

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



N° Ref :.....

Centre Universitaire de Mila

Institut des Sciences et de Technologie

Département de Sciences et Technique

Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
LICENCE ACADEMIQUE
en Hydraulique
Spécialité : Sciences Hydrauliques

Thème

**LES ORGANES D'ETANCHEITES DANS LES
BARRAGES EN TERRE**

Préparé par :

Derradj Hatem

Mermoune Khaled

Dirigé par :

Mme. Chebbah

Année universitaire : 2013/2014



Remerciement

Remerciement

Nous remercions avant tout DIEU qui nous a donné le courage, la volonté et la patience pour finir ce travail.

Nous tenons particulièrement à exprimer nos vifs remerciements et notre sincère gratitude à notre encadreur **Mme. Chebbah** qui a dirigé ce travail et avoir su nous apporter l'encadrement nécessaire à sa réalisation.

Nous passe un grand remerciement à toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin pour réaliser ce travail.

Enfin un grand merci s'adresse au département de sciences et techniques de centre universitaire de Mila : enseignants, étudiants, employeurs.

HATEM & KHALED

Dédicace

Dédicace

Je voudrais dédier ce modeste travail à ceux qui m'ont donné leur amour, le goût de la victoire, à les bougies qui m'ont éclairé le bon chemin.

À vous ma seule raison de vivre mon père « **TAYEB** » et ma mère « **FATIMA ZOHRA** ». Je vous dis merci.

À mes frères : « Bilal » et « Mohamed Ali ». À mes sœurs : « Besma » et « Amina ». À tous qui ont soutenu le nom **Mermoune** de près ou de loin.

À mon frère, mon proche ami « **Hatem ^_^** ». À mes amis chacun par son nom. À tous ceux que j'aime et m'aiment. À tous mes collègues et ma promotion 2014.

KHALED

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a comblé d'amour et de tendresse, qui m'a éclairé le bon chemin, ma chère mère. À celui qui m'a donné le meilleur de lui-même, mon cher père.

À mes frères : Amine et Walid, et la petite princesse « Yasmine ». À toute ma grande famille.

À mes amis chacun par son nom. À mon ami « **KHALED** ». À tous mes collègues et ma promotion 2014. À tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans ce travail.

HATEM

SOMMAIRE

RESUME

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES BARRAGES

REMBLAIS.....3

❖	Introduction.....	4
I.1.	Types des barrages en terre.....	4
I.1.1.	Les barrages en terre homogènes.....	4
I.1.2.	Les barrages en terre à noyau étanche.....	8
I.1.3.	Les barrages en terre à masque amont.....	10
❖	Conclusion.....	11

CHAPITRE II : LES ORGANES D'ETANCHEITES DANS LES BARRAGES EN TERRE.....12

❖	Introduction.....	13
II.1.	Organes d'étanchéités du corps des barrages en terre.....	13
II.1.1.	Noyau en argile compacté.....	13
II.1.2.	Paroi moulée.....	15
II.1.3.	Masque amont.....	15
II.1.3.1.	Masque en béton de ciment.....	16
II.1.3.2.	Masque en béton bitumineux.....	18
II.1.3.3.	Masque en tôle d'acier.....	19
II.1.3.4.	Masque en membrane souple.....	19
II.1.3.5.	Parafouille.....	21

II.2. Etanchéité des fondations des barrages en terre.....	22
II.2.1. Caractéristiques des fondations d'un barrage en remblais.....	22
II.2.1.1. Sous-sol rocheux.....	22
II.2.1.2. Terrain meuble.....	22
II.2.2. Les organes d'étanchéités des fondations.....	23
II.2.2.1. Ecran vertical.....	23
II.2.2.2. Tapis étanche.....	23
II.2.2.3. Méthode de SOIL MIXING.....	24
II.3. Les risques de rupture des barrages.....	27
II.3.1. Les causes de rupture.....	28
II.3.1.1. Problèmes techniques.....	28
II.3.1.2. Causes naturelles.....	28
II.3.1.3. Causes humaines.....	28
II.3.2. Types de ruptures des barrages.....	29
II.3.3. Obligation d'une carte de risque.....	29
II.3.4. Maîtrise du risque de rupture des barrages.....	29
II.3.5. Surveillance des barrages.....	29
II.3.6. Maîtrise de l'urbanisation.....	30
❖ Conclusion.....	30

CONCLUSION GENERALE.....31

BIBLIOGRAPHIE.....32

LISTE DES FIGURES

Fig.1. Barrage en terre homogène.....	5
Fig.2. Rayon critique pour le calcul de la stabilité.....	5
Fig.3. Prisme de drainage.....	6
Fig.4. Barrage homogène d'un drainage vertical et tapis filtrant.....	6
Fig.5. Lignes d'écoulement à travers la digue en terre.....	7
Fig.6. Barrage d'Aïn Zada, wilaya de Bordj Boueriridj.....	7
Fig.7. Barrage en terre à masque étanche.....	8
Fig.8. Barrage Keddara, wilaya de Boumerdes.....	9
Fig.9. Barrage en terre à masque amont.....	10
Fig.10. Noyau en argile compacté vertical.....	14
Fig.11. Noyau en argile compacté incliné.....	14
Fig.12. Paroi moulée.....	15
Fig.13. Etanchéité à masque amont.....	15
Fig.14. Masque en béton de ciment.....	17
Fig.15. Masque amont en béton bitumineux.....	18
Fig.16. Masque en membrane souple.....	20
Fig.17. Raccordement d'un masque étanche à la para-fouille.....	21
Fig.18. Parafouille avec galerie de visite.....	22
Fig.19. Tapis amont étanche.....	24
Fig.20. Le procédé trenchmix.....	25
Fig.21. Le procédé geomix.....	25
Fig.22. Méthode sèche.....	26
Fig.23. Méthode humide.....	26
Fig.24. Evolution du nombre des grands barrages de 1950-2000 (échelle mondiale).....	27
Fig.25. Accidents de barrages durant le 20 ^{ème} siècle.....	28

RESUME :

Parmi les différents types de barrages réalisés, ceux en terre sont les plus répandus en raison des avantages qu'ils présentent, mais la présence d'une charge hydraulique à leur amont engendre des infiltrations à travers leur corps poreux et leurs fondations.

Après avoir exposé le problème, nous présentons des généralités sur les barrages en terre et nous avons étudié profondément leurs organes d'étanchéité en s'intéressant au problème d'actualité posé par la sécurité des barrages et leur bon fonctionnement.

Dans l'étape suivante, nous présentons tous les étanchéités des fondations des barrages en terre, et le risque de rupture des barrages.

ملخص:

من بين مختلف منشآت السدود، نجد السدود الترابية التي تعد الأكثر انتشارا بسبب مزاياها المتنوعة. غير أن وجود الأحواز المائية في جهتها الأمامية يسبب التسربات خلال جسم السد و أساساته.

بعد طرح الإشكالية، قدمنا عموميات حول السدود الترابية، و تعمقنا في دراسة عناصر الكتامة في جسم السد مع الإهتمام بالمشاكل المطروحة حاليا فيما يتعلق بالأمان و حسن الأداء.

في المرحلة الموالية، تم تقويم جميع عناصر الكتامة المتعلقة بأساسات السدود الترابية و خطر تشقق هذه الأخيرة.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis le début du 20^{ème} siècle la population mondiale n'a cessé d'augmenter et avec l'amélioration du niveau de vie de l'être humain, la demande en eau pour tous les secteurs confondus est en croissance permanente. Ainsi, le problème de satisfaire cette énorme demande demeure au centre des préoccupations de tous les états du monde. Comme les ressources facilement mobilisables n'arrivent plus à satisfaire cette demande, l'attention a été focalisée sur la création de grandes réserves d'eau par le biais de la construction des barrages.

La technologie de construction de barrage est apparue voici près de 5000 ans dans les civilisations fertiles et s'est dispersée pour concerner toutes les parties du monde, a permis de construire des millions de barrages de hauteurs variables, mais il est admis que seuls 36000 barrages ont une hauteur dépassent les 15 mètres.

En très grande majorité, les barrages sont destinés au stockage d'eau potable ou industrielle mais aussi pour l'irrigation. Ils sont aussi réalisés pour contrôler les crues ou produire de l'électricité.

La conception d'un barrage est très complexe car peu répétitive et c'est en fonction des conditions du site, des fondations, des matériaux disponibles et du coût de réalisation que le type de barrage est adopté, et il peut être souple ou rigide. La technique de construction des barrages est devenue un art basé sur des méthodes empiriques de plus en plus perfectionnées au fil du temps mais avec parfois des accidents meurtriers et très destructifs.

La technique de construction des digues en terre est de plus en plus privilégiée, même si elle est récente, elle ne cesse d'évoluer, seulement beaucoup de phénomènes restent non élucidés. Des méthodes ou des doctrines, sont peu ou pas du tout étudiées pour faire l'unanimité tant sur le plan économique que sur le plan de stabilité de l'ouvrage. Ainsi, si l'on se réfère aux statistiques des accidents survenus aux barrages à travers le monde, le problème des infiltrations, renards et sous pressions a causé plus de 40% des accidents recensés.

Les drains dans les barrages en terre sont des éléments constructifs essentiels et indispensables à la lutte contre les problèmes d'infiltration en rabattant la ligne phréatique au maximum pour maintenir une grande partie de l'ouvrage non saturée, ce qui renforce sa stabilité mécanique. Mais pour jouer convenablement son rôle, un drain, doit avoir des dimensions soigneusement choisies et placé à une position admissible sur le plan technique et acceptable sur le plan économique.

En matière d'étanchéité, il s'agit d'une part de réduire les fuites en fondations susceptibles de diminuer la rentabilité de l'aménagement, mais surtout de réduire autant que possible le risque de sous-pressions déstabilisatrices. Les organes d'étanchéités sont d'une grande importance :

- éviter les sols pulvérulents fins et uniformes dans les zones saturées ;
- prévoir un drain cheminée ou l'élargir dans le cas des remblais homogènes ;
- prévoir des zones de transition les plus larges possible ;
- être particulièrement prudent pour l'épaisseur des filtres ;
- placer une couche de sable à l'amont du noyau pour colmater les fissures éventuelles causées par un séisme ;
- réaliser le barrage ou son noyau avec des matériaux présentant une bonne résistance à l'érosion interne.

Dans ce travail on doit citer et expliquer les différents organes d'étanchéité dans les barrages en terre et ses fondations.

Ce travail est organisé comme suit:

- le Premier chapitre : généralité sur les barrages en terre.
- le deuxième chapitre : les organes d'étanchéité dans les barrages en terre.

Chapitre I :

Généralité sur les barrages

remblais.

❖ **Introduction.**

I.1. Types des barrages en terre :

I-1-1 Les barrages en terre homogènes.

I-1-2 Les barrages en terre à noyau étanche.

I-1-3 Les barrages en terre à masque amont.

Conclusion.

Introduction :

On appelle barrages en terres tous les barrages construits avec des matériaux terreux. Cette catégorie de barrages regroupe plusieurs catégories différentes par les types de matériaux utilisés et la méthode employée pour assurer l'étanchéité. Ainsi les matériaux de construction peuvent avoir une granulométrie étendue avec une gamme de grains allant du très fins au grossier.

L'utilisation de matériaux locaux généralement bon marché surtout par une mécanisation presque totale des travaux, au fil du temps imposé le type de barrage en terre comme la solution idéale.

L'utilisation des matériaux locaux généralement bon marché et leurs disponibilités à proximité du site fait que la solution barrage en remblais est intuitivement choisis par rapport aux autres types de barrages considérés rigides et s'adaptent difficilement aux assises non rocheuses.

Les barrages en terre présentent notamment l'avantage de pouvoir reposer sur des fondations de médiocre qualité, c'est-à-dire compressibles. Tous les barrages en terre peuvent être considérés comme des barrages-poids, c'est-à-dire qu'ils résistent à la pression de l'eau par leur propre poids. C'est ce qui explique leur section de forme trapézoïdale.

I.1 -Types des barrages en terre :

Les barrages en terre compactés peuvent être divisés en trois principaux types : les barrages en terre homogènes, ceux à noyaux étanches et ceux à masques amont.

I.1.1- Les barrages en terre homogènes :

Depuis la plus haute antiquité, les hommes ont pétri la terre pour en faire des digues soit le long des cours d'eau en vue de limiter les zones d'inondation, soit en travers pour créer des retenues d'eau potable ou d'eau destinée aux irrigations. Un barrage en terre homogène(Fig1) est le type de barrage le plus simple 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 terre imperméable (typiquement de l'argile). Les parements peuvent comprendre des banquettes intermédiaires appelées risbermes, ce qui améliore encore la stabilité et facilite la surveillance et l'entretien. Comme pour tous les barrages en remblai, ce type de barrage s'accommode de fondations moins performantes que pour les barrages en béton. La conception de ces ouvrages est fortement dépendantes de la quantité de remblai de qualité suffisante disponible sur le site ou à proximité immédiate (les volumes sont tels qu'un gisement éloigné augmenterait fortement le prix du barrage à cause des frais de transport.

Pour faciliter la mise en place du matériau, la terre est corroyée. Elle est aujourd'hui mise en place en couches successives compactées.

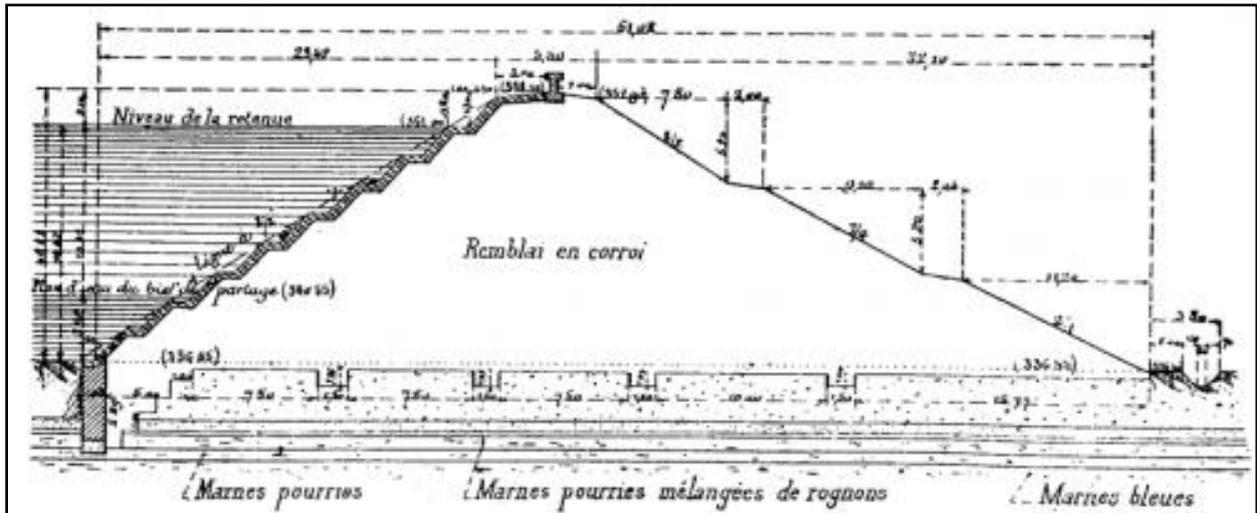


Fig 1 : Barrage en terre homogène

Le développement réalisé au XXème siècle, est issu d'un véritable saut technologique marqué par deux faits principaux :

- le développement de la mécanique des sols, constituée en discipline à part entière à partir de 1930, avec trois grandes étapes : le calcul du réseau de sous-pressions (FORCHEIMER, 1914), le calcul de stabilité (FELLENIUS, 1926) (fig2) et le principe des contraintes effectives (TERZAGHI, 1924) ; (des ingénieurs de l'USBR expliquent cependant en 1960 à la conférence de Boulder que ce n'est qu'à partir de 1937/1938 qu'ils considèrent la pression interstitielle pour expliquer l'instabilité des pentes).

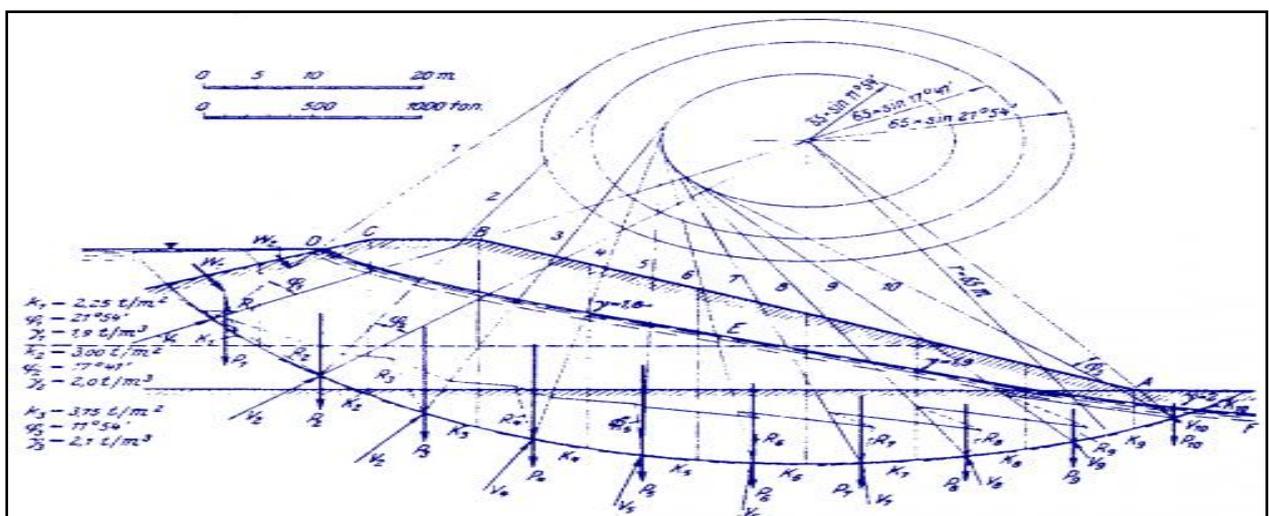


Fig 2 : Rayon critique pour le calcul de la stabilité.

- Le développement d'engins de terrassement de plus en plus puissants, ces dernières années ont rendu possible la mise en place et le compactage de volumes de plusieurs dizaines de millions de mètres cube de remblais, dans les délais rapides.

A partir du modèle simple (massif en terre), plusieurs dispositions ont été utilisées pour améliorer la sécurité des ouvrages :

- Assèchement du parement aval par la mise en place d'un cordon drainant en pied ou par un drain vertical placé au milieu du barrage et dont les eaux de collecte sont ramenées vers l'aval au moyen d'un tapis ou de bretelles drainantes (fig3).

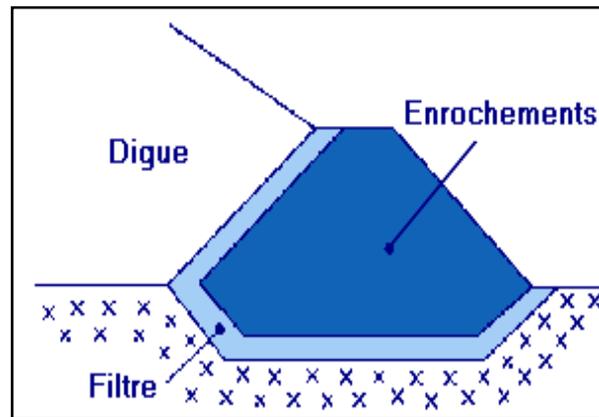


Fig3 : Prisme de drainage.

- Protection de la pente amont pour une pierrée, des dalles non jointives ou des enrochements...etc, pour protéger le remblai contre les effets des vagues (batillage) (fig4). La pente aval est généralement simplement engazonnée en évitant la pousse des arbres dont les racines, cherchant l'eau, pourrait créer un chemin de fuite dangereux.

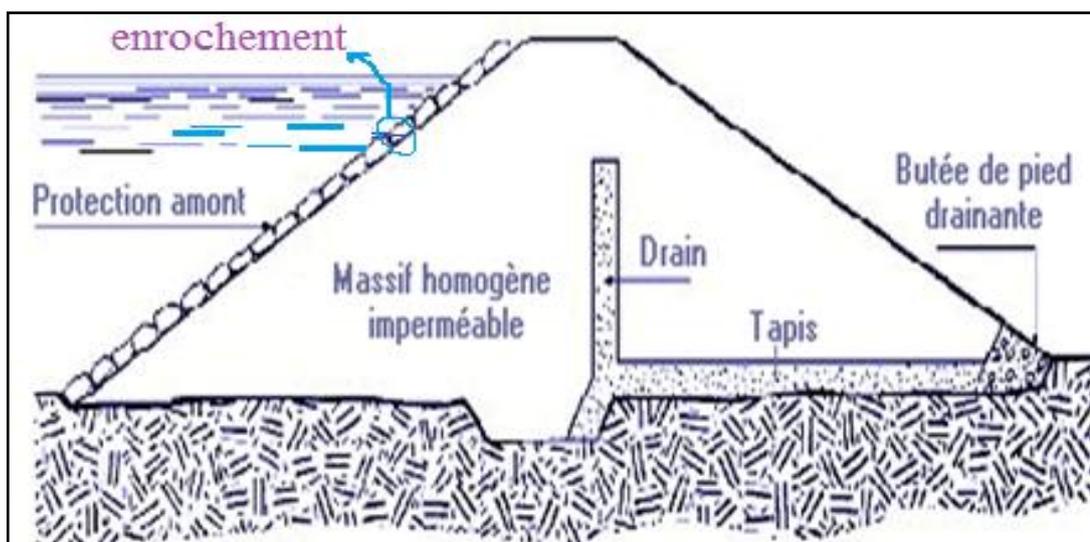


Fig4 : Barrage homogène d'un drainage vertical et tapis filtrant.

- Les concepteurs doivent se prémunir contre deux dangers potentiels :
 - Ces ouvrages résistent mal à une submersion prolongée importante et par conséquent on doit prévoir une revanche suffisante (notamment pour éviter la submersion par les vagues) et prendre des marges supplémentaires pour l'évacuation des crues.
 - La circulation inévitable de l'eau au travers du barrage fait courir des risques d'érosion interne (fig5) (entraînement des particules du matériau par l'écoulement) et il convient de s'en prémunir par un choix judicieux des matériaux et une mise en œuvre soignée.

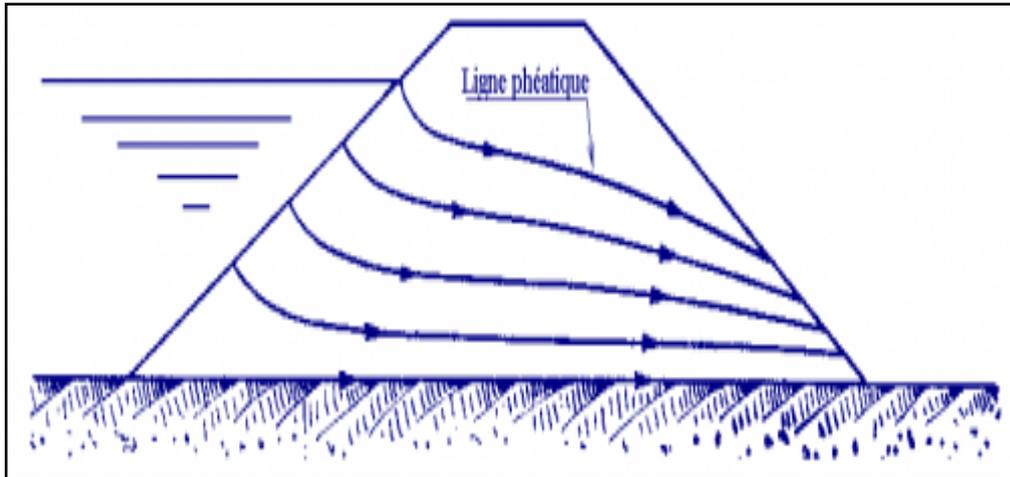


Fig5 : Lignes d'écoulement à travers la digue en terre.

- Simples de conception, les barrages en terre homogènes sont des barrages de taille limitée.

Parmi les barrages algériens les plus hauts de ce type, on peut citer le barrage d'Aïn Zada wilaya de Bordj Boueriridj (50 m) (fig6). La part la plus importants des petits barrages (moins de 10 m de hauteur) sas compter les digues de protection contre les inondations.



Fig6 : Barrage d'Aïn Zada, wilaya de Bordj Boueriridj

❖ **Les avantages et les inconvénients des barrages en terre homogènes :**

-Les avantages :

- Le volume du béton est faible.
- La fouille est assez petite.
- La résistance au séisme est haute.
- Les sous-pressions au niveau de la fondation sont faibles (la surface de la fondation est petite).

-Les inconvénients :

- Les contraintes sont importantes dans le béton et dans le rocher.
- Les forces sont transmises obliquement dans les appuis.
- Moyen risque de tassements.
- L'échauffement du béton par la prise du ciment est à considérer.
- L'intégration de l'évacuateur de crues (grands débits) dans le barrage est difficile.
- Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation est très grand.
- Les sous-pressions dans les fissures du rocher peuvent provoquer des glissements d'appuis.

I.1.2-Les barrages en terre à noyau étanche :

Les barrages zonés (fig7) sont d'une conception bien plus récente et moderne que les barrages simples en terre. Ils séparent les fonctions principales dans des matériaux distincts :

- Une zone centrale, appelée noyau, assure le rôle d'étanchéité, placée au cœur du remblai, elle est constituée de matériaux argileux, imperméable.
- Le noyau est généralement d'épaisseur variable, plus épais à la base à cause des pressions interstitielles plus fortes. Il peut être vertical ou incliné ;
- Des recharges à l'amont et à l'aval du noyau en zone centrale, apporte la fonction de stabilité. Ces massifs plus perméables que le noyau sont réalisés en enrochements, ou en terre plus grossière.

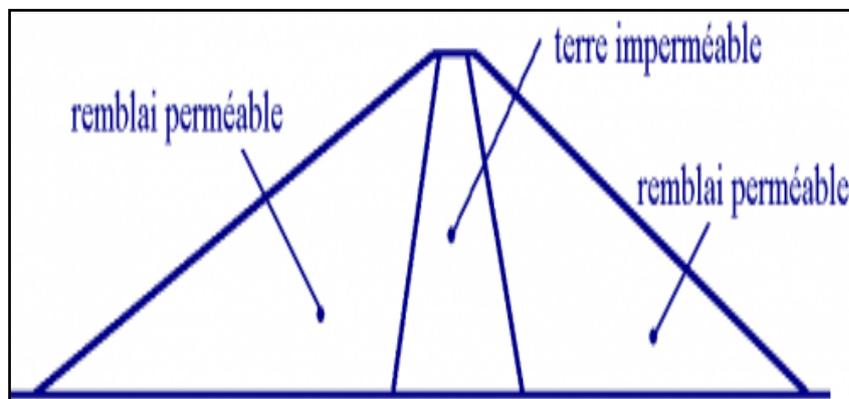


Fig7 : Barrage en terre à masque étanche.

Pour éviter que les particules fines d'argile ne migrent dans les recharges sous l'effet des pressions d'eau qui règnent dans l'ouvrage et donc se prémunir contre des phénomènes d'érosion interne, le noyau est entouré de couches filtrantes. On utilise pour cela des matériaux dont la granulométrie spécialement étudiée est intermédiaire entre la taille très petite des grains d'argile et les grains bien plus grossiers des recharges. Plusieurs couches de filtres successifs peuvent être nécessaires.

Le plus grand barrage du monde, Nurek au Tadjikistan, est un barrage en remblai zoné qui atteint 300 mètres de hauteur, le record aurait dû être détenu par le barrage de Rogoun dans le même pays et qui devait atteindre 335 m. Le record algérien appartient au barrage de Keddara à Boudouaou (W. Boumerdes) (fig8) dans Oued Isère avec 150 mètres de hauteur. Le volume considérable de matériaux à mettre en place a imposé l'ouverture de carrières spéciales, un découpage des recharges avec plusieurs types de remblai.



Fig8: Barrage Keddara , wilaya de Boumerdes.

❖ Les avantages et les inconvénients des barrages en terre à noyau étanche :

- Les avantages :

- Le corps du barrage est très flexible et adaptable aux conditions du terrain.
- Peu susceptible aux tassements et aux séismes.
- Petite à moyenne fouille. La digue n'est pas forcément fondée sur un rocher sain.
- La compression du sol est faible.
- Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation ou du noyau est faible.

- les inconvénients :

- Mise en place de grands volumes de matériaux.
- Le remblai du noyau en argile est influencé par les conditions atmosphériques (climat pluie).

I.1.3- Les barrages en terre à masque amont :

Un barrage à masque (fig9) est formé par :

- Un massif en terre perméable ou en enrochements construit en travers de la rivière avec des pentes de talus assez douces pour assurer la stabilité. Les enrochements ne sont pas imperméables et, à eux seuls, ils sont incapables de retenir l'eau.
- Une couche d'étanchéité appelée masque posée à l'amont du massif en terre perméable ou en enrochement et qui s'appuie sur ce massif. Le masque est étanche sur toute sa surface. Un soin particulier doit être porté à ce que l'étanchéité soit aussi assurée sur la périphérie du masque aussi bien en pied de barrage et dans la fondation qu'en rive pour éviter que le masque ne soit contourné.

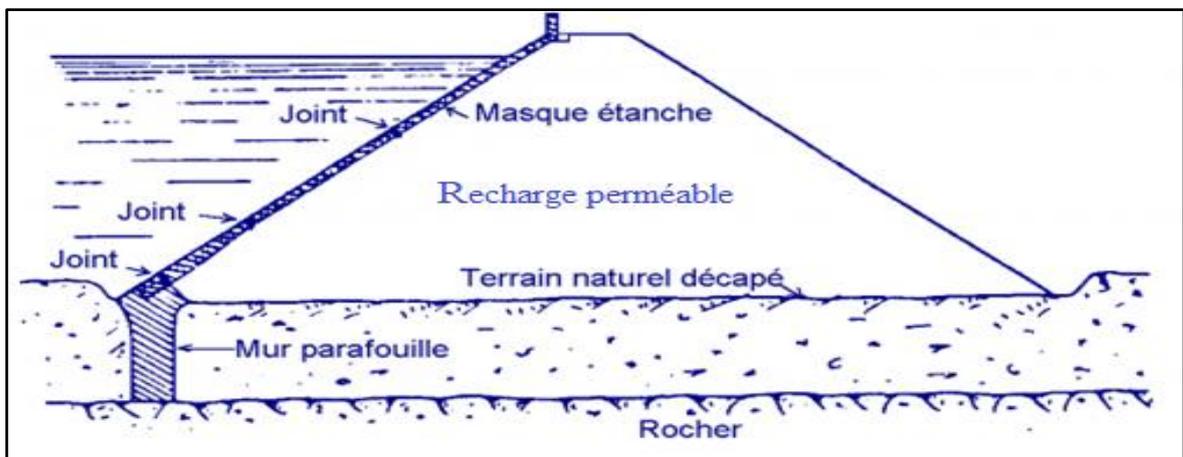


Fig 9 : Barrage en terre à masque amont.

Les barrages en terre perméables ou en enrochements rangés, tiennent avec des talus plus raides et permettent de réduire les volumes à mettre en place.

Ils se tassent d'autant moins que les enrochements sont mieux rangés. Cette technique est aujourd'hui abandonnée pour des raisons de coût de main d'œuvre.

Actuellement la tendance générale est de construire les barrages en enrochements compactés. Grâce au compactage, les tassements des enrochements de bonne qualité peuvent être réduits à de 0.3 à 0.4% de la hauteur du barrage.

Le masque lui-même peut être réalisé :

- Par une dalle de béton armé coulé par plots successifs sur toute la surface du parement amont ;
- Par une ou des couches de béton bitumineux mises en place par des engins similaires à ce qu'on trouve sur des chantiers routiers (adaptés par tenir sur la pente) ;

- Par des géo membranes (typiquement des feuilles de PVC de forte épaisseur) livrées en lés et soudées les unes aux autres.
- Plus rarement par une tôle métallique galvanisée.

On a ainsi construit des barrages de taille considérable. Le record du monde est aujourd'hui détenu par le barrage de Shibuya en Chine avec 233 mètres de hauteur au-dessus des fondations.

❖ **Les avantages et les inconvénients des barrages en terre à masque amont :**

- Les avantages :

- Adaptable aux conditions du terrain.
- Les tassements limités sont tolérables.
- Pas très susceptible au séisme, au dessous du masque, un système de drainage performant est nécessaire à cause de la fissuration.
- Le volume des déblais est moyen.
- Le masque doit être connecté au rocher (directement ou par une para fouillé).
- La compression du sol est faible.

- les inconvénients :

- Mise en place de grands volumes de matériaux.
- Le gradient est très élevé près de la connexion entre le masque et le rocher (parafouille).

Conclusion :

Les barrages en terre peuvent être construits, pratiquement sans limitation de hauteurs et sur des fondations pas suffisamment solides comme pour des barrages en béton.

Ils sont pratiquement les seuls qui peuvent être employés lorsque le sol de fondation est constitué par des matériaux non rocheux, tels que les couches d'alluvions des fonds de vallées. Le corps de l'ouvrage et le masque d'étanchéité peuvent s'adapter aux mouvements du sol de fondation (barrages souples).

Ils présentent cependant, l'inconvénient de nécessiter la mise en œuvre de très grandes quantités de matériaux. Mais les progrès technologiques sur les engins de déplacement des terres se sont traduits par des coûts de plus en plus réduits des barrages en terre, au moment même où le prix de main d'œuvre ne cesse d'augmenter et avec eux le coût des barrages en béton. Ce qui explique les tendances modernes vers les barrages en terres. Par ailleurs, ils sont très vulnérables à la submersion par les eaux de la retenue.

Celle-ci provoque l'entraînement des matériaux du parement aval et conduit à la ruine de l'ouvrage. Par suite, le dimensionnement des ouvrages évacuateurs de crue devra être étudié tout spécialement pour ce genre d'ouvrage.

Chapitre II :

Les organes d'étanchéités dans les barrages en terre.

- ❖ Introduction.
- 1. Organes d'étanchéité des barrages en terre :
 - 1.1. Noyau en argile compacté.
 - 1.2. Paroi moulée.
 - 1.3. Masque amont :
 - 1.3.1. Masque en béton de ciment.
 - 1.3.2. Masque en béton bitumineux.
 - 1.3.3. Masque en tôle d'acier.
 - 1.3.4. Masque en membrane souple.
 - 1.3.5. Parafouille.
- 2. Etanchéité des fondations des barrages en terre :
 - 2.1. Caractéristiques des fondations d'un barrage en remblais.
 - 2.1.1. Sous-sol rocheux.
 - 2.1.2. Terrain meuble.
 - 2.2. Les organes d'étanchéités des fondations.
 - 2.2.1. Ecran vertical.
 - 2.2.2. Tapis étanche.
 - 2.2.3. Méthode de soil mixing.
- 3. Le risque de rupture des barrages :
 - 3.1. Les Causes de rupture.
 - 3.1.1. Problèmes techniques.
 - 3.1.2. Causes naturels.
 - 3.1.3. Causes humaines.
 - 3.2. Types de ruptures des barrages.
 - 3.3. Obligation d'une carte de risque.
 - 3.4. Maîtrise du risque de rupture des barrages.
 - 3.5. Surveillance des barrages.
 - 3.6. Maîtrise de l'urbanisation.
- ❖ Conclusion.

Introduction :

Barrages en remblais sont généralement de faible dureté et donc être plus vulnérable à l'effondrement, les barrages en terre que possible de l'effondrement comme le reste des installations, que ce soit dû à une erreur de conception ou de défauts dans la construction ou à une diminution de l'efficacité. C'est pour ça l'organe d'étanchéité d'un barrage assure la fonction première de l'ouvrage qui est de retenir, de motivation et de la réhabilitation l'eau, la première de l'étanchéité sera de restaurer la fonctionnalité du barrage, comme l'irrigation, la lutte contre les inondations, la production d'électricité et le stockage de l'eau.

La technique de construction des digues en terre est de plus en plus privilégiée, même si elle est récente, elle ne cesse d'évoluer, seulement beaucoup de phénomènes restent non élucidés. Des méthodes ou des doctrines, sont peu ou pas du tout étudiées pour faire l'unanimité tant sur le plan économique que sur le plan de stabilité de l'ouvrage. Ainsi, si l'on se réfère aux statistiques des accidents survenus aux barrages à travers le monde, le problème des infiltrations, renards et sous pressions a causé plus de 40% des accidents recensés.

II.1 Organes d'étanchéité du corps des barrages en terre :

On prévoit un organe d'étanchéité dans un barrage en terre lorsque les matériaux constituant le remblai ne sont pas suffisamment imperméables pour empêcher de grandes pertes d'eau par infiltration.

On rencontre plusieurs types d'organes d'étanchéité, ceux réalisés en matériaux locaux et ceux en matériaux artificiels.

Les techniques les plus couramment mise en œuvre sont les noyaux en matériau argileux compacté, les masque amont en béton de ciment ou bitumineux, il existe néanmoins d'autre technique plus récentes telles que la paroi moulée et les membranes souples...

II.1.1 Noyau en argile compacté :

Le noyau en matériau argileux compacté, disposé verticalement (fig10) au centre du barrage ou en position inclinée (fig11) à l'amont de celui-ci, et qui doit avoir une épaisseur minimale d'autant plus importante que le barrage est haut, on choisit en générale une épaisseur de l'ordre de la hauteur de l'ouvrage.

Vers le sommet le noyau doit être monté au dessus du niveau des plus hautes eaux et pratiquement, compte tenue des remontées capillaires, jusqu'à la crête du barrage, il doit être protégé de la dessiccation à sa partie supérieure pour éviter toute fissure de retrait qui risquerait de se révéler catastrophique cette protection peut être assurée par une couche de sable ou de préférence en traitant le sommet du barrage en chemin avec un enrobé bitumineux.

Latéralement, on dispose de part et d'autre du noyau un drain filtre, vers l'aval pour recueillir les eaux de percolation, vers l'amont pour absorber les eaux de ressuyage après vidange (fig. 10)

Vers le bas, il faut assurer la continuité de l'étanchéité en raccordant le noyau à la fondation imperméable ou au dispositif d'étanchéité des fondations. Le noyau ne doit pas être constitué d'argile pure, trop sujette à des instabilités et au retrait. On adoptera un mélange d'argile, sable et graviers, en proportions convenables.

Le débit de fuite à travers un noyau argileux peut être calculé approximativement, en appliquant la loi de Darcy : $Q = K (H^2/e)$

Avec : Q = débit de fuite par mètre linéaire de barrage en m^3/s .

K = perméabilité du noyau m/s .

H = hauteur de l'ouvrage en m .

e = épaisseur du noyau en m .

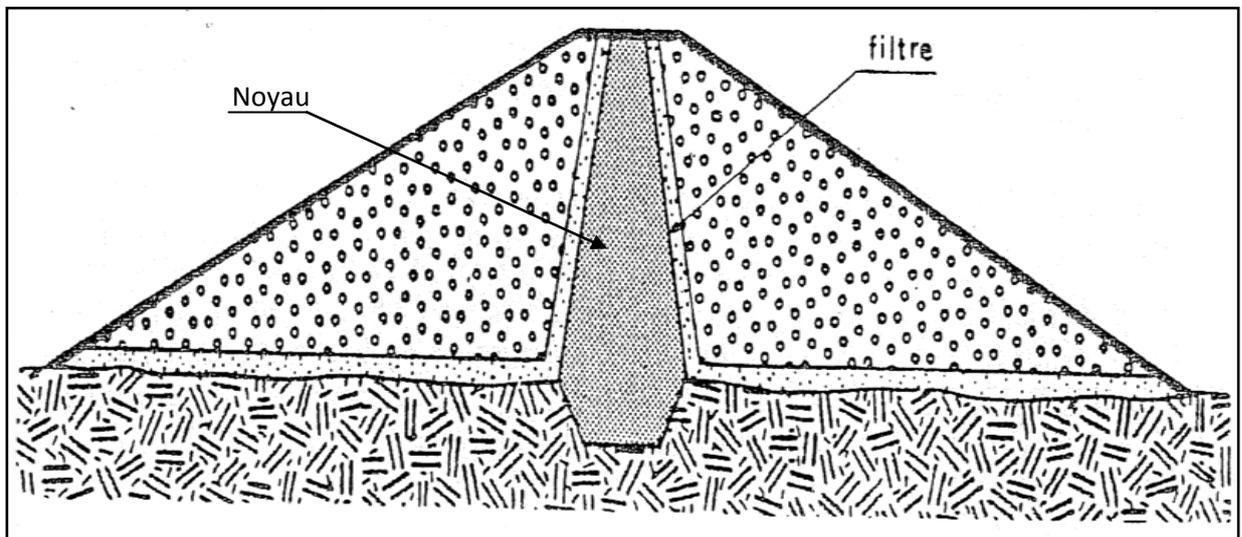


Fig10 : Noyau en argile compacté vertical.

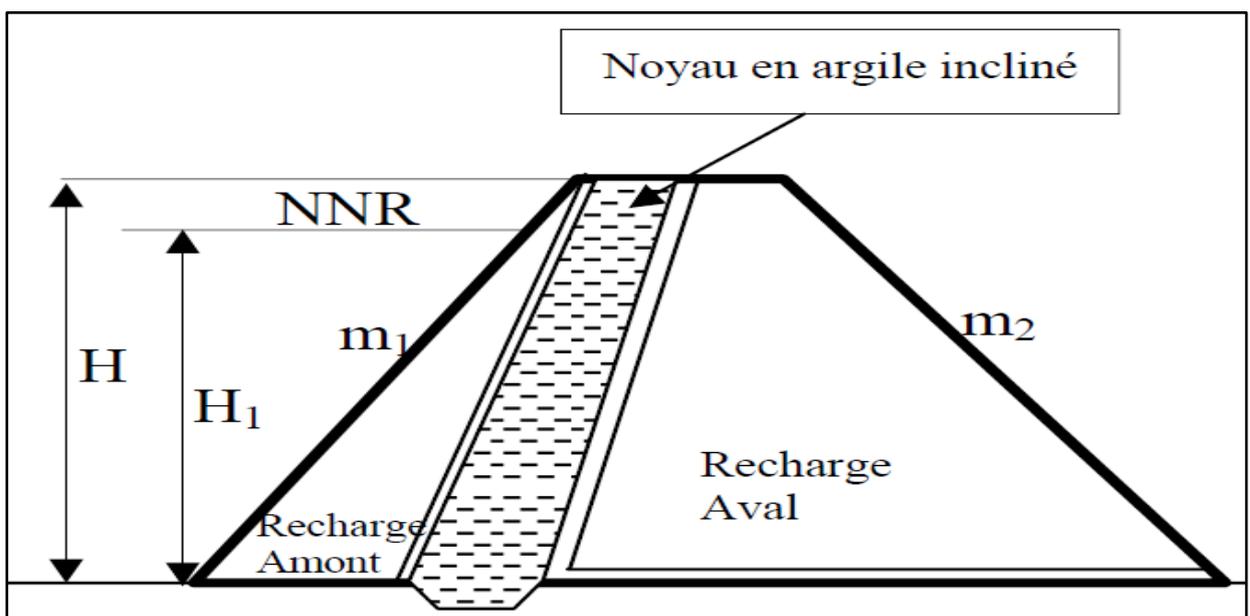


Fig11 : Noyau en argile compacté incliné.

II.1.2 Paroi moulée :

La technique de la paroi moulée utilisée, quand on ne dispose pas de matériau argileux pour faire un noyau compacté, on peut réaliser une excavation à partir de la surface.

La tranchée excavée étant maintenue stable par remplissage au moyen d'une boue bentonitique directement chargée en ciment et qui fait prise en quelques jours, donnant naissance à une paroi étanche de perméabilité de l'ordre de 10^{-8} m/s ; ce mur est suffisamment plastique pour subir d'importantes déformations sans se fissurer.

Les parois peuvent être descendues sans difficulté jusqu'à des profondeurs dépassant 50m dans des terrains alluvionnaires dont les éléments ne dépassent pas 20 à 30 m. sur le plan pratique on réalise le remblai du barrage, puis on exécute la paroi moulée en béton d'argile à partir de sa crête (fig. 12)

Le débit de fuite à travers une paroi moulée est évalué comme dans le cas d'un noyau argileux compacté.

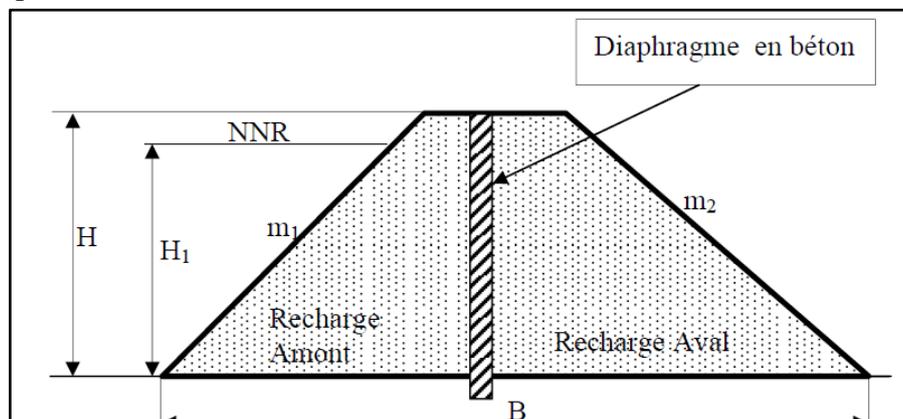


Fig12 : paroi moulée.

II.1.3 Masque amont :

Le masque amont qui constitue l'organe d'étanchéité est classiquement exécuté en béton de ciment, en béton bitumineux ou en géo-membrane. Il a une épaisseur réduite, ce qui lui permet de s'accommoder aux déformations du massif support (fig13).

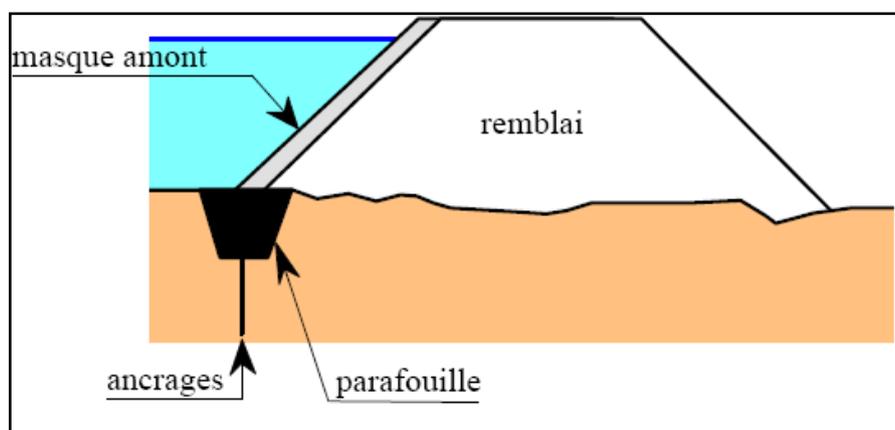


Fig13 : Etanchéité à masque amont.

Lorsque le masque recouvre le parement amont, la totalité du massif intervient dans la stabilité du barrage. S'il est à l'intérieur, seule la partie à l'aval sert complètement à la stabilité de l'ensemble, et la composante verticale (à effet favorable) de la poussée hydrostatique est moins importante.

Le masque amont permet donc en générale d'avoir des pentes plus raides ce qui entraîne des économies de matériaux. D'autre part, il peut être réalisé indépendamment du massif.

Ceci est un gros avantage sur le plan de l'organisation du chantier car si l'avancement du massif mené avec de gros moyens pour être économique va général très vite, la mise en place du masque, relativement délicate, est beaucoup plus lente.

Le masque interne est évidemment mieux protégé contre les intempéries, les variations de températures et le rayonnement solaire, par contre les réparations ultérieures sont pratiquement impossibles.

De plus le chantier est plus difficile à mener car il faut monter le masque en parallèle avec les deux massifs d'enrochement de part et d'autre.

Finalement le choix est fonction de critères économiques locaux.

II.1.3 .1 Masque en béton de ciment :

Le type de masque amont le plus ancien est le masque en béton de ciment. Ce type de masque ne convient pas aux barrages en terre, relativement souple, du fait de la rigidité du masque qui suit les déformations du barrage. En outre les masques en béton de ciment sont sensibles aux agressions extérieures et notamment à celle de l'eau dont les caractéristiques chimiques doivent être prises en compte. Ce type de masque est utilisé sur les barrages en enrochements.

La solution préconisée est celle de la dalle découpée par des joints munis de lames d'étanchéité. Les joints sont parallèles et perpendiculaire aux lignes de plus grande pente du parement. Ces joints, outre leur rôle pour limiter les effets du retrait du béton, permettent au masque de résister à une série de déformations de flexion et de compression.

- ✓ Une flexion générale correspondant au déplacement du massif vers l'aval ;
- ✓ Des flexions locales produites par les irrégularités de tassement. Le massif a tendance à ne reposer que sur quelques joints au lieu d'être entièrement appliqué à la surface du massif.

On diminue au maximum les irrégularités en réalisant à l'amont des enrochements arrimés dans lesquels les vides sont remplis au lieu de pierre de différentes tailles.

Pour chaque bande parallèle à la ligne de plus grande pente, une flexion de flambement due aux variations de température apparaît lorsque la retenue est vide, pour minimiser cette déformation, il ne faut pas faire des bandes trop longues, et ménager des joints de dilatation.

Les contraintes de flexion ayant une intensité proportionnelle à l'épaisseur du masque celui-ci devra avoir l'épaisseur minimale compatible avec les conditions d'exécution en particulier en ce qui concerne les distances entre les bords et les armatures

En plus de ces déformations de flexion, il se manifeste une compression parallèle au masque causée par le tassement du massif, ce tassement à un composant parallèle au parement amont et dirigée vers la fondation.

Cette compression n'apparaît évidemment que s'il y a frottement entre le massif et le masque connaissant le coefficient de frottement masque /massif on peut évaluer l'ordre de grandeur des contraintes de compression qui en résultent cette valeurs est élevée on cherche à la diminuer en s'arrangeant pour que le coefficient de frottement soit faible pour éviter les flambements et les contraintes élevées de flexion qui en résultent, on prévoit souvent un parement amont à fruit variable et concavité tournée vers l'amont.

De toute façon, pour résister à ces efforts le béton du masque doit être armé avec 2 couches d'armature l'épaisseur est de l'ordre de 1% de la hauteur maximale, sa valeur minimum étant de 20cm le pourcentage d'acier varie de 0,5 à 1%.

La dalle n'étant jamais étanche, il est nécessaire de prévoir un système de drainage, une solution consiste à placer un drain de 8cm de diamètre tous les 1,50 m derrière le masque, les eaux étant évacuées par un gros collecteur à la base dans le mur para-fouille.

Une dalle de béton armé est réparable, les fissures doivent être rapidement, rebouchées pour éviter la corrosion des armatures, il existe des produits bitumineux ou plastique spécialement conçus pour obstruer les fissures.

En général il se compose de dalles préfabriquées ou coulées sur site avec des joints de dilatation qui atténuent l'effet des déformations du béton (fig14).

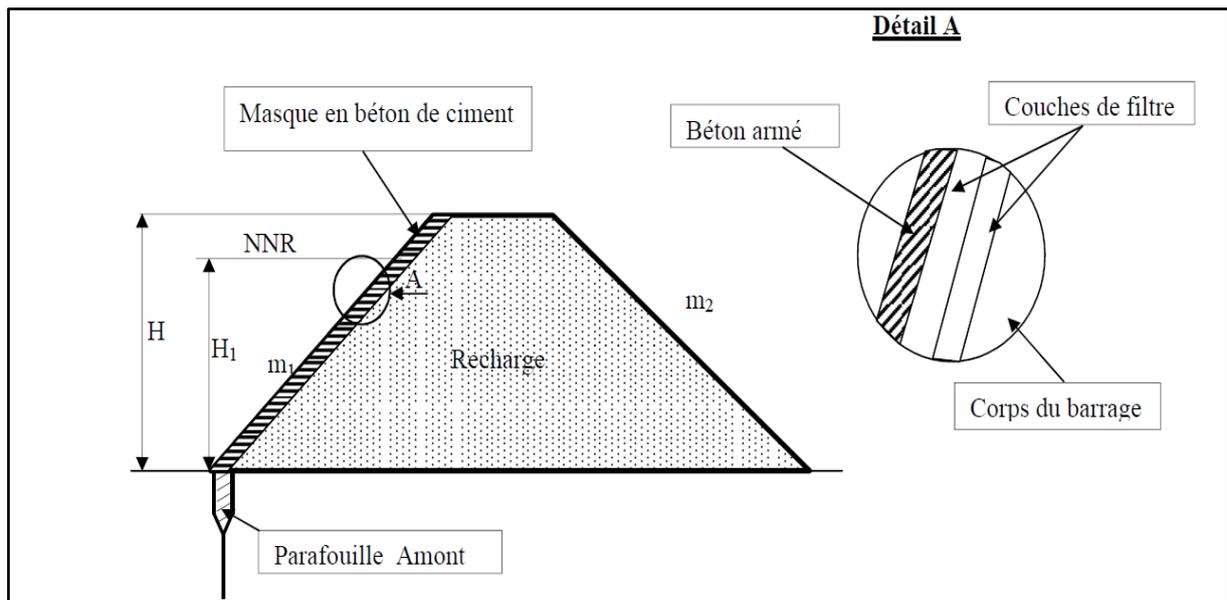


Fig14 : Masque en béton de ciment.

II.1.3.2 Masque en béton bitumineux :

Le masque en béton bitumineux est en générale très efficace du point de vue de l'étanchéité est d'autre part suffisamment élastique et plastique pour suivre les déformations du massif qui le forme sans se dégrader. Il est néanmoins sujet au fluage et doit être protégé contre le vieillissement est assez aisément réparable en cas de déchirure. , La pente du talus amont ne doit pas être inférieure à 1/1,5 en vue de permettre la mise en place du masque, de limiter les contraintes sur celui-ci et la tendance au fluage, il est conseillé de prévoir une pente de 1 /2 pour faciliter la mise en place.

Le masque en béton bitumineux le plus complet se compose d'une couche de béton bitumineux filtrant (binder) de 4 à 5 cm d'épaisseur, d'une couche de binder drainant de 10 à 12 cm d'épaisseur ,de 2 couche de béton bitumineux étanche de 6 cm d'épaisseur chacune, et d'une couche de finition de peinture de protection thermique superficielle (fig.15).

En ce qui concerne la composition des différentes couches, on pourra se réfère aux compositions ci après, à titre indicatif :

- ✓ Binder filtrant formé d'enrobe bitumineux de perméabilité voisine de $(10^{-4} \text{ à } 10^{-5}) \text{ m/s}$, gravillons concassée (calcaires de préférence) de 2 /10 mm (56%), de sable de 0 /2 mm (44%).
- ✓ Bitume de 60 /70 d'indice de pénétrabilité de (4 à 5%)du poids granulat.
- ✓ Binder drainant de perméabilité de l'ordre de $(10^{-2} \text{ à } 10^{-3}) \text{ m/s}$.
- ✓ Gravillons concassés (calcaire de préférence) de 2 /20 mm (85%), sable de 0/2mm : (15%)
- ✓ Bitume de 60 /70 : (3%) du poids de granulat.
- ✓ Béton bitumineux étanche de perméabilité de l'ordre de 10^{-9} m/s .
- ✓ Gravillon concassés (calcaire de préférence) de 0 /12mm (85%).
- ✓ Sable 0 / 5mm, roulé (15%).
- ✓ Filtre total (élément fins de moins de 1mm) contenu dans les gravillons et le sable (13%) bitume 60/70, 8 ,5 à 9% du poids de granulat.
- ✓ Le brai vinyle, mélange de brai de cokerie, de plastifiant et de chlorure de polyvinyle, permet de remplacer les 2 couches étanches bitumineuses par un revêtement monocouche de (7 à 9) cm d'épaisseur.

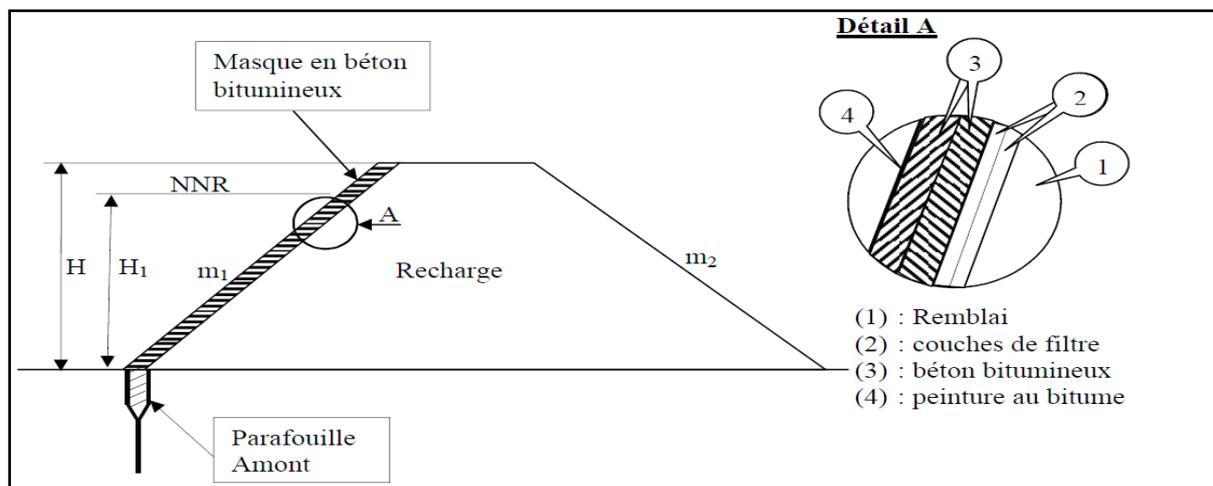


Fig15 : Masque amont en béton bitumineux.

II.1.3.3 Masque en tôle d'acier :

La tôle d'acier est très résistante mécaniquement suffisamment déformable et complètement étanche, les problèmes de corrosion pouvant être surmontés (peinturer bitumineuse, protection cathodique, nuance d'acier peut ou pas oxydable), cette solution peut être intéressante, elle néanmoins très chère.

Il existe des barrages américains équipés d'une telle protection depuis plus de 60ans l'expérience prouve que la corrosion y est très faible.

La structure est formée de plaques d'épaisseur minimum de 6 mm, de 3 m suivant la ligne de plus grande pente, sur 8 m horizontalement. Ces plaques sont ancrées dans le massif par leur milieu, réunies par des joints de dilatation, parallèles aux lignes de plus grande pente et raidies la même direction par des fers plats soudés.

Le talus amont est préparé comme pour recevoir un masque de béton armé.

II.1.3.4 Masque en membrane souple :

Les membranes souples (fig16) constituent des procédés d'étanchéité relativement récents qui peuvent s'accommoder des déformations parfois importantes du massif support. Certaines d'entre elles offrent une assez bonne résistance chimique et mécanique, toutefois elles sont généralement sensibles aux poinçonnements et aux chocs pouvant provoquer des déchirures, ce qui conduit à interdire les supports à grains anguleux et à limiter la vitesse de l'eau à leur contact, certaines membranes, en particulier les membranes bitumineuses, sont sensibles au développement de végétations à partir de racines ou de graines sous les revêtements, ce qui impose des précautions particulières.

Les principaux produits utilisés sont les élastomères et notamment le butyle de caoutchouc, les matières plastiques et les produits bitumineux.

- **Le butyle-caoutchouc** est un matériau intéressant en raison de sa résistance mécanique élevée, sa grande élasticité, de son inertie chimique à peu près complète et de sa très grande imperméabilité, c'est un caoutchouc synthétique vulcanisé, il se présente en feuilles en 3 épaisseurs, 1mm, 1,5mm et 2mm, et sous forme de rouleau de 1m à 1,80 m de large sur 20 à 50 m de long, les feuilles peuvent être soudées en usine sous formes de lés plus importants adaptés au projet.

La mise en place est relativement aisée : les feuilles ou surfaces préfabriquées sont déroulées sur le support préalablement expurgée des éléments durs et anguleux, et soudées, soit à froid au moyen de bandes adhésives et de colle soit par vulcanisation au moyen d'un appareil de chantier spécial, la soudure par vulcanisation a une meilleure résistance mécanique la soudure à froid et doit être pratiquée de préférence.

Malgré la bonne résistance mécanique du butyle, il est recommandé de protéger la feuille d'étanchéité contre les agressions mécaniques extérieures par un revêtement de sable et enrochements ou de dallâtes de béton préfabriquées, néanmoins les réparations locales sont relativement aisées si le revêtement butyle est accessible et on peut, dans certains cas, éviter la protection mécanique .

Il existe d'autres films ou feuilles minces en élastomères ou matières plastiques, d'épaisseur comprise entre (0,5 et 2) mm. Ces feuilles, très souples, sont souvent armées .elles sont néanmoins fragiles et doivent toujours être mises en œuvre avec beaucoup de soins et être protégées extérieurement dans la plupart des cas.

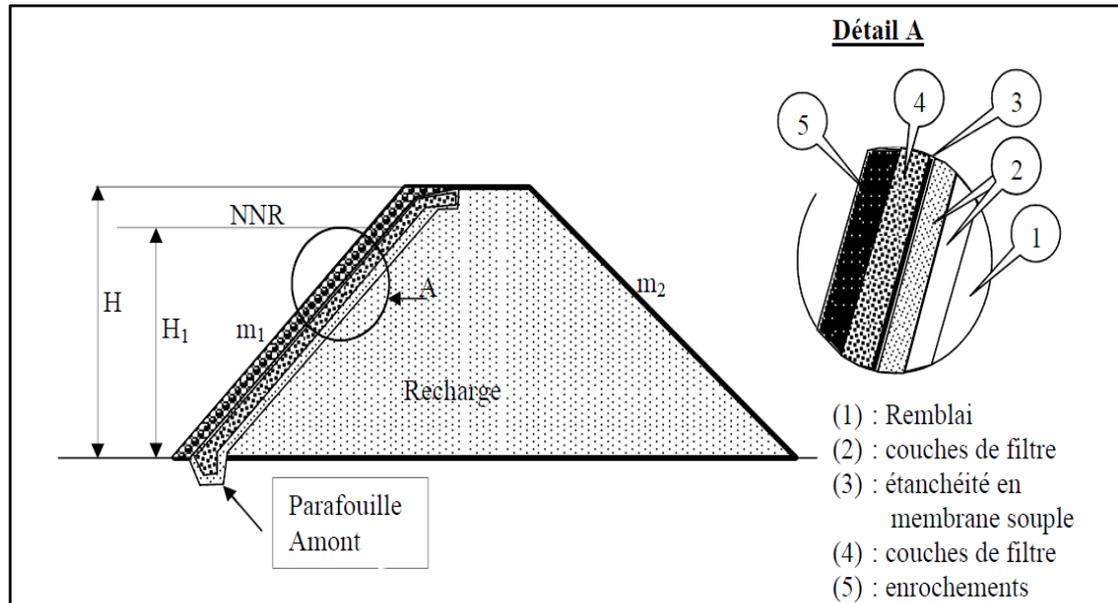


Fig16 : Masque en membrane souple.

- **Les membranes en bitume enterrées** sont réalisées par épandages de bitume à chaud directement sur le talus, en plusieurs couches .La résistance de la membrane est renforcée par armature tissus de verre, feutres synthétiques placée entre les couches de bitume. La membrane de (6 à10) mm d'épaisseur est protégée par une recharge en matériaux terreux ou en tout venant.

Les membranes en bitume sont souvent utilisées pour étancher les bassins de retenue. Les pentes des berges à étancher ne doivent être supérieures à 1 /2.

- **Les membrane bentonitique** c'est une méthode plus ancienne, mais efficace, assez bon marché, et encore utilisée pour étancher les fonds de retenue, s'obtient, soit en couche de bentonite pure, à raison de 4kg/m², soit en mélange avec le sol naturel s'il y prête, ou avec du sable, elle doit être protégée par une recharge.

Étant donné les faibles caractéristiques mécaniques de la bentonite, son emploi en couche pure est déconseillé sur les pentes, sauf si elles sont extrêmement faibles sur des talus à pente faible, il est conseillé d'utiliser plutôt un mélange de bentonite et de sable, ayant un angle de frottement interne suffisant.

Il existe des procédés récents qui consistent à utiliser des mélanges de polymères synthétiques gonflables à l'eau et de bentonite. On obtient ainsi une meilleure liaison de l'étanchéité et du sol support ce qui donne une bonne imperméabilisation.

II.1.3.5 Parafouille

La liaison entre le masque étanche et le rideau d'étanchéité des fondations se fait par l'intermédiaire d'une para-fouille et doivent être traité avec beaucoup de soin.

Il faut éviter les raccords perpendiculaire, et aménager des surface de raccordement tangentielle et arrondies en prévoyant des surépaisseurs de béton bitumineux au niveau des raccords, et un ouvre joint de surface de part et d'autre de ces raccords, (fig17) le couvre joint peut être constitué par exemple de deux couches de toile de verre imprégnées de bitume et collées par un bitume chaud sur une largeur de 2 à 3 m ,en cas de fuite au niveau du raccord masque – para-fouille , le gradient hydraulique vers le drain et le massif perméable étant élevé il peut se forme rapidement un renard important.

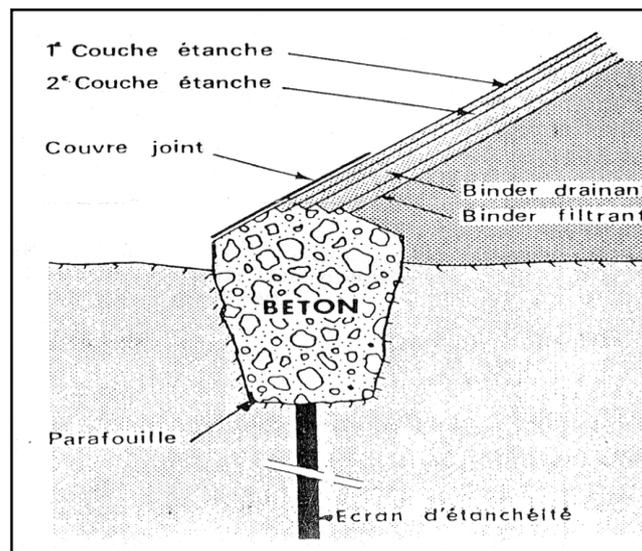


Fig17 : raccordement d'un masque étanche à la para-fouille.

Ce raccordement doit être plus ou moins articulé. Si la fondation est très rigide (rocher), le para fouille est fixe et le masque suit le massif dans ses déformations. Si la fondation est compressible, la para-fouille a tendance à s'enfoncer et à se déplacer vers l'amont.

On comprend pourquoi, si le masque est trop rigide, l'étanchéité est difficile à réaliser, et si une fuite se produit, le gradient vers le drain et les enrochements est énorme (trajet très court).

En cas de fondation alluvionnaire, une telle fuite peut entraîner, en un temps très bref, la ruine complète de l'ouvrage. A chaque fois qu'on le peut, il y a intérêt à mener la para fouille jusqu'au rocher sain.

Dans le cas des ouvrage importants, la para-fouille est un organe complexe avec galeries de visite ou débouchent les drains (Fig. 18).

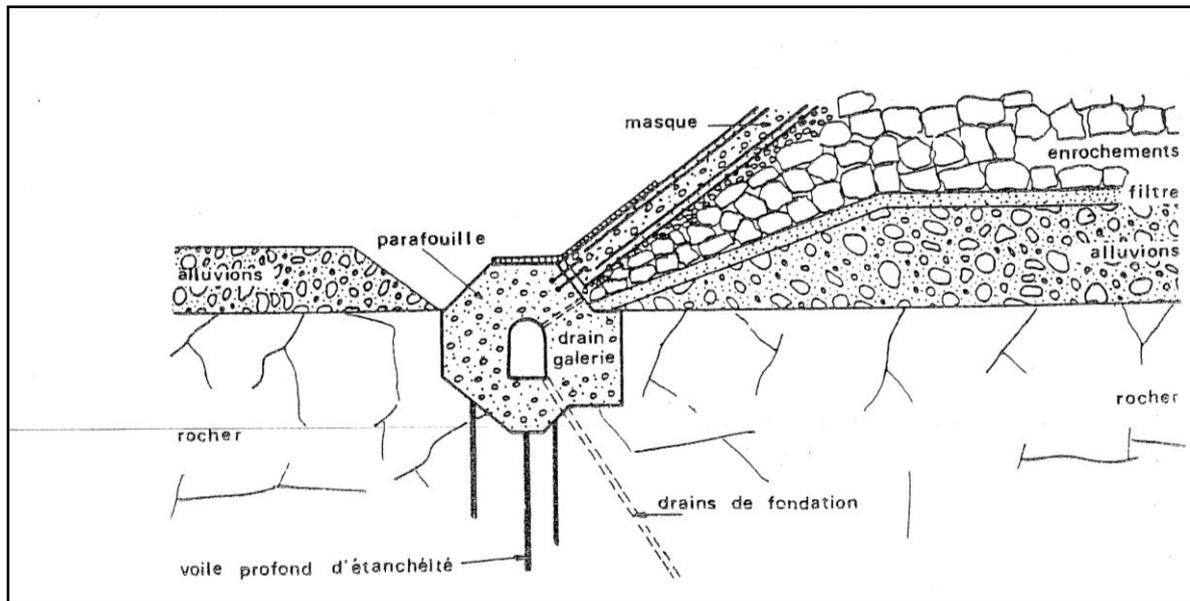


Fig. 18: para fouille avec galerie de visite

II.2 Etanchéité des fondations des barrages en terre :

Lorsque les fondations du barrage sont imperméables, il suffit d'assurer la liaison entre le massif du barrage et sa fondation en réalisant un ancrage du dispositif d'étanchéité pour empêcher les infiltrations suivant la ligne de contact entre le barrage et sa fondation.

Dans le cas où les fondations sont perméables, leur traitement est indispensable pour les rendre étanches. Ce traitement est fonction de la nature des matériaux les constituant et de leurs profondeurs.

II.2.1 Caractéristiques des fondations d'un barrage en remblais

II.2.1.1 Sous-sol rocheux

- Faille traversant la fondation (active ou non) ;
- Orientation et nature des discontinuités (fissuration, stratification) ;
- Nappe phréatique ;
- Perméabilité (perte d'eau) ;
- Comportement à long terme sous l'effet d'une percolation (érosion interne ou dissolution) ;
- Déformabilité et résistance au cisaillement dans les différentes directions.

II.2.1.2 Terrain meuble

- Déformabilité et résistance au cisaillement des différentes couches ;
- Perméabilité horizontale et verticale des différents matériaux ;
- Nature de l'hétérogénéité du sol (couche, lentilles) ;
- Teneur d'eau ;
- Nappe phréatique.

Lorsque les fondations du barrage sont suffisamment imperméables, la liaison barrage-fondation est réalisée par une tranchée d'ancrage remblayée en matériau étanche, destinée à éviter les infiltrations préférentielles le long du barrage-fondation.

Si les fondations comportent une ou plusieurs couches perméables deux solutions sont possibles : réaliser un écran vertical coupant complètement ou partiellement la couche imperméable, ou réaliser un tapis étanche horizontal.

II.2.2 Les organes d'étanchéités des fondations :

II.2.2.1 Écran vertical

Les coupures verticales peuvent être réalisées comme suit, selon la profondeur des couches à recouper :

- ✓ Réalisation d'une tranchée remplie de matériau argileux compacté sous le massif du barrage en prolongement du noyau s'il en est prévu .
- ✓ Exécution d'une paroi moulée en béton d'argile dans le prolongement de l'organe d'étanchéités du barrage.
- ✓ Exécution d'un rideau d'étanchéité constitué de palplanches battues ou d'injection de ciment dans le prolongement de l'étanchéité du barrage.

Lorsque le substratum imperméable est très profond on peut envisager de réaliser une coupure partielle, celle-ci doit recouper la couche perméable sur une profondeur suffisante pour être efficace le débit de fuite en profondeur devra être évalué pour arrêter la profondeur de l'étanchéité.

II.2.2.2 Tapis étanche

Un tapis d'étanchéité horizontale amont (Fig19) peut remplacer l'écran vertical.

Le rôle du tapis est de diminuer les fuites et les risques de renard, en allongeant vers l'amont les lignes d'infiltration. Un tapis vers l'aval serait beaucoup moins stable, car il serait soumis à de fortes pressions.

Le tapis peut être constitué d'un corroi argileux de 0,60 m d'épaisseur au moins, compacté avec soin il est néanmoins difficile d'obtenir une bonne étanchéité au moyen d'un tel tapis. Il est donc recommandé, comme indique précédemment (membrane benthonique) d'adjoindre aux matériaux argileux des produits d'étanchéité tels que des polymères synthétiques et de la bentonite, qui améliorent la continuité et l'efficacité du tapis étanche.

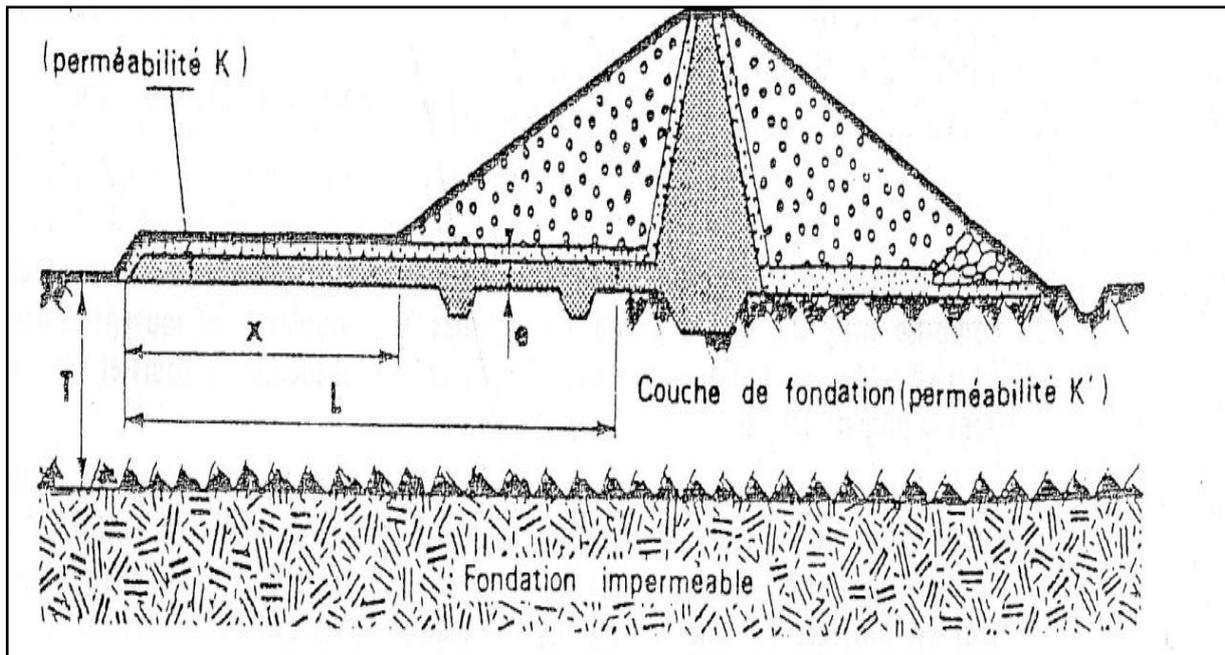


Fig. 19 : Tapis amont étanche.

L'épaisseur du tapis peut être calculée par la formule : $E = x L / T * K / K'$

K = perméabilité du tapis étanche.

K' = perméabilité des fondations.

Si la fondation est fortement drainante, il y aura lieu d'interposer un filtre entre la fondation et le corroi argileux. Il est enfin recommandé de protéger le corroi par une recharge de 0,60 m afin d'éviter la dessiccation et la fissuration du tapis lors des vidanges, ainsi que son attaque par les animaux fouisseurs il est en général onéreux et difficile de réaliser correctement un tapis étanche argileux homogène sur de grandes surfaces.

Le tapis peut également être constitué d'une membrane enterrée (bentonite, membrane, bitumineuse). Le tapis doit être raccordé à l'organe d'étanchéité du barrage.

II.2.2.3 Méthode de SOIL MIXING

Principe développé dans les années 70/80 au Japon et Scandinavie, puis USA, récemment étendu à une large gamme de sols. Cette méthode consiste à traiter un élément de sol (colonnes, éléments linéaires ou tranchées, formes rectangulaires).

- **Principe : Utiliser le sol en place comme matériau de construction :**
 - Déstructuration mécanique du sol avec un outil.
 - Adjonction d'un liant.
 - Malaxage.

➤ **Matériau d'apport :**

Ciment, chaux ou composition particulière pour répondre à des situations ou des objectifs particuliers. Sous forme pulvérulente ou liquide (voie sèche ou humide)

• **Trenchmix :**

Voie sèche ou humide, l'outillage utilisé est de type trancheuse modifiée ; La profondeur maximale = 10m, l'énergie de malaxage répartie sur toute la hauteur, La séquence de construction est continue (fig.20).

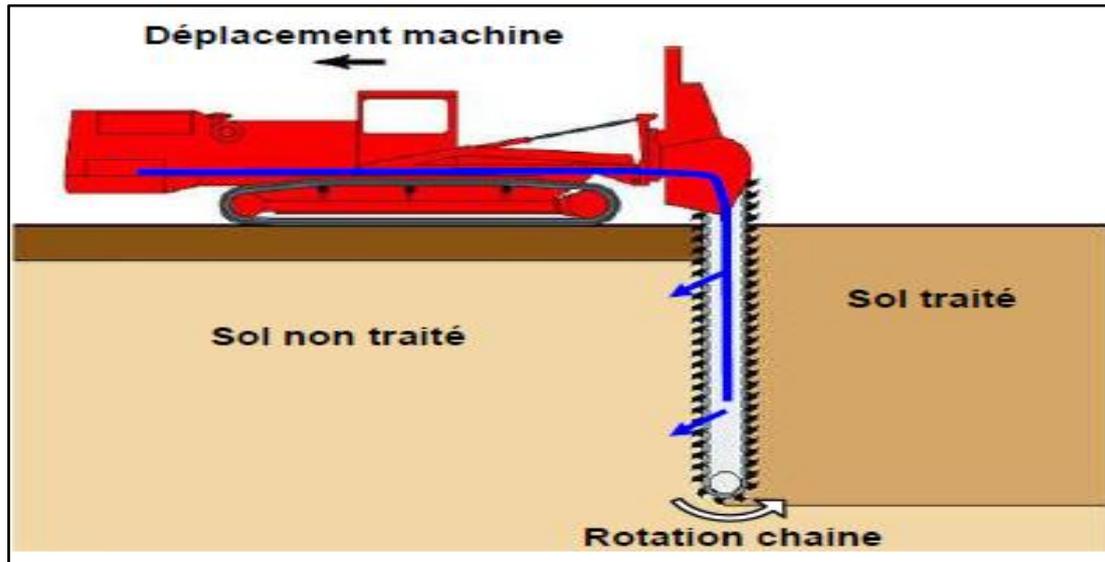


Fig.20 : Le procédé trenchmix

• **Geomix :**

Voie humide seulement. Dérivé de la technologie Hydro-fraise ; La profondeur maximale = 33m, l'énergie de malaxage concentrée ; le phasage en passes primaire / secondaire (fig.21).

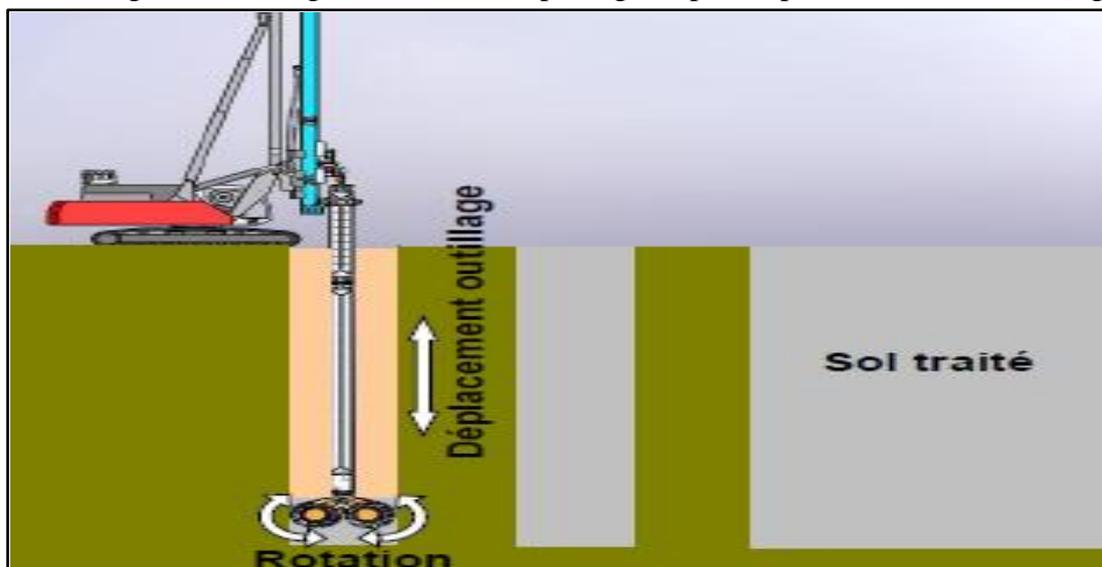


Fig.21 : Le procédé Geomix.

- **Méthode sèche (fig.22)**

- Liant pulvérulent épanché dans une prétranchée réalisée sur la plate-forme;
- Ajout d'eau pour obtenir un bon malaxage et une bonne consistance de mélange.

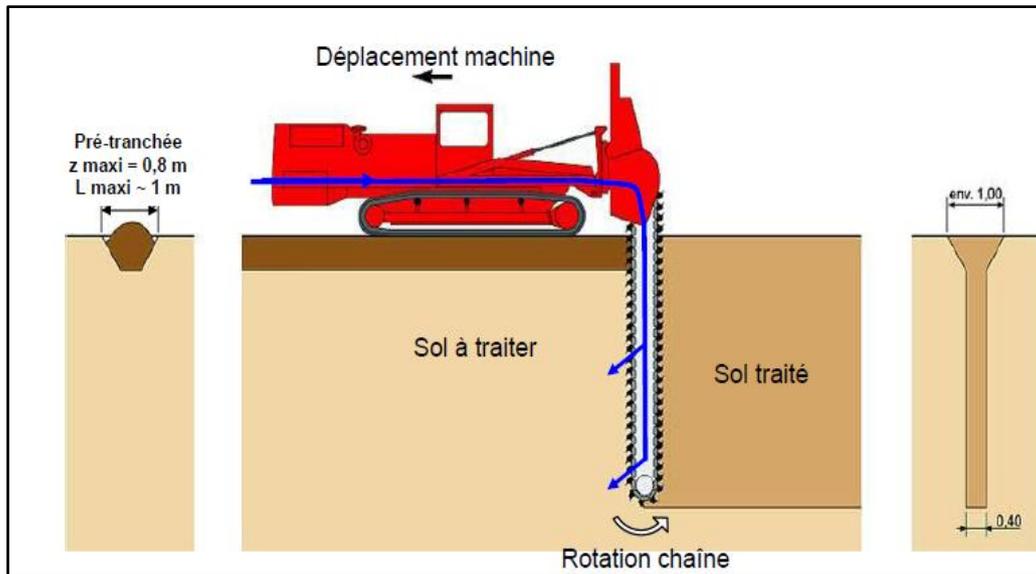


Fig.22 : méthode sèche.

- **Méthode humide (fig.23)**

- Coulis injecté directement au niveau de la lame (à basse pression) ;
- Souvent un coulis stabilisé.

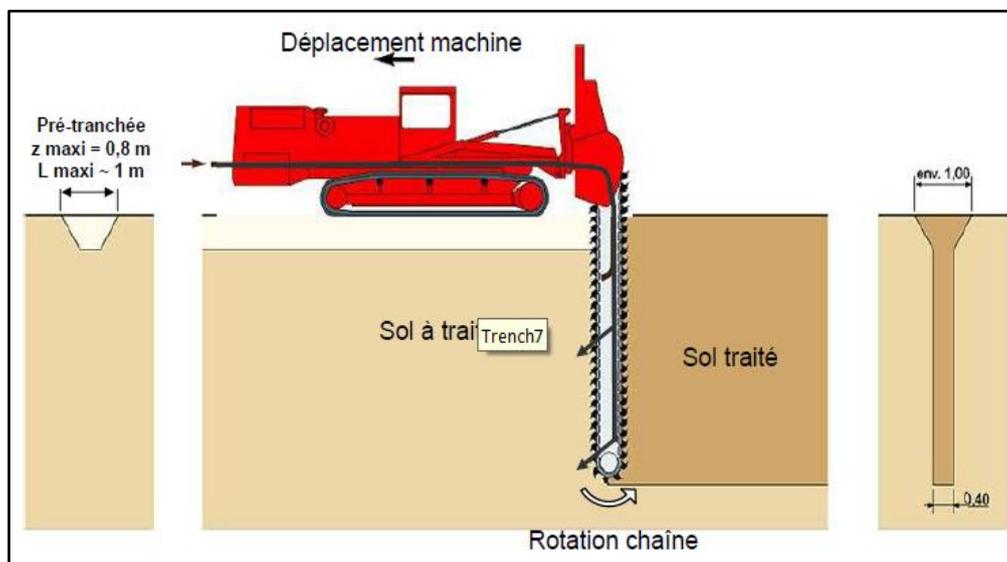


Fig.23 : méthode humide.

Le mauvais choix de l'organe étanchéité conduit directement à l'instabilité des talus en terre par l'effet des eaux infiltrer à l'intérieur de la digue, qui produit une érosion interne et externe, et il agit sur la dégradation du remblais, par conséquent provoquée leur rupture.

II.3. Les risques de rupture des barrages :

Dans le monde, on compte 45 000 grands barrages dont 80 % ont une hauteur inférieure à 30 m et seulement 1 % ont une hauteur supérieure à 100 m (Fig. 24). D'après la commission internationale des grands barrages (CIGB), tout ouvrage de plus de 15 m de haut au-dessus de la surface générale des fondations est considéré comme « grand barrage » ainsi que tout ouvrage dont la hauteur serait comprise entre 10 et 15 m et présentant des caractéristiques particulières : grand réservoir, évacuateur de crues important, etc.

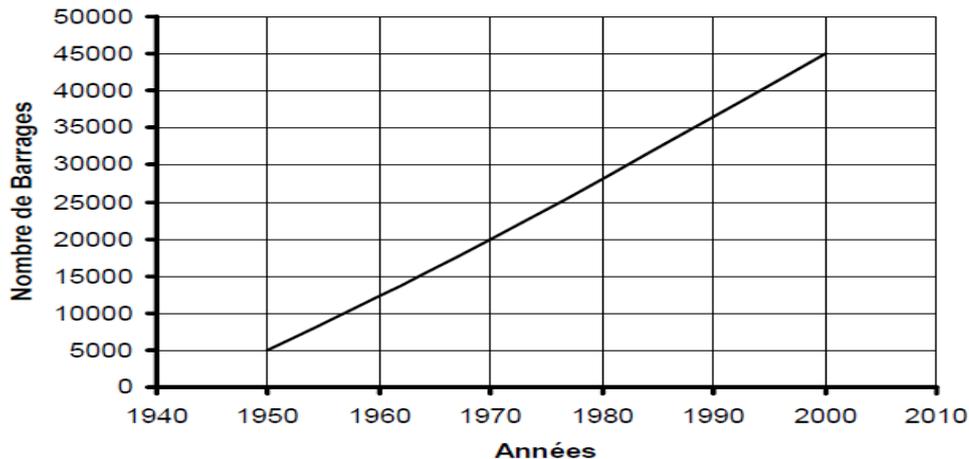


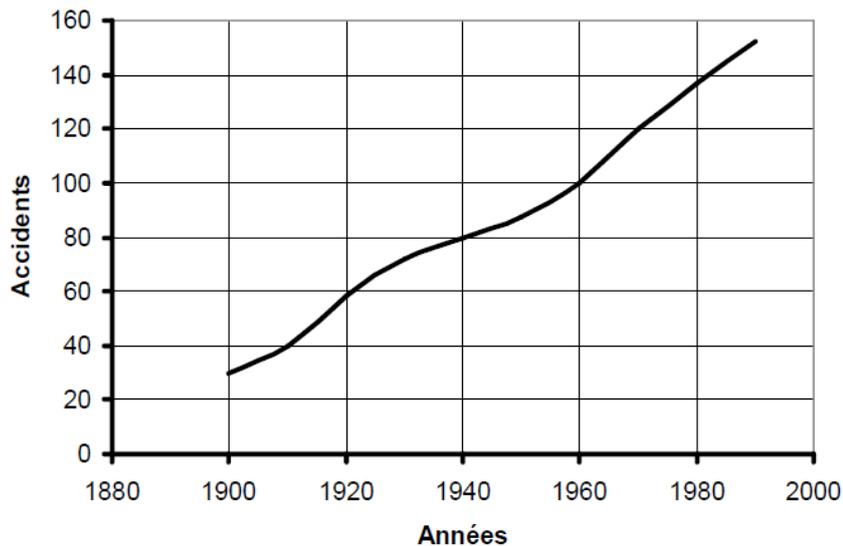
Fig24 : Evolution du nombre des grands barrages de 1950 à 2000 (échelle mondiale).

Le risque de rupture de barrage entre dans la catégorie des risques technologiques. Les causes ainsi que les mécanismes mis en jeu lors d'une rupture sont variables et dépendent des caractéristiques propres du barrage (Fig.25).

Quelques grandes catastrophes mondiales très connues ont fait plusieurs milliers de morts, mais la plupart des ruptures n'ont pas causé de pertes en vies humaines, soit parce que le barrage dominait des régions non urbanisées, soit parce que l'alerte avait été donnée à temps. Ainsi, la rupture du barrage de Teton (États-Unis), le plus haut barrage rompu (93 m), n'a causé que 11 morts.

Cependant, le nombre de personnes qui ont été victimes de ce phénomène est minime lorsque ce chiffre est comparé à ceux d'autres catastrophes plus meurtrières. Cette faible valeur ne doit pas conduire à penser que le risque de rupture de barrage est négligeable car elle est le résultat d'efforts attentifs poursuivis depuis des décennies.

Il convient de souligner les limites de l'analyse du risque de rupture de barrage. En effet, cette analyse repose sur deux éléments qui ne sont connus qu'avec une certaine incertitude : le nombre de grands barrages et le nombre de ruptures observées. La première incertitude est due à une définition plutôt imprécise du terme « grand barrage ». La seconde incertitude, qui porte sur le nombre de ruptures observées, est due au fait que tous les spécialistes n'abordent pas de la même façon le phénomène de rupture.

Fig25 : Accidents de barrages durant le 20^{ème} siècle.

II.3.1 Les Causes de rupture :

II.3.1.1 Problèmes techniques :

Des problèmes techniques peuvent entraîner la rupture d'un ouvrage. Ces problèmes peuvent se présenter sous forme, de défaut de fonctionnement des vannes ou bien un défaut de conception dans la construction, de mauvais choix de matériaux, de type de barrage, de la nature des fondations ou encore de l'âge de l'ouvrage.

Cependant, l'évolution des techniques de construction rend les barrages modernes beaucoup plus sûrs.

II.3.1.2 Causes naturelles :

Les causes naturelles peuvent être à l'origine de rupture de barrage. Il en est ainsi des crues exceptionnelles d'intensité supérieure à celle retenue pour le dimensionnement des évacuateurs de crues.

Les glissements de terrains, qui peuvent toucher l'ouvrage lui-même dans le cas de barrages en remblai ou les terrains l'entourant. Ils peuvent également provoquer la rupture de l'ouvrage par déstabilisation des talus ou par submersion.

Les séismes peuvent causer des dommages non négligeables sur les barrages et le risque sismique est systématiquement pris en compte lors de la conception des ouvrages, même s'il est peu élevé.

II.3.1.3 Causes humaines :

Les accidents dont l'origine sont humaines peuvent se résumer dans : études préalables non approfondies, contrôle d'exécution insuffisant, erreurs d'exploitation, défaut de surveillance et d'entretien ou encore actes de sabotage.

II.3.2 Types de ruptures des barrages :

La rupture est liée à une évolution plus ou moins rapide d'une dégradation de l'ouvrage susceptible d'être détectée par la surveillance et l'auscultation. Les barrages en remblai peuvent être touchés par une rupture progressive, causée par un phénomène d'érosion externe ou interne. L'érosion externe est engendrée par des circulations d'eau sur la crête de l'ouvrage. Le phénomène peut durer quelques minutes à quelques heures selon la taille des matériaux, leur cohésion, le revêtement de la crête et la hauteur de l'eau qui s'écoule au dessus du barrage. L'érosion interne correspond à l'entraînement des matériaux au sein du corps de l'ouvrage ou de sa fondation. Elle est provoquée par des percolations excessives à travers l'ouvrage. Le conduit de fuite s'agrandit par érosion jusqu'à provoquer l'effondrement de la structure.

II.3.3 Obligation d'une carte de risque :

La rupture de barrage engendre la formation d'une onde de submersion, à l'origine d'une élévation brutale du niveau de l'eau à l'aval. Une carte de risque représente les zones menacées par l'onde de submersion qui résulterait de la rupture totale ou partielle de l'ouvrage. Cette carte est réalisée à partir de simulations sur ordinateur. Elle détermine à l'avance, dès le projet de construction, quelles seront les caractéristiques de l'onde de submersion : hauteur de l'eau, vitesse, temps de progression de l'onde, amortissement, etc., en tous points de la vallée, en y faisant figurer les enjeux et les points sensibles, ainsi que tous les renseignements indispensables à l'établissement des plans de secours et d'alerte.

L'onde de submersion, par sa force intrinsèque, occasionne d'énormes dommages en aval du barrage. Elle est suivie d'une inondation importante, mêlant eau et matériaux issus du barrage, et de l'érosion intense de la vallée. Un tel événement a des conséquences très graves sur les populations et biens de tout genre. Dans le cas où d'autres barrages seraient présents en aval, l'onde de submersion peut provoquer à son tour d'autres ruptures et accentuer ainsi les dommages. Les conséquences environnementales peuvent être multiples sur la faune et la flore.

II.3.4 Maîtrise du risque de rupture des barrages :

Comme pour les autres risques technologiques, le risque de rupture des barrages doit être maîtrisé à la source pour minimiser ce risque et atténuer ses effets dans le cas de sa production. Pour cela, les études et les méthodes de réalisations doivent être de plus en plus perfectionnés, une surveillance avec auscultation de l'ouvrage doit être régulière et permanente.

II.3.5 Surveillance des barrages :

La surveillance du barrage doit s'effectuer pendant la période de mise en eau et durant la période d'exploitation. Elle s'appuie sur des inspections visuelles et des mesures d'auscultation du barrage et de ses appuis.

II.3.6 Maîtrise de l'urbanisation :

Dans les zones potentiellement menacées par l'onde de submersion la mesure d'interdiction de construire peut être envisagée, mais cette mesure d'interdiction peut couvrir de grandes surfaces et donc peut être disproportionnée par rapport à la probabilité d'un accident, aussi il est indispensable de prévoir des moyens d'alerte et un plan d'évacuation.

Conclusion :

Au terme de ce chapitre consacré aux différents types d'organes d'étanchéités dans les barrages en terre, il est important de souligner l'extrême diversité de leur forme, du type de dispositif d'étanchéité adopté.

La technique utilisée n'a pas cessé d'évoluer particulièrement depuis la deuxième moitié du dernier siècle où pas moins de 85% des grands barrages ont été réalisés grâce au grand développement de l'industrie qui a permis la mécanisation presque totale des travaux.

On a également relevé les statistiques des accidents survenus aux barrages et qui ont été parmi les causes majeures qui ont laissés certains pays réticents sur le choix des barrages en terre.

Mais depuis plusieurs décennies la science est arrivée à élucider plusieurs problèmes surtout dans le domaine de la géotechnique ce qui a été de nature à donner plus de confiance en la construction de digues en terre.

CONCLUSION GENERALE

On appelle barrages en terre tous les barrages constitués d'un matériau meuble. Cette famille regroupe en trios type principale sont :

- **Le barrage homogène** : est un barrage en remblai construit avec un matériau suffisamment étanche (argile, limon). C'est la technique la plus ancienne de barrages en remblais.
- **Le barrage à noyau** : argileux comporte un noyau central en argile (qui assure l'étanchéité), épaulé par des recharges constituées de matériaux plus perméables.
- **barrage à masque amont** : L'étanchéité est assurée par un « masque », construit sur le parement amont du barrage. Ce masque peut être en béton armé.

On prévoit un organe d'étanchéité dans un barrage en terre lorsque les matériaux constituant le remblai ne sont pas suffisamment imperméables pour empêcher de grandes pertes d'eau par infiltration.

On rencontre plusieurs types d'organes d'étanchéité, ceux réalisés en matériaux locaux et ceux en matériaux artificiels.

Les différents organes d'étanchéités dans les digues en remblais sont:

- **Noyau en argile compacté.**
- **Paroi moulée.**
- **Masque amont.**

Les différents organes d'étanchéités des fondations des barrages en terre sont :

- **Tapis étanche.**
- **Écran vertical.**
- **Méthode de SOIL MIXING.**

BIBLIOGRAPHIE :

1. **ANDERSON M. G. et RICHARDS K S.** (1989) - Slope stability, Edition Wiley, London, -645p.
2. **ALBERGEL J., NASRI S., J.M. LAMACHERE** (2004)-Recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen - Revue, Sciences de l'eau -N°17, p 133-151.
3. **ALONSO E., POULAIN D. et BERNEDE T.** (1994) - Influence des caractéristiques mécaniques et des pressions interstitielles sur la stabilité des barrages en terre homogènes, journées nationales d'étude AFEID-CFGB « petits barrages », Bordeaux, février 1993, Cemagref édition, pp. 239 - 256.
4. **ALONSO E., LAUTRIN D., POULAIN D., BRUNEL P., MILLER H., VIGNEAU P.et LINO M.**, (1995). Pressions interstitielles de construction dans les barrages en terre. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. p. 251-256
5. **BENDAHMANE F.** (2002) -Influence de l'écoulement sur la résistance des sols: étude expérimentale préliminaire- DEA Université de Nantes, p.62.
6. **BENDAHMANE F., MAROT D., ALEXIS A.et ROSQUOËT F.** (2005)- Influence des interactions mécaniques eau-sol sur l'érosion interne- Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 160p.
7. « **Rapport** ». commission international des grands barrages (CIGB).
8. « **Rapport** ».Commission international des grands barrages (CIGB).
9. **Technique de l'ingénieur** –[http://www.techniques-ingenieur .Fr](http://www.techniques-ingenieur.fr).
10. **Anonyme.**(1974). technique des barrages en aménagement rural édition provence.
11. **Habib.**(1982):Applications de la mécanique des sols et des roches. précis géotechnique. édition dunod.
12. **Anonyme.**(1981).Barrage en matériaux locaux edition.belkonev Tipaza.
13. **Anonyme.**(1983). séisme et conception des barrages. édition butte lin.
14. **Anonyme.**(1978) .Etanchéité du barrage par geomenbranes technique aduelle.edition bulle lin.
15. **Anonyme.**(1974). technique des barrages en aménagement rural édition provence.
16. **Christian kert.** « rapport de l'opest 9/7/2008 » la sécurité des barrages en questions.