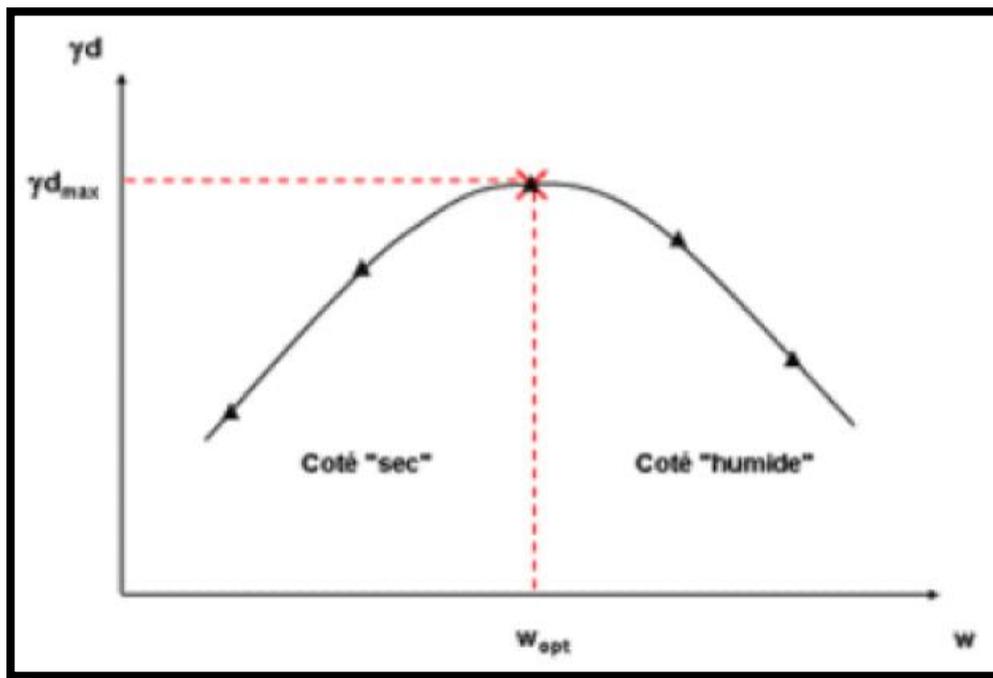


Figure IV.18: la courbe de compactage (Tissot)

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1+w} \quad [EQ 9]$$

γ_d : le poid volumique sec

γ_h : le poid volumique apparent

w : teneur en eau

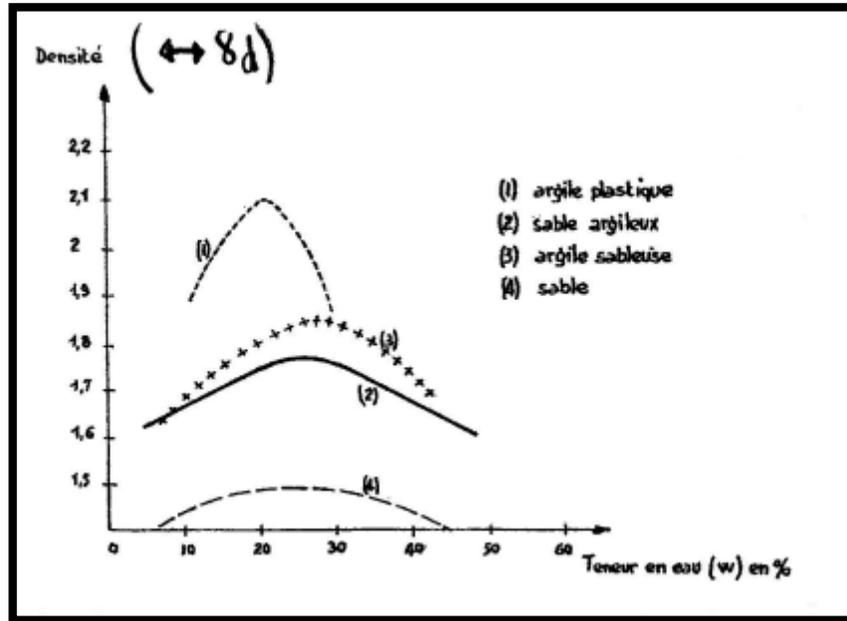


Figure IV.19: influence de type de sol (P. Vassart)

L'allure des coupes de compactage varie avec la nature du sol. Très aplaties pour un sable (ce qui revient à dire que γ_d est peu influencé par la teneur en eau), elles présentent un maximum très marqué pour un argile plastique (ce qui revient à dire que γ_d est fortement influencé par la teneur en eau). (P. VASSART)

4.2. RESISTANCE AU CISAILEMENT

Les sols constituant la digue à l'état non compacté sont composés de grains juxtaposés et de vides, ces derniers étant remplis par de l'eau et de l'air. Si on comprime cette terre elle se tasse quasi instantanément jusqu'à ce que les vides soient entièrement remplis d'eau, l'air étant expulsé ou dissous dans l'eau. A partir de ce moment le tassement ne se poursuivra que si en même temps de l'eau est chassée. C'est le phénomène de la consolidation. (Rhouzlane, 2014)

La résistance au cisaillement est calculée par la formule de coulomb :

$$\tau = c + (\sigma - \mu) \cdot \text{tg } \varphi \quad [\text{EQ 10}]$$

τ :résistance au cisaillement

c :la cohésion

σ :pression normale à la surface

μ :pression interstitielle

φ :angle de frottement interne

Si la terre est perméable, l'eau ne pourra se mettre en pression puisqu'elle sera rapidement expulsée. La pression interstitielle sera toujours nulle ou faible.

Si la terre est imperméable (cas limite), l'eau interstitielle restera emprisonnée entre les grains. L'eau étant incompressible vis-à-vis du squelette de la terre, tout l'excédent de la pression totale σ exercée par rapport à la pression σ_3 à partir de laquelle tous les vides se remplissent par l'eau sera supporté uniquement par l'eau interstitielle. (Rhouzlane, 2014)

$$\mu = \sigma - \sigma_3 \quad [\text{EQ 11}]$$

Donc on obtient :

$$\tau = c + \sigma_3 \cdot \text{tg } \varphi \quad [\text{EQ 12}]$$

La résistance au cisaillement ne pas changée alors que la pression est passée de σ à σ_3 .

4.3. STABILITE AU GLISSEMENT

On étudie la stabilité du barrage par rapport au glissement pour la surface de contact entre le remblai et la fondation. Le glissement du barrage se fait sur cette surface à cause des efforts appliqués. (Rhouzlane, 2014)

La résistance au glissement est donnée par la relation suivante :

$$\tau = c.s + N . \text{tg } \varphi \quad [\text{EQ 13}]$$

τ : résistance au glissement

c : cohésion du contact remblai-fondation (Kpa)

s : section de contact entre remblai-fondation (m²)

N : résultante des efforts normaux (Kn)

Φ angle de frottement interne

La formule du facteur de sécurité au glissement :

$$Fg = \frac{c.s + N . \text{tg } \varphi}{T} \quad [\text{EQ 14}]$$

T: la résultante des efforts tangentiels (Kn)

La stabilité au glissement du barrage est assurée si :

- $Fg \geq 1.5$ pour les combinaisons de charge fondamentales.
- $Fg \geq 1.0$ pour les combinaisons de charge accidentelles et extrêmes.
- $FS < 1,0$ Le glissement est pratiquement inévitable.

Tableau IV.04: les valeurs de Fs (Benmebarek, 2011)

Fs	Etat de l'ouvrage
<1	Danger
1.0 – 1.25	Sécurité contestable
1.25 – 1.4	-sécurité satisfaisante pour les barrages peut important -sécurité contestable pour les barrages ou bien quand la rupture est catastrophique
>1.4	satisfaisante

4.4. PENTE DES TALUS DE BARRAGE

L'inclinaison des talus est exprimée par le terme « pente » . Dans le cas des barrages en remblai, le terme pente est communément utilisé. La pente du talus qui est le rapport de la hauteur du talus sur sa projection horizontale est fixé par le calcul de stabilité.

A titre indicatif, le tableau ci-dessous donne quelques valeurs qui devront être vérifiées par une étude de stabilité mécanique du massif. (Rolley, Kreitmann et al. 1977).

Tableau IV.05: pente des talus de barrage (Rolley, Kreitmann et al, 1977)

Hauteur du barrage	Type de barrage	Pente amont	Pente aval
<5	Homogène	1 :2.5	1 :2
	A zone	1 :2	1 :2
5 à 10	Homogène, granularité étendue	1 :2	1 :2
	Homogène, à fort pourcentage d'argile	1 :2.5	1 :2.5
	A zones	1 :2	1 :2.5
10 à 20	Homogène, granularité étendue	1 :2.5	1 :2.5
	Homogène, à fort pourcentage d'argile	1 :3	1 :2.5
	A zones	1 :2	1 :3.0

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

En conclusion, les barrages en terre jouent un rôle crucial dans la gestion des ressources en eau, la lutte contre les inondations et la production d'énergie hydroélectrique. Cependant, ils sont susceptibles de s'effondrer en raison de divers facteurs, notamment des causes naturelles, des défauts de conception, des erreurs de construction et un entretien inadéquat. Il est essentiel de comprendre les causes de rupture et de mettre en œuvre des mesures préventives pour garantir la sécurité et la durabilité des barrages en terre.

L'une des principales causes de rupture de barrage est l'infiltration, qui se produit lorsque l'eau s'infiltré à travers le barrage ou ses fondations. Cette infiltration peut entraîner une érosion interne, un renard et, en fin de compte, une rupture catastrophique. Parmi les autres facteurs contribuant à la rupture, citons la stabilité insuffisante des pentes, le débordement dû à un débit d'eau excessif, l'action érosive des vagues et l'activité sismique.

Plusieurs méthodes peuvent être employées pour prévenir les ruptures de barrage. Tout d'abord, des investigations approfondies du site et des études géologiques et géotechnique doivent être menées au cours des phases de planification et de conception afin d'évaluer les conditions du sol et de la roche et d'identifier les risques potentiels. Des pratiques de conception adéquates, notamment le choix de matériaux et de techniques de construction appropriés, sont essentielles pour garantir l'intégrité structurale du barrage.

La mise en œuvre de mesures efficaces de contrôle des infiltrations, telles que les paroi étanche, l'injection de coulis et les filtres drainant, peut réduire de manière significative le risque d'érosion interne. de rip-rap pour prévenir l'érosion du parement amont. La maintenance et l'entretien réguliers du barrage sont essentiels pour traiter rapidement les problèmes et éviter qu'ils ne s'aggravent. Cela comprend des inspections régulières, l'entretien des déversoirs et des exutoires, la gestion de la végétation et la réparation de tout défaut identifié.

En comprenant les causes de rupture et en mettant en œuvre des mesures préventives, nous pouvons améliorer la sécurité et la fiabilité des barrages en terre, en garantissant leur fonctionnalité à long terme et en minimisant les risques pour la vie humaine et l'environnement.

Référence bibliographique

BIBLIOGRAPHIE

1. abderrezak, b. (2020-2021). Influence de l'érosion interne sur la stabilité des ouvrages (digues et talus) : analyse des processus hydromécaniques.
2. agriculture, u. s. (2016). Part 645 Construction Inspection.
3. belkacem, m. (2009). etude de la position efficace des drains dans les barrage en terre.
4. Dams, U. S. (2011). Materials for Embankment Dams.
5. FEMA. (n.d.). *dam safety*. Retrieved from <https://www.fema.gov/emergency-managers/risk-management/dam-safety>
6. Frevert, R. K. soil and water conservation engineering.
7. garg, s. k. irrigation engineering and hydraulic structures.
8. MOLINARO, C. D.–H. (2016). Phénomènes de boulangerie et d'érosion régressive (renard hydraulique) dans les barrages.
9. Reclamation, U. D. (2012). Design Standards No. 13.
10. réservoir, c. f. (2012). *CFBR*. Retrieved from <https://www.barrages-cfbr.eu/>
11. réservoir, c. f. (2015). Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai.
12. safety, a. o. (n.d.). *dams safety*. Retrieved from <https://www.damsafety.org/>
13. ZAKIA, D. r. Les barrages en remblai de terre.

Résumé :

Les barrages sont des ouvrages destinés pour retenir l'eau, parmi ces barrages : les barrages en terre, conçus par des matériaux qui proviennent de la terre. Ce type de barrages est très ancien. Dans ce présent travail, on a essayé d'éclaircir certains phénomènes de rupture relatifs à ce type de barrages, tels que l'érosion hydraulique, ainsi que la stabilité des talus du barrage. Après avoir connu les causes des ruptures, on a pu parler des méthodes de prévention pour maintenir la stabilité et l'intégrité du barrage comme les drains, le rip-rap, ainsi que le compactage.

Mots clés : barrage, stabilité, infiltration, érosion, glissement, compactage, drain, pente.

Abstract :

Dams are structures designed to hold back water. Among these dams are earth dams, built using materials that come from the earth. This type of dam is very old. In this thesis, we have tried to understand certain phenomena of failure relating to this type of dam, such as hydraulic erosion and the stability of dam embankments. Having identified the causes of failure, we have been able to discuss methods of prevention to maintain the stability and integrity of the dam, such as drains, rip-rap and compaction.

Key words: dam, stability, seepage, erosion, slide, compaction, drain, slope.

: ملخص:

هذا الأرض من تأتي مواد باستخدام بنيت التي ، الأرضية السدود السدود هذه بين من .المياه لسد مصممة هياكل هي السدود التآكل مثل ، السدود من النوع بهذا المتعلقة الفشل ظواهر بعض فهم حاولنا ، الأطروحة هذه في .جدا قديم السدود من النوع وسلامة استقرار على للحفاظ الوقاية طرق مناقشة من تمكنا ، الفشل أسباب تحديد بعد .السدود سد واستقرار الهيدروليكي والضغط ، والرأب ، المصارف مثل ، السد

الكلمات: المنحدر ، التصريف ، الضغط ، الانزلاق ، التآكل ، التسرب ، الاستقرار ، السد