

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifiques
Université Mohammed Seddik Ben Yahia-Jijel

Faculté des Sciences et
Technologie
Département de Génie Civil
et Hydraulique



كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري



Ouvrages hydrauliques (3^{ème} LMD Hydraulique)

Élaboré par :Dr BELAABED Faris
bellabed.faris@univ-jijel.dz

Année universitaire : 2020/2021

Chapitre 1

Généralités, statistiques, rôles et ruptures

1.1- Introduction :

Les ouvrages qui servent à mettre en œuvre une ou plusieurs branches de l'économie de l'eau s'appellent ouvrages hydrauliques.

Suivant que ces ouvrages sont construits en rivières, ou en lacs, nous distinguons les ouvrages fluviaux et lagunaires.

Les ouvrages hydrauliques présentent trois particularités :

- ✓ L'action permanente de l'eau peut entraîner l'usure mécanique, la cavitation des parties des ouvrages en contact avec le courant et à la rupture de certaine structure.
- ✓ La construction d'un ouvrage influe considérablement sur l'environnement (changement écologique) et entraînent une modification du régime naturel de l'écoulement. Dans le cas d'un barrage, cette modification se traduit par une surélévation du niveau en amont et des dépôts de sédiments de plus en plus fins en s'approchant du barrage.
- ✓ Les phénomènes d'érosion d'infiltration menace leur stabilité.

1.2- Définition et buts :

Un barrage est un ouvrage hydrotechnique implanté sur le cours d'eau d'un bassin versant pour accumuler les eaux de ruissellement dans un réservoir naturel.

Les barrages ont plusieurs fonctions, leurs construction est dictées par la nécessité soit :

- Irrigation des cultures en particulier dans les régions arides ou semi arides
- Alimentation en eau des hommes et des animaux ainsi que des entreprises et de l'industrie
- Nivellement des crues
- Production d'énergie électrique
- Régularisation des rivières navigable et alimentation des canaux (eau de consommation des écluses)
- Contrôle d'inondation et soutien d'étiage
- Alimentation des nappes
- Alimentation des industries en eau de refroidissement centrales thermiques par exemple)
- Pisciculture ou élevage d'autres espèces animales ou végétales aquatiques
- Création paysages de zone de repos ou de centres sportifs.

1.3- Eléments constructifs d'un barrage :

1.3.1-Corps du barrage :

▪ Définition des termes utilisés :

Un barrage est un ouvrage établi dans le lit d'un cours d'eau dans le but de créer une dénivellation entre les plans d'eau situés en amont et en aval. Considérons la section entravers d'un barrage représentée sur la Figure 1-1. Le Lac ou bassin artificiel à l'amont d'un barrage, dans lequel une certaine quantité d'eau est accumulée est appelée retenue. La Morphologie de l'aire couverte par la retenue est la cuvette. Le réservoir d'eau est une retenue dont l'exploitation s'effectue à niveau variable en vue de stocker et déstocker de l'eau.

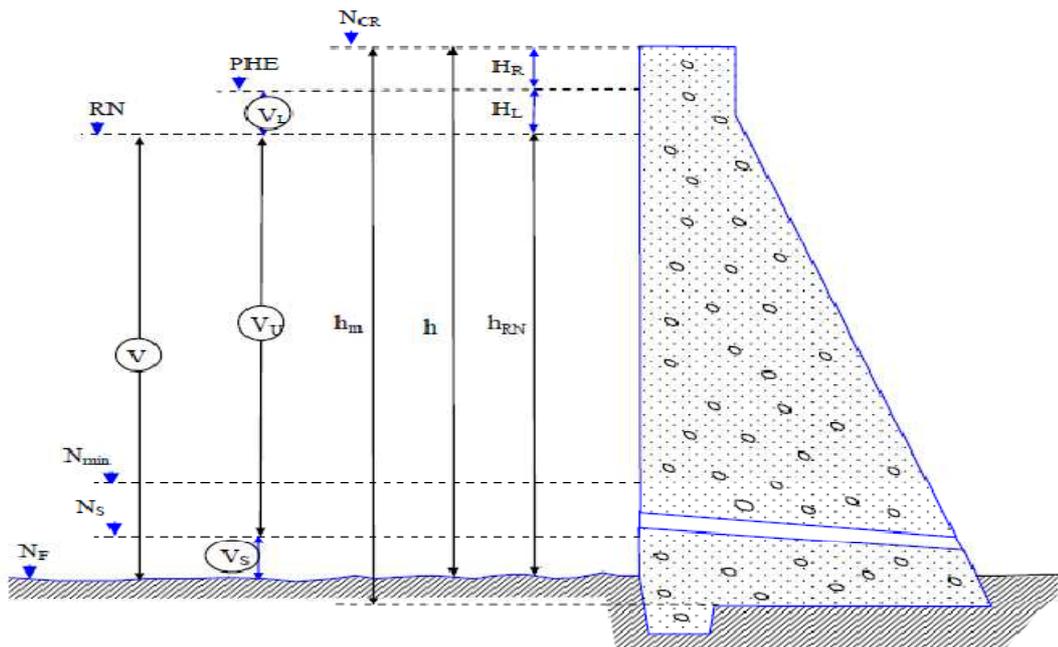


Figure II-1.1 : Caractéristiques de la capacité d'une retenue

- NS : Niveau (ou cote) des dépôts solide (m) : Cote correspondante aux dépôts solides dans la retenue.
- NF : Niveau (ou cote) du lit de l'oued (m) : Cote du point le plus bas du fond du lit du cours d'eau en correspondance avec le parement amont du barrage.
- $Nmin$: Niveau (ou cote) minimal d'exploitation (m) : Cote minimal du niveau de l'eau dans la retenue où l'eau accumulée peut être dérivée par la prise d'eau pour l'utilisation prévue
- RN : Niveau (ou cote) normal de la retenue (m) : Cote du niveau de l'eau dans la retenue à laquelle commence le déversement dans l'évacuateur de crues.
- PHE : Niveau (ou cote) des plus hautes eaux (m) : Cote maximale à laquelle peut arriver le niveau de l'eau dans la retenue au cas où se produirait le plus important phénomène de crue prévu, à l'exclusion de la surélévation due aux vagues.

- *NCR*: Niveau (ou cote) de la crête (m) : Cote du plan de la crête du barrage, à l'exclusion des parapets et d'éventuels murs de protection contre le batillage.
- *hrn* : Hauteur de retenue normale (m) : Dénivelée entre le niveau normal de la retenue et celui du lit de l'oued.
- *h* : Hauteur hors sol (m) : Dénivelée entre le niveau de la crête et celui du lit de l'oued.
- *hL* : Surélévation de crue (m) : Dénivelée entre le niveau des plus hautes eaux et celui de la retenue normale. Ce sur-remplissage représente la charge maximale exercée sur le déversoir en correspondance de la crue de projet.
- *hR* : Revanche : Dénivelée entre le niveau de la crête et le niveau des plus hautes eaux.
- *hm* : Hauteur maximale du barrage (m) : Dénivelée existant entre la cote du plan de crête et celle du point le plus bas de la superficie de fondation (à l'exclusion d'éventuelles sous-structures d'étanchéité).
- *VS* : Tranche morte (m^3) : Volume de retenue situé au-dessous du niveau minimal d'exploitation et destiné à l'envasement.
- *VU* Volume utile de la retenue (m^3) : Volume d'eau compris entre la cote normale de la retenue et la cote minimale d'exploitation : ce volume comprend la tranche utilisable et celle correspondant aux pertes par évaporation et par infiltration.
- *VL* Volume de laminage : Volume compris entre la cote des plus hautes eaux et la cote normale de retenue.
- *V* Volume (ou capacité) totale de retenue (m^3) : Volume total d'eau compris entre la cote normale de la retenue et la cote du lit de l'oued.
- *S* Surface ou superficie de la retenue (m^2) : Superficie du plan d'eau pour la cote normale de retenue.

1.3.2- Les ouvrages annexes :

a. Evacuateur de crues :

C'est un ouvrage qui permet le passage des crues quand le barrage est rempli.

b. Dérivation provisoire :

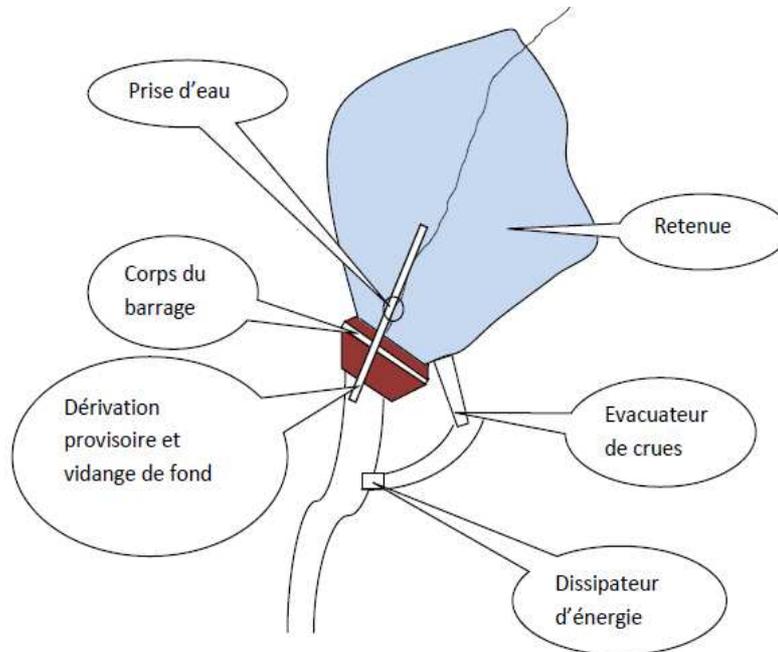
La dérivation provisoire est associée à un batardeau, ces ouvrages servent à se protéger des eaux de crues durant la construction de l'ouvrage.

c. Prise d'eau :

C'est un ouvrage qui permet de prélever l'eau pour son utilisation.

d. vidange de fond :

C'est un ouvrage qui permet de vidanger partiellement ou totalement la retenue



1.4- Le barrage de nos jours:

Le barrage de la Grande-Dixence est un barrage poids situé en Suisse.

Il mesure 285 mètres de haut.

Le barrage est un immense ouvrage dont la largeur atteint 193 mètres à la base et 15 mètres au couronnement. La longueur totale du couronnement se monte à 748 mètres. Au total, ce ne sont pas moins de 5 960 000 m³ de béton parcourus par 32 kilomètres de galeries et de puits de surveillance.

La centrale hydraulique détient trois records mondiaux (état en 2005) :

- plus haute chute d'eau (1880 mètres)
- plus grande puissance par

Turbine Pelton(400 MW)

- plus grande puissance par
- pôle des alternateurs.

1.5- Statistiques sur les barrages en Algérie :

Actuellement le secteur des ressources en eau compte 80 barrages de grande et moyen envergures avec une capacité de 8,6 milliards de (m³)

- 15 barrages de région Ouest (Djorftorba, Beni Bahdel, guergar, sikkak, Bentaiba...)
- 17 barrages de la région de Cheliff (Oued el Fedda, Sidi yaakoub,...)
- La région Centre avec ces 18 barrages (Keddara, Taksebt, koudietAsserdoun...)
- 30 barrages de l'Est (Beni Harroune, Timgade, Tichy,...)

Le gouvernement entend faire passer à 140 le nombre total de barrages en Algérie d'ici 2030, et, ce faisant, atteindre une capacité de stockage de près de 12 milliards de mètres cubes sur l'ensemble du pays. Outre l'augmentation de la capacité des barrages, l'Algérie s'est également attelée à développer la production d'eau potable à partir de l'eau de mer et plusieurs usines de dessalement construites depuis 2000, permettent d'approvisionner la population en eau douce à partir de l'eau de mer de la Méditerranée.

1.6- Procédures de conception des ouvrages hydrauliques :

Lors de la conception d'un ouvrage hydraulique, comme dans tout autre projet de Génie Civil, on peut distinguer trois phases bien caractérisées :

1.6.1- Première phase : études préliminaires ou Avant Projet Sommaire (APS) :

Elle concerne les **reconnaisances** et les études générales de la zone à développer en vue :

- d'établir l'inventaire des réalisations susceptibles de satisfaire des besoins soit déjà exprimés soit répertoriés dans la zone
- d'apprécier l'intérêt économique de la réalisation de ces aménagements, elle comprend les étapes suivantes :
 - **collecte des données disponibles** : documents cartographiques, données climatiques, renseignements géologiques, données relatives aux pratiques agricoles et aux besoins d'eaux.
 - **inventaires des sites potentiels et Critères de choix** : topographiques, géologique et géotechnique, hydrologique, proximité des lieux d'utilisation, critères économiques, reconnaissance des lieux, reconnaissance géologique et géotechnique, examen des sites topographique rapide, reconnaissance du périmètre irrigable et/ou des agglomérations rurales

Les études préliminaires à réaliser sont :

- 1- Etude topographique.
- 2- Etude hydrologique.
- 3- Etude géologique et géotechnique.
- 4- Evaluation des besoins.
- 5- Evaluation des caractéristiques de l'aménagement.
- 6- Choix des sites.
- 7- Schémas des aménagements - Estimations des coûts.
- 8- Programme de réalisation.
- 10- Etablissement du rapport de synthèse.

1.6.2- Deuxième phase : étude d'Avant Projet Détaillé (APD) :

Elle concerne les études des variantes présélectionnées lors de la phase préliminaire. Il s'agit des études d'avant-projet détaillé qui permettront la réalisation des aménagements.

Les études d'avant projet détaillé comprennent :

- 1- Levés et études topographiques.
- 2- Etudes hydrologiques.
- 3- Etudes géologiques et géotechniques.
- 4- Evaluation des besoins en eau.
- 5- Etude de régularisation.
- 6- Etudes d'impacts du projet.
- 7- Types, caractéristiques et dimensionnements des ouvrages.
- 8- Les prescriptions techniques.
- 9- Avant-métré et détail estimatif.

1.6.3- Troisième phase : études de réalisation des ouvrages (dossier d'exécution) :

Elle concerne les conditions d'organisation, les prescriptions techniques pour une bonne exécution et les contrôles qui doivent être mis en œuvre pendant la construction des ouvrages.

Ces études intéressent les aspects suivants :

- Moyens pour la réalisation du projet (engins, matériaux, matières consommables, personnel)
- Organisation du chantier
- Exécution des travaux (séquence des opérations, principaux travaux, contrôle des travaux)

1.7- Le risque rupture de barrage :

La destruction partielle ou totale d'un barrage peut être due à différentes causes :

-Techniques : défaut de fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des eaux lors de crues ; vices de conception, de construction ou de matériaux, vieillissement des installations

-Naturelles : séismes, crues exceptionnelles, glissements de terrain (soit de la fondation ou des appuis de l'ouvrage, soit des terrains entourant la retenue et provoquant un déversement sur le barrage)

-Humaines : insuffisance des études préalables et du contrôle d'exécution, erreurs d'exploitation, de surveillance et d'entretien, malveillance.

Le type de rupture dépend des caractéristiques propres du barrage. Ainsi, elle peut être :

-Progressive : dans le cas des barrages en remblais, par érosion régressive, suite à une submersion de l'ouvrage ou à une fuite à travers celui-ci ;

-Brutale dans le cas des barrages en béton, par renversement ou par glissement d'un ou plusieurs plots.

Une rupture de barrage entraîne la formation d'une onde de submersion se traduisant par une élévation brutale du niveau de l'eau à l'aval.

Chapitre 2

Différents types de barrages et choix du profil type

II-1- Différents types de barrage :

II-1-1- Selon leur rôle :

a) Barrages de dérivation (déversoirs ou de rivières) :

Ce type de barrage est employé lorsqu'on a besoin de maintenir un niveau constant sur un tronçon d'une rivière pour garantir un fonctionnement satisfaisant d'une prise d'eau ou rendre régulier son profil, afin de faciliter la navigation.

Ils ont, en général des hauteurs réduites par rapport à leur longueur en crête.

b) Barrages réservoirs :

Ils sont des ouvrages qui agissent sur les débits des cours d'eau en créant des réserves utilisables selon les besoins en eau.

Ils sont souvent plus hauts que leur longueur en crête.

II-1-2- selon leur type de construction

Les barrages sont divisés en deux groupes selon les matériaux de construction :

- ✓ les barrages en matériaux rigides (maçonnerie ou en béton).
- ✓ les barrages en matériaux meubles (terre et enrochement).

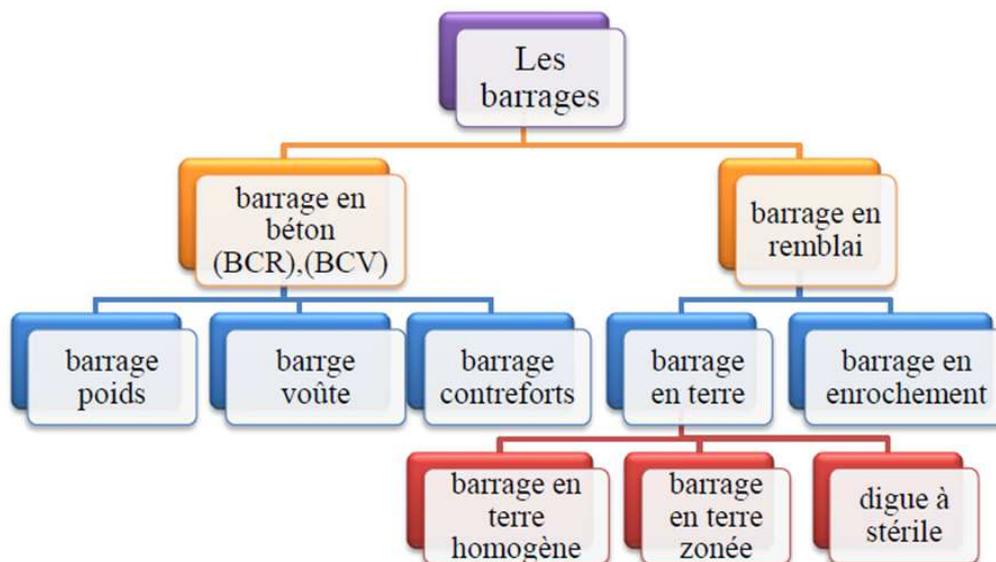


Figure II-01 : Les familles de barrages en béton

a) Barrages en béton

Les barrages en béton sont des ouvrages rigides dont la stabilité est assurée par leur poids ou leur forme. Ces ouvrages font l'objet de nombreuses méthodes de calculs, basées sur la résistance des matériaux et la théorie de l'élasticité.

Les barrages en béton se divisent en plusieurs groupes selon la configuration géométrique.

- les barrages poids.
- Les barrages voûte.
- Les barrages à contreforts.

🚧 Actions aux quelles sont soumis les barrages

1- Action de l'eau

Les barrages sont soumis à l'action de l'eau qui se manifeste sous plusieurs aspects :

- Par sa pression appliquée directement sur le parement amont de l'ouvrage et sa fondation.

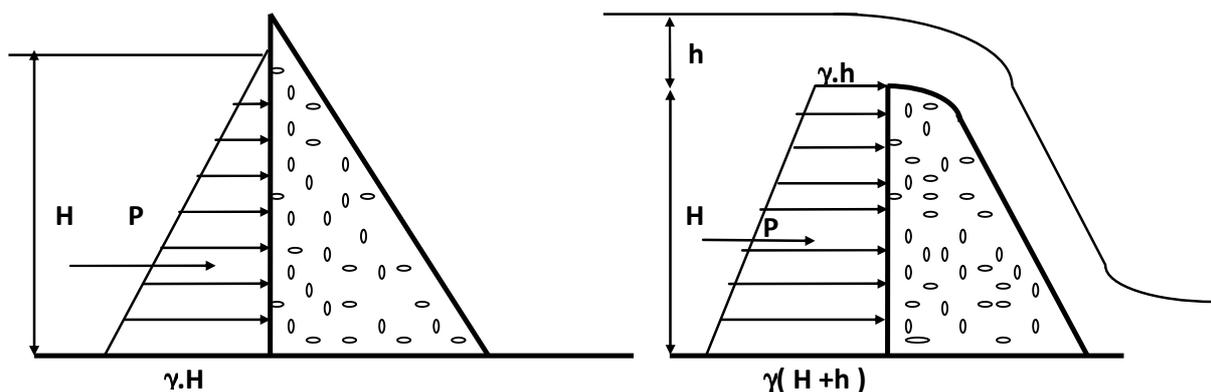


Figure II-02 : Pression hydrostatique exercée sur le corps du barrage

- La force de la pression hydrostatique sans déversement sur sa crête.

$$P = \gamma \cdot H^2 / 2 \quad (\text{II-01})$$

- La force de pression hydrostatique avec déversement sur la crête.

$$P = \gamma \cdot (H + 2h)H / 2 \quad (\text{II-02})$$

- Par les infiltrations dans la fondation et à travers le corps du barrage :

Quelque soit la qualité de la fondation l'eau y pénètre progressivement dans les pores ou les fissures créant ainsi des forces de sous pression qui s'exercent sur la surface de contact béton-rocher.

Le diagramme de ces sous pressions peut prendre plusieurs formes selon les conditions

suivantes :

a- Fondation hétérogène représentant des fissurations en communication avec l'amont et ne débouchant pas à l'aval.

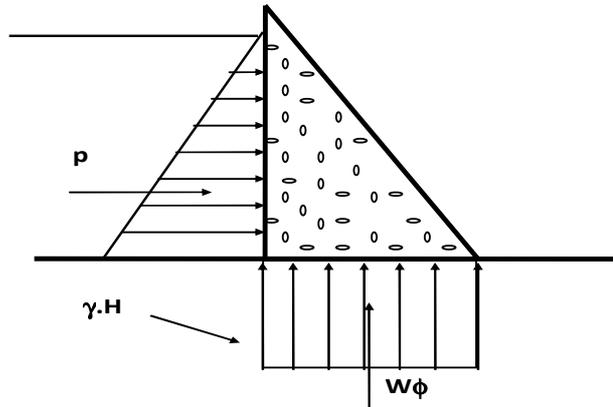


Figure II-03 : Diagramme des sous-pressions (cas a)

b- Fondation homogène avec circulation de l'eau de l'amont vers l'aval et pertes de charge linéaires, la pression décroît linéairement de la valeur $\gamma \cdot H$ (H : charge amont) à la valeur $\gamma \cdot h$ (h : charge aval).

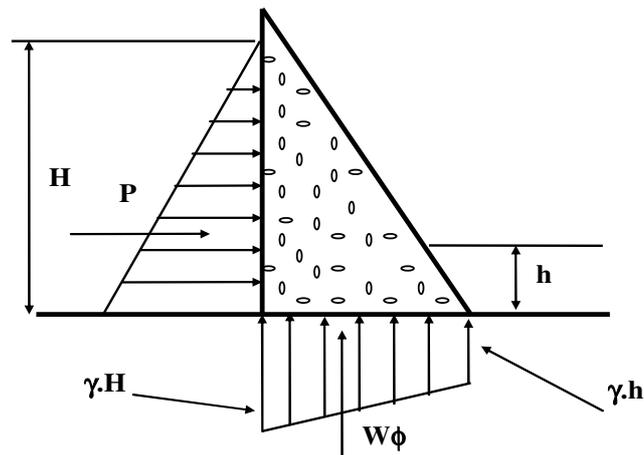


Figure II-04 : Diagramme des sous-pressions (cas b)

c- Fondation homogène avec organe d'étanchéité sous forme de rideau d'injection ou autre coupure étanche en amont qui entraîne un décroissement des sous pressions d'une valeur amont $\gamma \cdot (h + \lambda \cdot (H - h))$, ($\lambda = 2/3$) à une valeur aval $\gamma \cdot h$.

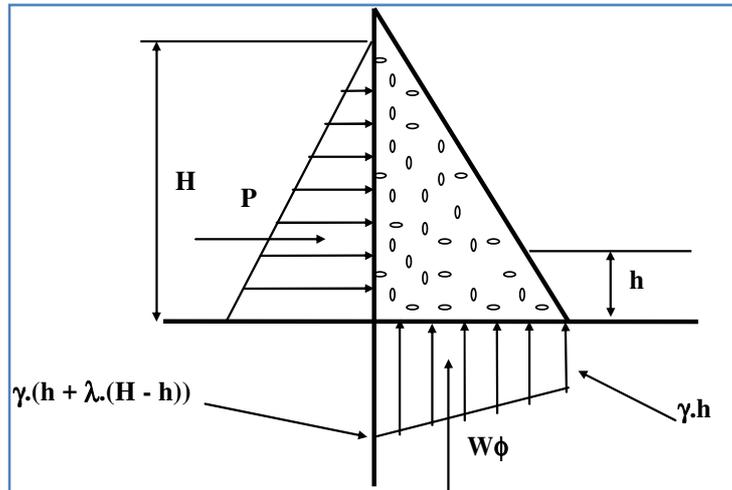


Figure II-05 : Diagramme des sous-pression (cas c)

d- Fondation homogène avec organe d'étanchéité et système de drainage à l'aval de la coupure d'étanchéité. La valeur des sous pressions décroît à une valeur. $\gamma \cdot (h + 1/2 \cdot (H - h)) = \gamma \cdot (H + h)/2$.

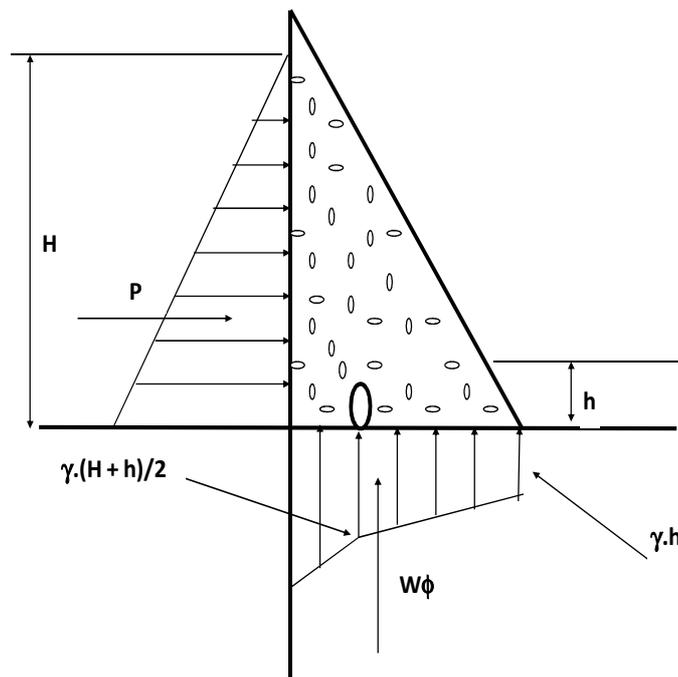


Figure II-06 : Diagramme des sous-pression (cas d).

1- Action du poids du barrage

L'action du poids du barrage est favorable pour la stabilité du barrage, du fait que ce type d'ouvrage résiste par sa masse à l'effet des actions motrices.

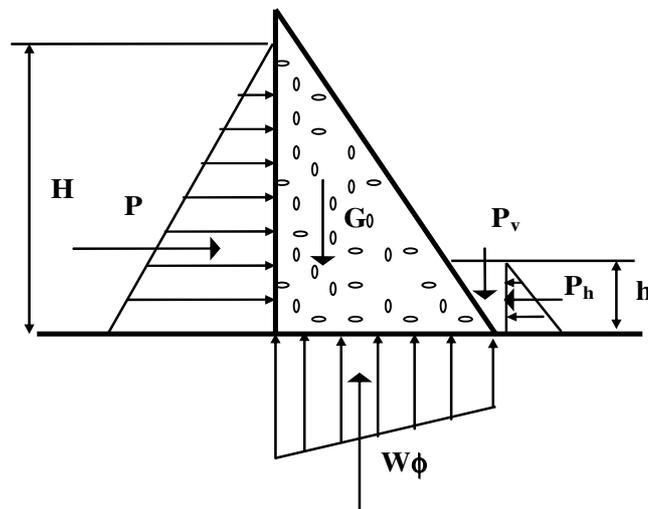


Figure II-07 : Différentes forces agissant sur le corps du barrage

a) Barrages en béton

a-1)- Différents types de barrage en béton

1- Barrages poids

Les barrages poids sont des ouvrages massifs en béton de section triangulaire dont la stabilité, sous l'effet de la poussée de l'eau, est assurée par leur poids propre, de même qu'un bloc de plusieurs tonnes posé sur un sol horizontal.

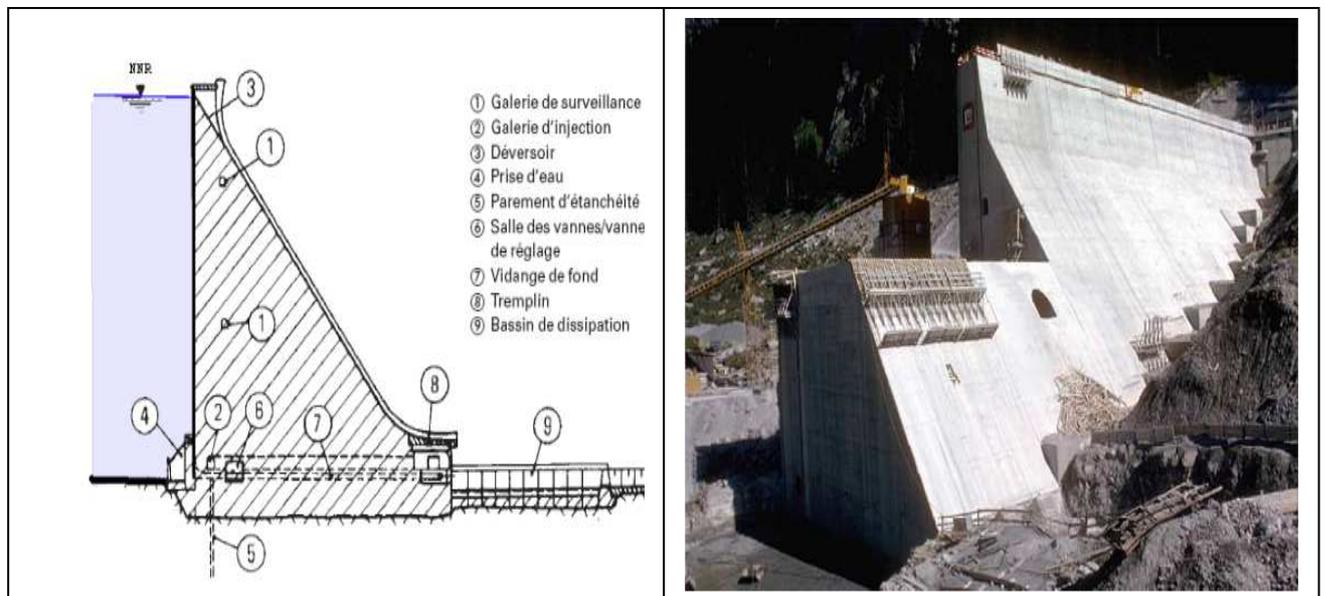


Figure II-08 : Coupe transversale d'un barrage poids en béton

✚ Avantages de barrage poids

- Faibles contraintes transmises au rocher;
- Faibles contraintes dans le béton ;

- Les variations de températures ne produisent que de faibles variations de contraintes ;
- L'évacuateur de crue peut facilement être intégré ;

✚ *Inconvénients de barrage poids*

- Les sous-pressions importantes sous la fondation ;
- Moyen risque de tassement ;
- Le volume du béton important (pour le barrage-poids évidé, il est plus faible) ;
- Le volume d'excavation important ;
- Fragilité au séisme (si les joints entre les blocs ne sont pas faits par injections) ;

1-1- Stabilité des barrages poids

La stabilité des barrages poids concerne l'équilibre de l'ouvrage qui doit résister au glissement sur la fondation et au renversement après le remplissage du réservoir.

1-1-1- Stabilité au renversement

Le renversement des barrages est dû à l'existence de forces horizontales suffisamment grandes comparées aux forces verticales dont la résultante de toutes les forces agissant sur le corps du barrage est à l'extérieur des limites de la surface de base du barrage.

Généralement la stabilité au renversement est exprimée par (K_r) qui désigne le rapport des moments stabilisants avec les moments moteurs rapportés au point (C) de l'extrémité du pied aval du barrage.

$$K_r = \Sigma G.n / \Sigma (P.m + W\phi.e) \quad (\text{II-05})$$

La valeur du coefficient de stabilité au renversement (K_r) pour laquelle le barrage est considéré stable est non surdimensionné est souvent prise égale à $1.3 \div 1.5$.

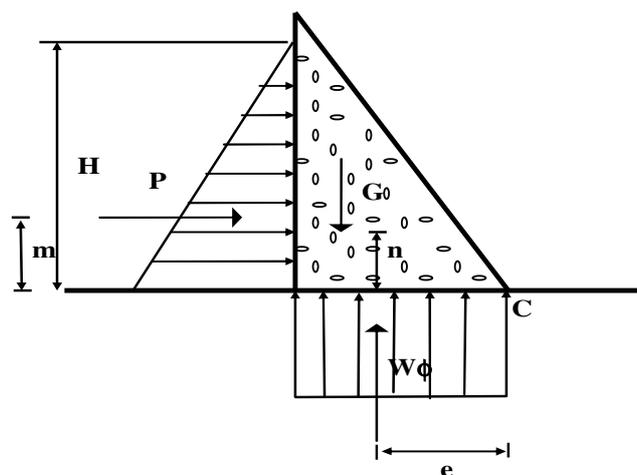


Figure II-09 : Schéma de calcul de la stabilité au renversement

1-1- Stabilité au glissement

Les forces horizontales, telles que la poussée de l'eau et des terres qui s'exercent sur le parement amont du barrage tendent à le faire glisser vers l'aval. La résistance à ces forces est assurée par la cohésion et le frottement du barrage avec la fondation, ces deux caractéristiques sont exprimées par le coefficient de cohésion (C) et le coefficient de frottement $\text{tg}\phi$.

Souvent on néglige la cohésion à cause de sa variabilité aléatoire. Le coefficient de frottement est généralement pris égale à 0.75 pour les surfaces de contact béton-béton, béton-roche dure (granite, gneiss). Pour les fondations constituées de roche tendre Tel que le calcaire et les marnes, on adopte généralement la valeur de $\text{tg}\phi = 0.6$.

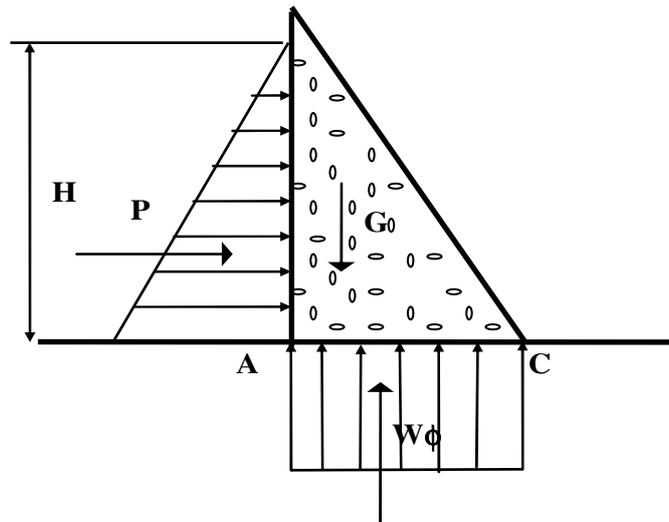


Figure II-09 : Schéma de calcul de la stabilité au glissement

- $(\Sigma P / \Sigma(G - W\phi)) \leq \text{tg}\phi$ (II-06)

- $K_g = \Sigma(G - W\phi) \text{tg}\phi / \Sigma P$ (II-07)

En tenant compte de la cohésion :

- $K_g = (\Sigma(G - W\phi) \text{tg}\phi + C.S) / \Sigma P$ (II-08)

S: Surface de contact Barrage-Fondation.

C: Coefficient de cohésion ($C = 0.5 \div 2$ Mpa, pour les roches dures de bonne qualité).

La valeur du coefficient de stabilité au glissement (K_g) pour laquelle le barrage est considéré stable est non surdimensionné est souvent prise égale à $2.5 \div 4$.

En cas de terrain comportant des plans de faiblesse horizontaux (fissuration, stratification), la stabilité peut être améliorée par des moyens techniques pendant la phase de construction de l'ouvrage

2- Barrages voûtes

Se sont des barrages qui ont la forme d'un arc en plan, dont les efforts sont transmis directement aux rives. Ils sont caractérisés par une voûte à mince paroi à simple ou à double courbure.

Ce type de barrage est recommandé pour les vallées étroites avec des épaulements de bonne résistance mécanique.

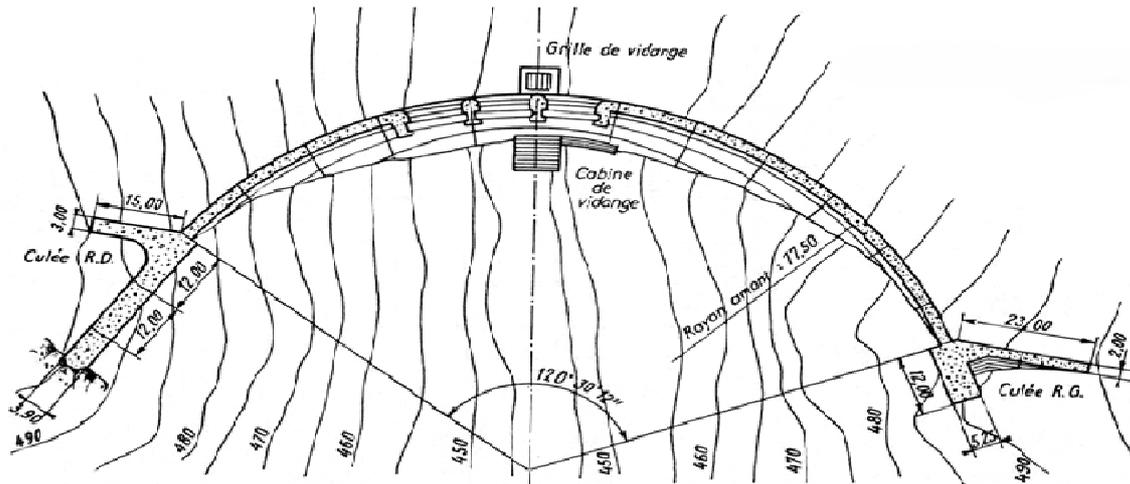


Figure II-10 : Vue en plan d'un barrage voûte

Le barrage voûte a la forme d'un arc qui reporte la poussée de l'eau sur les flancs de la vallée. Il résiste à la poussée de l'eau qu'il retient, à la manière d'une plaque cintrée encastree sur trois cotés, les deux rives

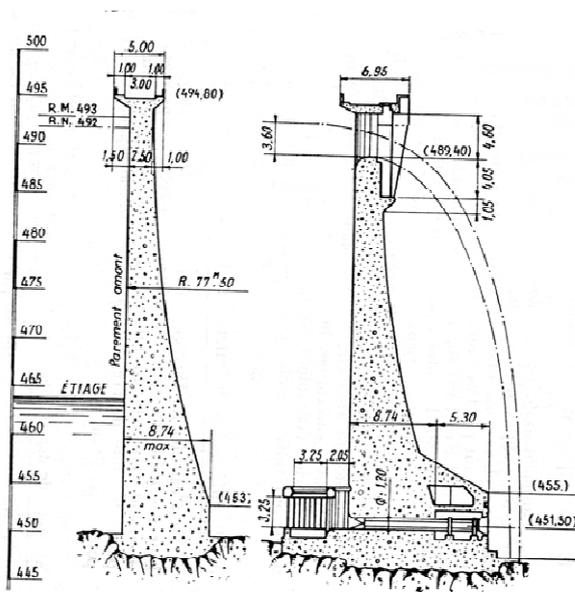


Figure II-11 : Coupes transversales d'un barrage voûte



Figure II-12 : Le barrage de Monteynard (Isère, France)- voûte

✚ *Avantages de barrage voûte*

- 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).

✚ *Inconvénients de barrage voûte*

- Les contraintes sont importantes dans le béton et dans le rocher sous la fondation ;
- Efforts transmis obliquement aux appuis latéraux ;
- Sensibilité limitée aux tassements ;
- L'échauffement du béton par la prise du ciment est à considérer ;
- Difficultés d'intégration de l'évacuateur de crues dans le barrage ;
- Gradient de sous-pression sous la fondation important ;
- Les sous-pressions dans les fissures du rocher peuvent provoquer des glissements d'appuis.
- Drainage des fissures des massifs d'appui devant être rigoureusement traité.

2-1- Calcul des barrages voûte

La méthode de calcul la plus simple consiste à découper la voûte en tranches horizontales appelées anneaux, que l'on considère comme autant d'arcs encastrés, indépendant l'un de l'autre. On néglige l'encastrement vertical. On ne compte pas aussi sur le poids des anneaux pour résister à la poussée de l'eau. Toutes ces simplifications conduisent à la déterminer des arcs isolés travaillant dans des conditions plus sévères que la réalité.

L'hypothèse de base pour le calcul des barrages voûtes consiste à découper la voûte en une série d'arcs horizontaux et d'étudier indépendamment leur stabilité comme s'il n'existait aucune liaison d'un arc à l'autre.

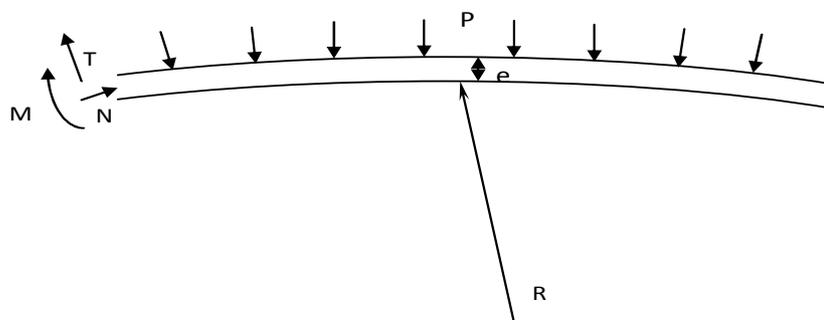


Figure II-13: Schéma de calcul des barrages voûte par la méthode des anneaux

Soit R le rayon de courbure du parement soumis à la pression de l'eau P . dans le cas d'une pression hydrostatique (normale à la paroi) les sollicitations dans une section peuvent se ramener à un effort normal constant N , l'effort tranchant et le moment de flexion étant nuls.

On a alors $N=PR$ et dans chaque section verticale de l'arc considéré, il n'existe que des contraintes normales de compression.

$$n = PR/e \quad (\text{II-09})$$

3- Barrages à contreforts

Les barrages à contreforts se composent : par un ensemble de dalles en béton armé appuyées sur des contreforts régulièrement espacés, par des voûtes multiples à génératrices inclinées ou verticales ou par l'épaississement des têtes des contreforts. Ce type d'ouvrage est recommandé pour les vallées larges et pour les barrages de hauteur moyenne.

Le barrage à contrefort permet une économie importante du volume de béton à cause de la réduction de la sous-pression sous l'ouvrage qui est caractérisé par une faible section de contact avec le sol de fondation.

Le barrage à contrefort est formé par deux parties fondamentales, le voile étanche et les contreforts.

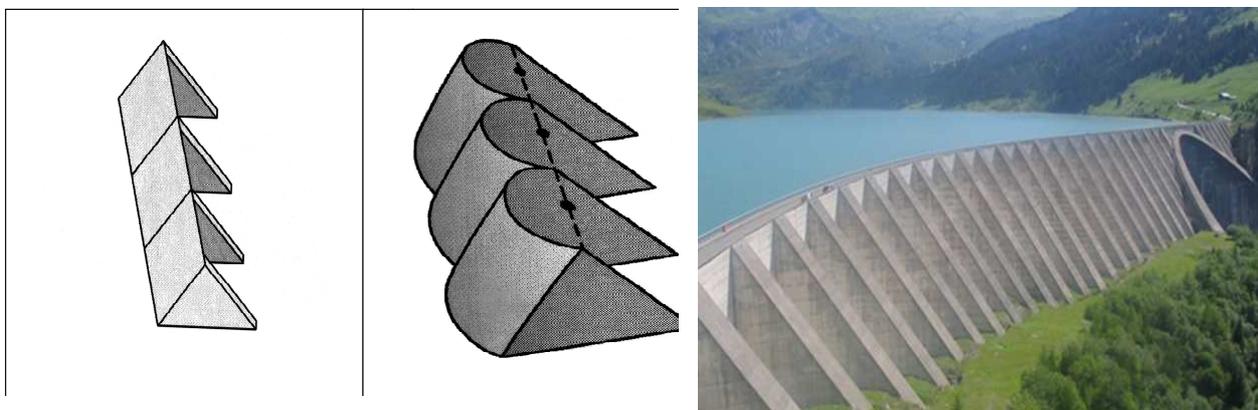


Figure II-14: Barrage de d'Albertville, Rhône-Alpes, France (1955-1962)-contrefort

✚ Avantages de barrage à contreforts

- Volume de béton plus faible que pour le barrage poids ;
- Faibles sous pressions sous la fondation ;
- Echauffement faible lors de la prise du béton ;
- L'évacuateur de crues peut facilement être intégré ;
- Contraintes moyennes transmises à la roche.

Inconvénients de barrage à contreforts

- Volume d'excavation important ;
- Gradient de sous pressions sous la fondation localement très important ;
- Risque limité de tassements ;
- Grande sensibilité aux séismes ;
- Contraintes de température peuvent être importantes dans la tête.

b) Barrages souples (en remblai ou digues)

La plupart de ces barrages ont une structure souple, ils sont construits par des matériaux naturels comme l'argile, les roches et les pierres. On choisit ce type d'ouvrage lorsque la vallée est trop large pour admettre une structure en béton et lorsqu'on trouve les matériaux sur place ou à faible distance. Ses parties principales sont :

- Le noyau : on utilise des sols fins pour assurer l'étanchéité du barrage et sa position est variée, verticale, inclinée, centrée.....etc.
- Les recharges : on les construisent par des sols différents que le sol du noyau pour supporter et protéger le noyau.
- Le drain : à partir de son nom, il assure l'écoulement de l'eau dans le sol et diminue la pression interstitielle pour cela il doit contenir des sols très perméables.
- Les filtres : ce sont des parties peu épaisses, on les place entre les différentes parties contre l'infiltration des eaux et pour éviter le phénomène de renard (l'érosion interne).
- Le rip-rap : couche superficielle constituée par des blocs d'enrochements sur les côtés du remblai pour le protéger contre les vagues.

On distingue deux catégories de barrages en remblai sont :

- Les barrages en terre, réalisés essentiellement à la partie de sol naturel meuble prélevé dans des gravières ;
- Les barrages en enrochements, dont la majeure partie est constituée de carrière concassée.

1- Barrage en terre

Les barrages en terre sont constitués par des remblais en matériaux naturels allant de l'argile très fine aux graviers grossiers. Les matériaux les plus fins sont doués de frottement et de cohésion; après compactage, ils permettent d'obtenir des massifs étanches. Les plus grossiers ne peuvent être utilisés que pour constituer des massifs résistants à la poussée de l'eau.

Le choix du matériau est lié aux frais d'extraction et de transport. C'est après avoir prospecté les gisements économiquement exploitables et déterminer les diverses propriétés des matériaux qui lui sont offerts qu'on détermine le profil de l'ouvrage.

La section transversale d'un barrage en terre a généralement la forme trapézoïdale. Le volume des matériaux à mettre en œuvre pour la construction d'un barrage en terre est en général important (5 à 15 fois le volume d'un barrage poids en béton).

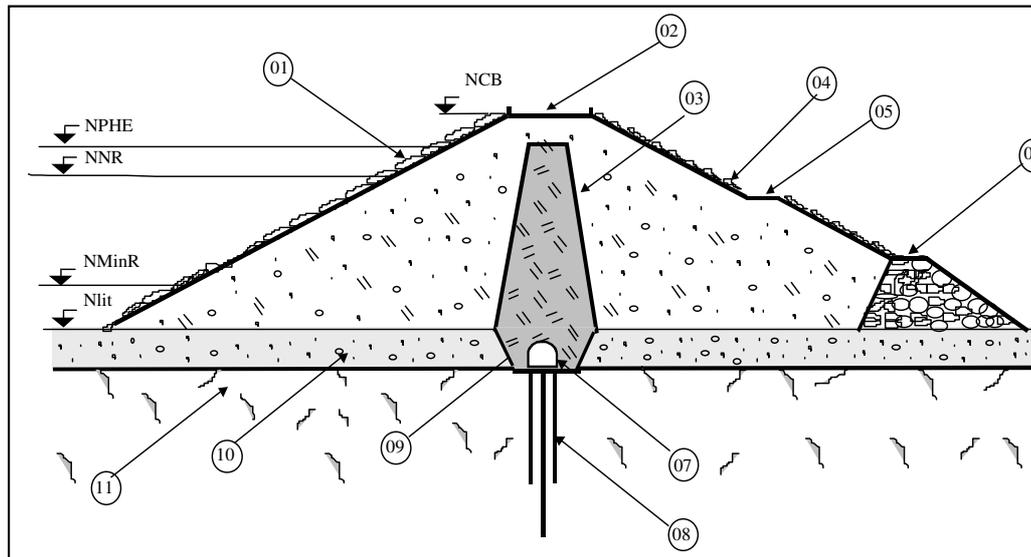


Figure II-15: Schéma principal de structure d'un barrage en terre

- | | |
|--|--|
| 01- Revêtement du talus amont. | 02- Crête du barrage. |
| 03- Organe d'étanchéité. | 04- Revêtement du talus aval. |
| 05- Berme. | 06- Organe de drainage. |
| 07- Galerie d'injection et de visite. | 08- Rideau d'injection. |
| 09- Parafoille. | 10- Sol de fondation perméable. |
| 11- Sol de fondation imperméable. | |

Les barrages en terre peuvent être divisés en trois principaux schémas selon les matériaux qui les constituent:

- Le barrage homogène ;
- Le barrage zone avec noyau étanche ;
- Le barrage à masque amont.

1.1. Barrage homogène

Ce type de barrage est constitué d'un même sol repart uniformément à travers toute la section du barrage. Ils exigent des talus moins raides que ceux des barrages zonés et un dispositif de drainage dans la partie aval du barrage.

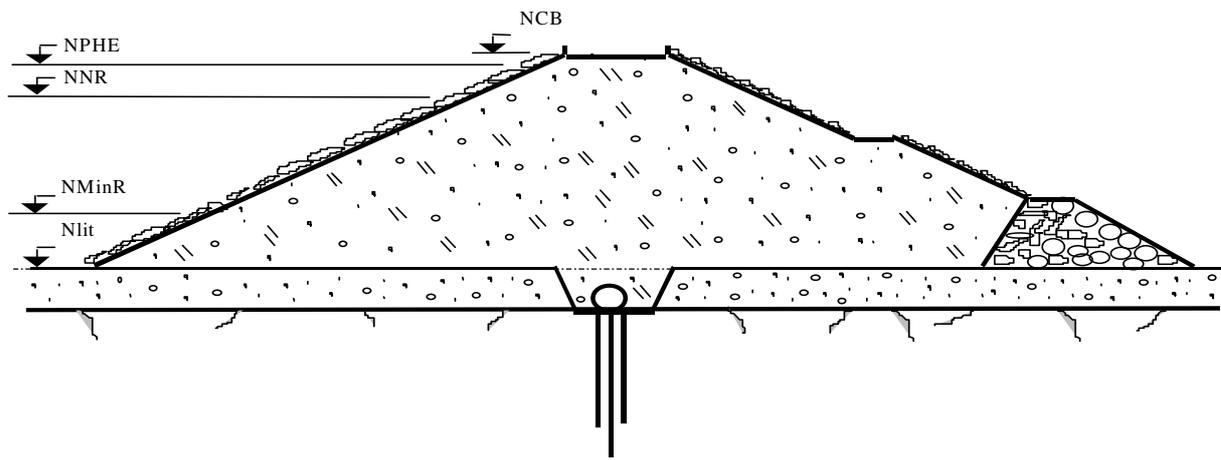


Figure II-16: Barrage homogène

1.2. Barrages avec noyau

Lorsque les caractéristiques géotechniques des matériaux disponibles ne permettent pas d'envisager un barrage homogène, alors, on adopte un profil zoné. Chaque zone étant constituée d'un matériau différent, choisi en fonction du rôle qu'il doit jouer. Les matériaux imperméables sont disposés dans la partie centrale et les matériaux semi-imperméable et perméable dans les parties amont et aval (recharges) qui ont un rôle stabilisateur.

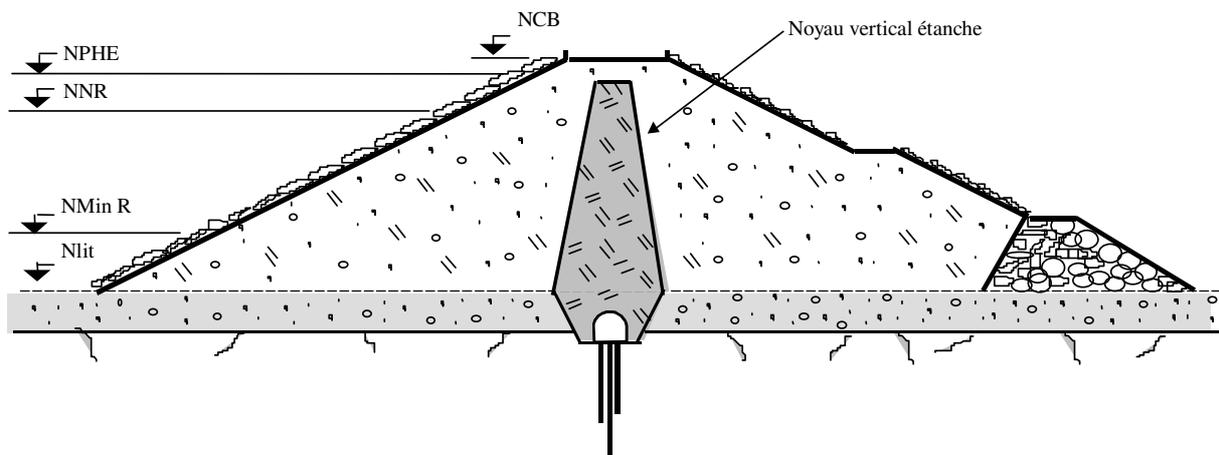


Figure II-17: Barrage avec noyau vertical

Le nombre et la disposition des zones qui constituent le barrage à zone peuvent varier selon des schémas très divers, mais la plupart des barrages de ce type ne comportent pas plus de quatre zones de caractéristiques différentes. Le noyau peut être disposé verticalement ou incliné.

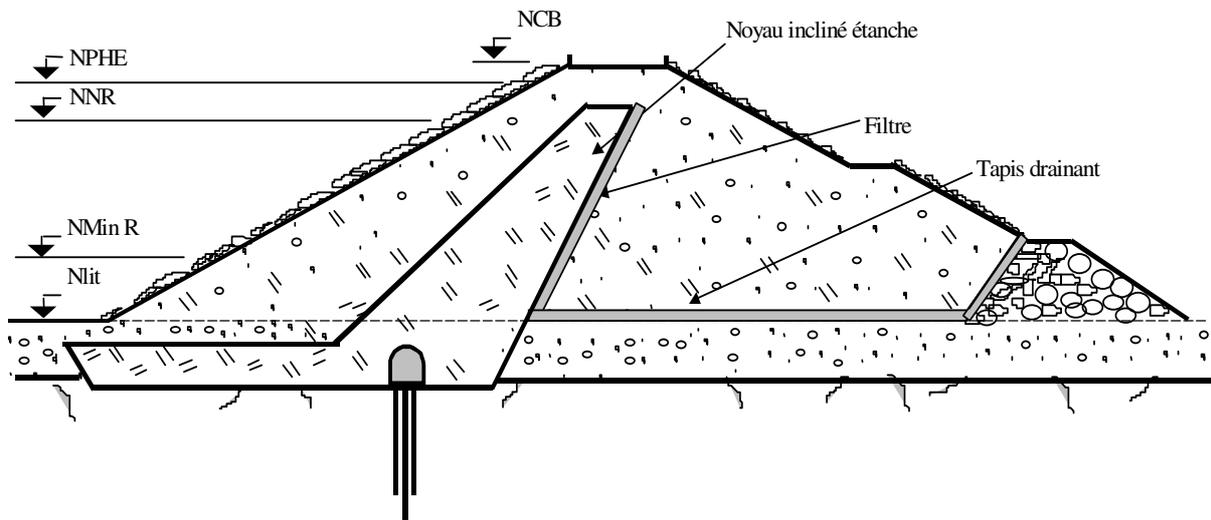


Figure II-18: Barrage avec noyau incliné

1.3. Barrage avec masque

Le manque de matériau convenable pour la construction d'un noyau a conduit les concepteurs d'avoir recours à un masque amont étanche posé sur une digue homogène ou à une paroi d'étanchéité en béton réalisée à l'intérieur de la digue. Le masque d'étanchéité est réalisé généralement sur une couche de préparation composée d'éléments fins drainants.

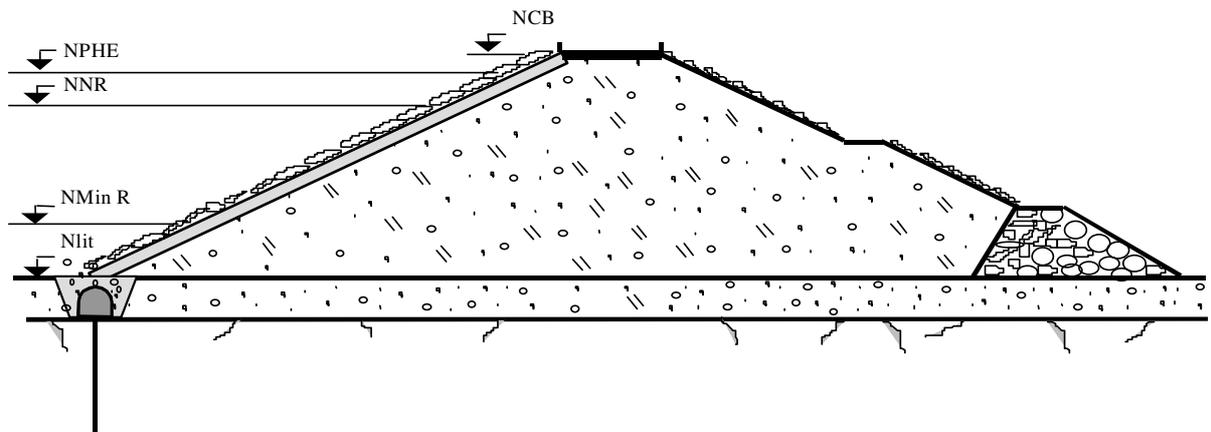


Figure II-19: Barrage avec masque

2- Barrage en enrochement

Un barrage en enrochement n'est pas autre chose qu'un tas de cailloux à grande échelle, qui résiste par sa masse aux efforts auxquels il est soumis. Mais n'étant pas étanche par lui-même, il faut lui adjoindre un organe d'étanchéité qui constitue la partie la plus délicate, aussi bien au stade du projet qu'à celui de la réalisation.

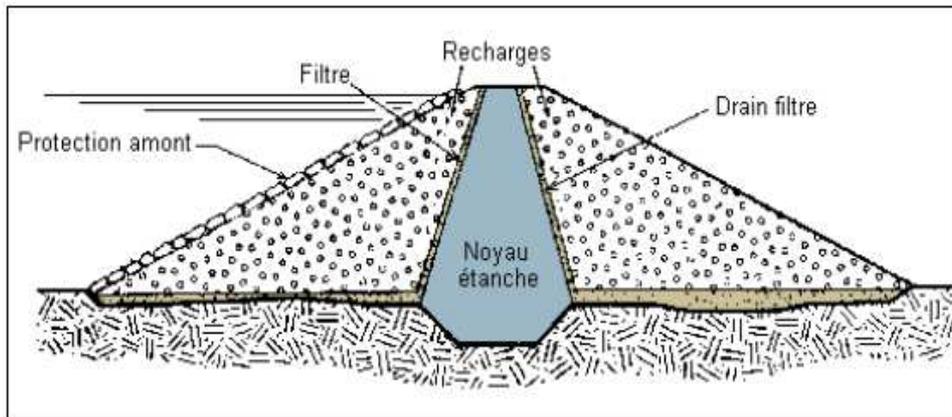


Figure II-20: Profil d'un barrage en enrochement [8]

✚ **Avantages de barrage des digues en terre / Enrochement à noyau**

- Le corps du barrage est très flexible et adaptable aux conditions de terrain ;
- Structure très peu sensible aux tassements et aux séismes ;
- Excavations limitées ;
- Contraintes très faibles sur le sol de fondation ;
- Gradient hydraulique faible dans le noyau et dans la fondation.

✚ **Inconvénients de barrage des digues en terre / Enrochement à noyau**

- La construction d'évacuateur de crues à travers le corps du barrage n'est pas possible.
- L'existence d'un écoulement souterrain à travers le corps du barrage risque de créer des conditions de déformations de l'ouvrage.
- La construction d'un barrage en terre demande une quantité très importante des matériaux de construction.
- Les barrages en terre ne résistent pas au débordement des eaux par-dessus la crête.
- La dégradation des talus peut avoir lieu par glissement ou par altération superficielle due aux conditions climatiques.

Chapitre III. Détermination de la hauteur du barrage et dimensionnement du réservoir

II-1- Hauteur du barrage

La hauteur du barrage est déterminée en fonction des volumes à stocker et la forme de la cuvette. Ces volumes concerne la quantité de la vase prévue d'être accumulée dans la retenue pendant la période d'exploitation, le volume d'eau exploitable et le volume d'eau stocké au cours de la crue exceptionnelle. La hauteur obtenue à partir de ces volumes est majorée d'une tranche supplémentaire appelée revanche.

$$H_B = \text{NNR} + R + h_{\text{dév}} + t \quad (\text{III-01})$$

H_B : Hauteur du barrage ;

NNR : Niveau normal de la retenue ;

R : Revanche en (m) ;

t : Tassement en (m) ;

$h_{\text{dév}}$: Charge sur le déversoir.

Niveau normal de la retenue

Le niveau normal de la retenue (NNR) correspond à la cote maximale du volume utile. Il est déterminé par le calcul de la régularisation de la retenue, compte tenu de la tranche morte prévue pour l'emmagasinement des sédiments, de l'apport liquide, des besoins à satisfaire, et des pertes par évaporation et infiltration.

$$\text{NNR} = N_{\text{min}} R + H_{\text{vu}} \quad (\text{III-02})$$

H_{vu} : hauteur correspondant au volume utile.

$N_{\text{min}} R$: Niveau minimum de la retenue.

Niveau maximum de la retenue (NPHE)

Le niveau maximum de la retenue $N_{\text{max}} R$ correspond au niveau maximum de la charge sur le seuil de l'évacuateur de crues qui est fixé généralement au niveau NNR.

$$N_{\text{max}} R = \text{NNR} + h_{\text{dév}} + t \quad (\text{III-03})$$

La hauteur maximale des eaux dans la retenue est fixée par le calcul des différents niveaux de la retenue et la charge d'eau sur le seuil de l'évacuateur de crues.

$$H_{\max} = N \text{ Max } R - N_{\text{lit}} \quad (\text{III-04})$$

H_{\max} : Hauteur maximale des eaux dans la retenue.

N_{lit} : Niveau du lit de l'oued.

Revanche

La revanche est la tranche comprise entre la côte des plus hautes eaux et la crête du barrage. Elle dépend de la hauteur des vagues, de la projection de l'eau vers le haut du barrage suite à l'écrasement des vagues contre le talus amont du barrage.

La revanche constitue une marge de sécurité pour l'ouvrage dans le cas de montée exceptionnelle du plan d'eau au-dessus de la côte des plus hautes eaux.

Plusieurs formules ont été proposées pour la détermination de la revanche, parmi lesquelles les formules simplifiées suivantes:

➤ **Formule de STEVENSON GAILLARD :**

$$R = 0.75H_v + V^2/2g \quad (\text{III-05})$$

H_v : Hauteur des vagues en m ;

V : Vitesse des vagues en m/s

* Hauteur des vagues : plusieurs formules proposées, parmi eux :

➤ Formule de Stevenson :

- Pour $F < 18 \text{ km}$: $H_v = 0.75 + 0.34\sqrt{F} - 0.26\sqrt[4]{F}$ (III-06)

- Pour $F > 18 \text{ km}$: $H_v = 0.34\sqrt{F}$ (III-07)

F : La longueur du plan d'eau (fetch) en (km).

* V : Vitesse de propagation des vagues (m/s).

$$V = 1.5 + 2H_v \quad (\text{III-08})$$

➤ **Formule de MALLET et PAQUANT :**

$$H_v = 0.5 + 0.33\sqrt{F} \quad (\text{III-09})$$

$$R = 0.75H_v + v^2/2g \quad (\text{III-10})$$

➤ **Formule Simplifiée :**

$$R = 1 + 0.3\sqrt{F} \quad (\text{III-11})$$

Chapitre IV. Dimensionnement des composants du barrage

IV-1 Largeur en crête du barrage

La largeur en crête du barrage doit être suffisante afin de permettre la circulation des engins pour l'entretien et la réparation de l'ouvrage, et d'assurer une sécurité suffisante contre tout risque de circulation d'eau importante à travers le barrage près de son couronnement lorsque le réservoir est plein.

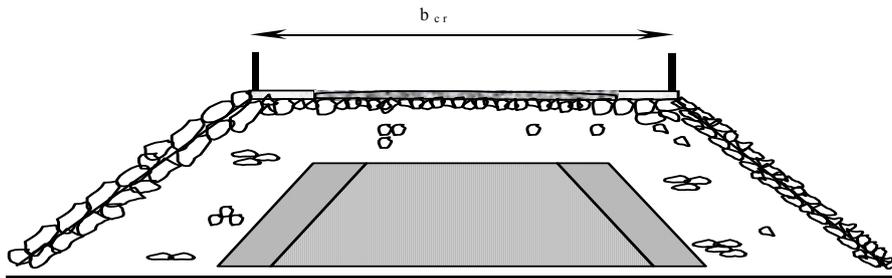


Figure IV-01 : Crête d'un barrage en terre

La hauteur de la crête de la digue est égale à :

$$H_B = \text{NNR} + R + h_{\text{dév}} + t \quad (\text{IV-01})$$

H_B : Hauteur du barrage ;

NNR : Niveau normal de la retenue ;

R : Revanche en (m) ;

t : Tassement en (m) ;

$h_{\text{dév}}$: Charge sur le déversoir.

La largeur en crête est généralement déterminée en fonction de la hauteur du barrage par les relations suivantes:

- Formule de **T. KNAPPEN**

$$b_{\text{cr}} = 1,65. (H_b)^{1/2} \quad (\text{IV-02})$$

- Formule de **E.PREECE**

$$b_{\text{cr}} = 1,1. (H_b)^{1/2} + 1 \quad (\text{IV-03})$$

$$b_{\text{cr}} = 3,6. (H_b)^{1/3} - 3 \quad (\text{IV-04})$$

H_b : Hauteur du barrage.

b_{cr} : Largeur de la crête du barrage.

Généralement la largeur en crête d'un barrage en terre est supérieure à 3 m. Pour les ouvrages de hauteur dépassant les 9 mètre. On adopte souvent une largeur égale au (1/3) de la hauteur de la digue.

✚ Protection de la Crête

La crête du barrage en tant qu'élément de la digue est nécessaire pour donner au profil en travers une forme trapézoïdale stable. Elle peut servir pour les passages de service.

La crête est revêtue de par un mélange constitué de gros graviers bitumés, et elle doit être constituée de matériaux insensibles à l'eau, et à la circulation des véhicules, et la couche de protection doit être bien compactée.

La crête est profilée soigneusement, afin d'empêcher toute stagnation des eaux (pour éviter les infiltrations dans le corps du barrage), on préconise, en ce sens, d'adopter un dévers amont uniforme de (3 à 4) % pour permettre l'évacuation des eaux de pluie vers le parement amont (mieux protégé).

IV-2 Pentes des talus :

Les pentes des talus amont et aval sont en fonction des matériaux de construction utilisés et leur caractéristiques mécaniques et de la hauteur et la classe du barrage.

Le tableau (IV-01) donne quelques valeurs indicatives des pentes des talus.

Tableau (IV-01) : Les fruits des talus en fonction du type du barrage

Hauteur du barrage (m)	Type de barrage	Fruit	
		amont	aval
0 < H < 5	<ul style="list-style-type: none"> • Homogène. • A Zone. 	1/2.5	1/2
		1/2	1/2
5 ≤ H < 10	<ul style="list-style-type: none"> • Homogène (granulométrie étendue). • Homogène à fort pourcentage d'argile. • A Zone. 	1/2	1/2
		1/2.5	1/2.5
		1/2	1/2.5
10 ≤ H ≤ 20	<ul style="list-style-type: none"> • Homogène (granulométrie étendue). • Homogène à fort pourcentage d'argile. • A Zone. 	1/2.5	1/2.5
		1/3	1/2.5
		1/2	1/3
H > 20	<ul style="list-style-type: none"> • Homogène (granulométrie étendue). • Homogène à fort pourcentage d'argile. • A Zone. 	1/3	1/2.5
		1/3.5	1/2.5
		1/3	1/3

Pour les barrages de hauteur inférieure ou égale à 10 mètres, on choisit une pente constante.

Pour les barrages de hauteur supérieure à 10 mètres on choisit des pentes variables plus grandes à la semelle et plus petite à la crête.

A chaque changement de pente il est préférable de prévoir une berme de largeur 2 à 3 mètres, équipée d'une rigole parallèle à la ligne de la crête.

✚ Protection des talus :

a- Talus amont :

Le talus amont devra être protégé contre le déferlement des vagues et les violentes précipitations, pour cela on prévoit un revêtement de protection en enrochement ; celui-ci est caractérisé par :

- Le faible prix.
- Le temps de réalisation relativement court.
- Le maintien de la stabilité du talus lors d'une vidange rapide.

• **Épaisseur de la couche de protection :**

Pour déterminer l'épaisseur de cette couche, on utilise la méthode de « T. V.A. »

• **Méthode T.V.A (Tennessee-Valley- Authority) :**

On a: $e = CV^2$

V : Vitesse de propagation des vagues (V = m/s).

C : Coefficient dont la valeur est en fonction de la pente du talus et du poids spécifique du matériaux d'enrochement ($\gamma_p = g/cm^2$)

La valeur de "C" est donnée par le tableau (V-03)

Tableau (IV-02) : Valeur de C

Pente du talus	Valeur de C		
	$\gamma_p = 2.5$	$\gamma_p = 2.65$	$\gamma_p = 2.80$
1/ 4	0.027	0.024	0.022
1/ 3	0.028	0.025	0.023
1/ 2	0.030	0.028	0.026
1/ 1.5	0.036	0.028	0.030
1/ 1	0.047	0.041	0.038

b- Talus aval :

Le talus aval est soumis en général au processus de l'altération superficielle naturelle (action des vents précipitations), c'est pour cela que la couche d'enrochement sera moins importante que celle du talus amont.

On protège ce talus par une conche en enrochement de 0,2 m.

IV-3 La clé d'étanchéité

La profondeur de la clé d'étanchéité est exécutée jusqu'à 03 mètre. S'il faut avoir la grandeur supérieure de l'élément d'étanchéité on construira.

On détermine les dimensions du dispositif de l' d'étanchéité par le calcul, et on les corrige d'après les conditions des exécutions des travaux en ces d'utilisation de procédés mécanisés. L'épaisseur d'élément (clé d'étanchéité) est égale (3-4) m, prend les talus ($m_1 = m_2 = 1/1$)

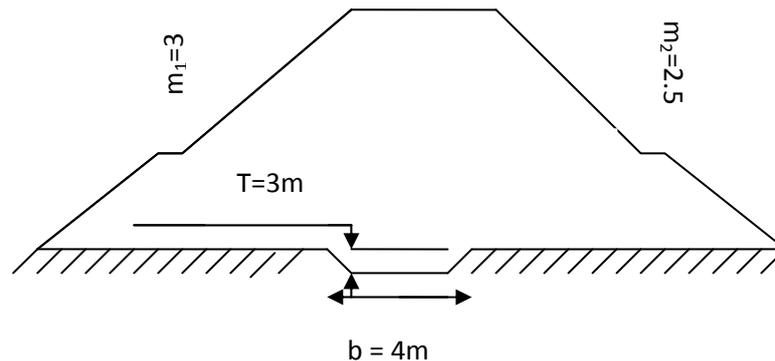


Figure IV-02 : Clé d'étanchéité du barrage

IV-4 Le dispositif de drainage du remblai

L'expérience montre que, même les petit barrages ($H < 5\text{ m}$) l'absence du drainage engendre couramment des désordres lorsque la ligne de saturation, parfois au bout de plusieurs années de service (remblais très imperméable), finit par recouper le talus aval.

Pour contrôler les infiltrations à travers le remblai, il est nécessaire de mettre en place un dispositif drainant et filtrant.

En ce qui concerne la qualité des matériaux, les principaux essais, outre la granulométrie, sont :

- Mesure du coefficient de friabilité des sables ;
- Essai Losange les (chocs) et l'essai (Micro- Deval) (usure) pour les graviers ;
- Equivalent de sable (la présence d'argile peut entraîner une cohésion et donc la fissuration du matériau) ;
- Les matériaux calcaires sont à éviter pour les organes de drainage.

IV-4-1 Le drain vertical

Le drain vertical ou drain cheminée est une alternative intéressante au du tapis drainant puisqu'elle permet d'éviter le dysfonctionnement potentiel du drainage consécutif a l'anisotrope de perméabilité, l'épaisseur a retenir pour un tel drain est d'ordre 0.6m comme

une valeur minimal et l'implantation idéal se situe, un peut en aval de l'axe du remblai (a fin de bénéficier au maximum de d'étanchéité apporte par le remblai amont).

Le sommet du drain est arase au niveau normale de la retenue (NNR) ou plus de quelques centimètres (0.1-0.5) m, pour la sécurité il n'est pas nécessaire de le prolonger jusqu'au niveau des plus hautes eaux (NPHE)

- **Dimensionnement du drain vertical :**
 - **Hauteur du drain :** $H_{dr} = NNR + (0.1-0.5)$
 - **Epaisseur du drain :** e_{dr} d'après le tableau :

Tableau (V-04) : Les valeurs du coefficient C :

$H^2\sqrt{V}$	<30	30 a 100	100 a 300	300 a 700	700 a 1500
Epaisseur (m)	0.50	0.80	1.00	1.20	1.50

H : hauteur du barrage en (m).

V : volume de la retenue en (Mm³).

e_{dr} : Epaisseur du drain

IV-4-2 Le tapis drainant sous le talus aval

C'est la solution traditionnellement adoptée pour assurer le drainage d'un remblai homogène, ce tapis de matériau drainant, d'une épaisseur de 0.5m, s'étend sur (1/4-1/3) de l'emprise du barrage.

On note que l'implantation idéale se situe, un peu en aval de l'axe du remblai (afin de bénéficier au maximum de l'effet d'étanchéité apporté par le remblai amont).

- **Dimensionnement du tapis drainant :**
 - **Longueur du tapis drainant :**

$$L_d = (1/3-1/4)L_b$$
 L_d : longueur du drain tapis en (m).
 - **L'épaisseur du tapis :** $e_t = 0.5m$

IV-4-3 Le prisme de drainages : permettent de :

- Réceptionner et évacuer les eaux infiltrées à travers le corps du barrage et sa fondation.
- Rabattre la ligne phréatique le plus bas possible.
- Réduire les pressions interstitielles dans certaines parties du corps du barrage.

- **Dimensionnement du prisme de drainage :**

Fruit des talus : $m_1 = (1.25-1.75)$ et $m_2 = (1.75-2.5)$

Hauteur : $H_{dR} = (0.15-0.2) H_b$

IV-4-4 Calcul des filtres :

IV-4-4-1 Règles des filtres :

Les filtres sont une succession des couches de granulométrie très variée .Ils sont situés :

- Au pied aval du barrage ;
- A la protection du talus amont (zone de transition entre l'eau et les recharges) ;
- Entre le tapis filtrant et les recharges.

L'exigence primordiale aux sols des filtres, qu'ils doivent vérifier, les conditions de l'absence du renard.

Condition 1 :

$$\frac{D_5}{D_{17}} \geq 0,32 \sqrt[6]{\eta} (1 + 0,05\eta) \frac{n}{1-n}$$

Où:

η : Coefficient d'hétérogénéité du sol du filtre, $\eta = D_{60}/D_{10}$.

n : Porosité du sol en fonction d'unité $n = n_0 - 0,1 \text{Log } \eta$.

$n_0 = 0,4$ pour les sols caillouteux.

$n_0 = 0,45$ pour les sols argileux.

Condition 2 :

Vérification des suffisances de perméabilité :

$$K_F \geq (2 + \sqrt[6]{\eta})K \text{ (m/s)}$$

Où :

K : Coefficient d'infiltration du sol protégé (m/s) ;

K_F : Coefficient de perméabilité du filtre (m/s).

Condition 3 : (zone de transition)

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4$$

IV-5 Calcul des infiltrations à travers la digue et la fondation :

La filtration d'eau à travers le corps du barrage en terre et sous ses ouvrages se produit sous l'effet de la charge d'eau au bief amont.

Les statistiques montrent que plus de 50% des avaries graves sur les barrages sont provoquées par l'effet des infiltrations, c'est pourquoi il faut toujours faire un calcul sur les infiltrations, donc établir la position de la ligne phréatique ou la ligne de saturation dans le massif de la digue, déterminer le gradient de filtration, les vitesses de filtration et les débits de filtration à travers de l'ouvrage et le sol de fondation.

IV-5-1 Tracer de la ligne de saturation :

Il existe plusieurs méthodes de calcul de filtration à travers des barrages en terres : les méthodes expérimentales, hydromécaniques et les méthodes hydrauliques.

Pour le tracer de la ligne de saturation on utilise la méthode grapho-analytique de KOZENY.

- **Admissions dans les calculs de filtrations hydrauliques des barrages en terres :**

1/- On admet la filtration dans un seul plan.

2/- On prend les composantes des vitesses qui ont la direction perpendiculaire à ce plan comme nulles.

3/- On suppose que le sol du massif du barrage soit homogène, isotrope, et que la couche imperméable ai un coefficient de filtration nul.

4/- La position de la ligne phréatique ne dépend pas de la qualité du sol des barrages en terre homogène, mais elle est seulement déterminée par les dimensions de la section transversale du barrage.

- KOZENY a montré que la ligne de saturation peut être assimilée dans sa partie médiane à une parabole d'axe horizontal, dont le foyer "o" est situé au pied du parement aval du barrage (fin du drain).

- L'équation de la parabole s'écrit :

$$y^2 - y_0^2 - 2xy_0 = 0 , \quad \text{avec} : y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d$$

d : largeur de base du massif .

b : Projection horizontale de la partie mouillée du parement amont.

La ligne phréatique coupe le talus aval en un point "C_o" à une distance "a" du foyer "o" et une distance "a + Δa" du point d'intersection "C" de la parabole de KOZNEY avec le talus aval.

D'après Casagrande "a" ne dépend que de la distance focale de la parabole de base et de l'angle θ du talus aval. Il a dressé la courbe de variation de C : telle que :

$$C = \frac{\Delta a}{a + \Delta a} \quad \text{en fonction de } \theta, \text{ d'où on peut déterminer "C}_0\text{"}$$

Pour avoir la ligne de saturation, il suffit de relier la parabole de base au point "C₀" et "b" par une courbe normale au parement amont en « b » et tangente à la parabole.

b : le point d'intersection du talus amont avec le plan d'eau.

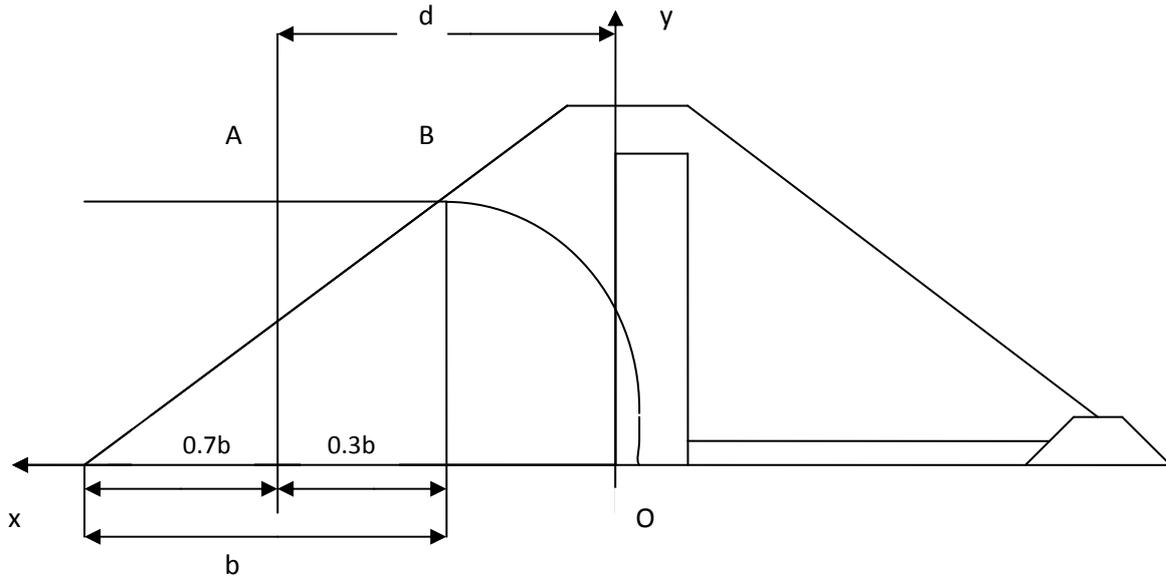


Figure IV-03 : Calcul les infiltrations a travers le corps de la digue

Tableau (V-04) : Les coordonnées de la parabole

X (m)								
Y (m)								

Le point d'intersection de la parabole avec la face aval du noyau "C" est déterminé par

$$l'équation : a + \Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha}$$

a : la distance "Oc" ;

Δa : la distance "C₁C" ;

α : angle de face aval du drain avec l'horizontale.

A partir de l'abaque de Casagrande (fig IV.04), on détermine $\frac{\Delta a}{a + \Delta a}$

$$\text{Ex : } \alpha = 90^\circ \quad \text{d'où : } \frac{\Delta a}{a + \Delta a} = 0.25 \quad \text{et : } a + \Delta a = \frac{2.60}{1 - 0} = 2.60 \text{ m.}$$

De l'équation (2) on aura : $\Delta a = 2.60 \cdot 0,25 = 0.65 \text{ m.}$

D'où : $a = 2.60 - 0.65 = 1.95 \text{ m.}$ $a = 1.95 \text{ m}$

$\Delta a = 0.65 \text{ m}$

Connaissant "a" et " Δa ", on peut tracer le profil de la ligne de saturation.

IV-5-2 Calcul du débit d'infiltration (débit de fuite) :

C'est la nature du matériau (Argile) qui conditionne l'écoulement à travers le corps du barrage.

On peut appliquer à celui ci les règles de l'écoulement à travers une digue homogène, le débit de fuite est donné par :

$$q_n = K.I.A$$

q_n : débit d'infiltration ($\text{m}^3/\text{s/ml}$) ;

I : gradient hydraulique ;

K : Coefficient de perméabilité ;

A : section d'infiltration par unité de longueur.

Le gradient hydraulique est déterminé par : $I = \frac{dy}{dx}$ et : $A = y.l$

Pour une digue homogène assis sur fondation imperméable

$$q_n = Ky \frac{dy}{dx} \quad \text{Avec : } y \frac{dy}{dx} = y_0$$

D'où : $q_n = Ky_0 \text{ m}^3/\text{s/ml.}$

IV-5-3 Vérification de la résistance d'infiltration du sol du barrage :

- *dispositif d'ancrage* . :

La résistance d'information du sol est donnée par :

$$I = \frac{\Delta H}{\delta n} \leq I_{adm}$$

ΔH : perte de charge dans le noyau : $\Delta H (H_{\text{amont}} - H_{\text{aval}})$ de la ligne de saturation.

δn : épaisseur de la clé d'étancheité.

I_{adm} : gradient hydraulique ; on le détermine à partir du tableau (a)

Tableau (V-05) : Gradient hydraulique admissible

sol du corps du barrage	Classification de l'ouvrage			
	I	II	III	IV
Argile compactée	1.5	1.6	1.8	1.95
Limon	1.05	1.15	1.25	1.35
Sable- moyenne	0.7	0.8	0.9	1
Limon sableux	0.55	0.65	0.75	0.86
Sable fin	0.45	0.55	0.65	0.75

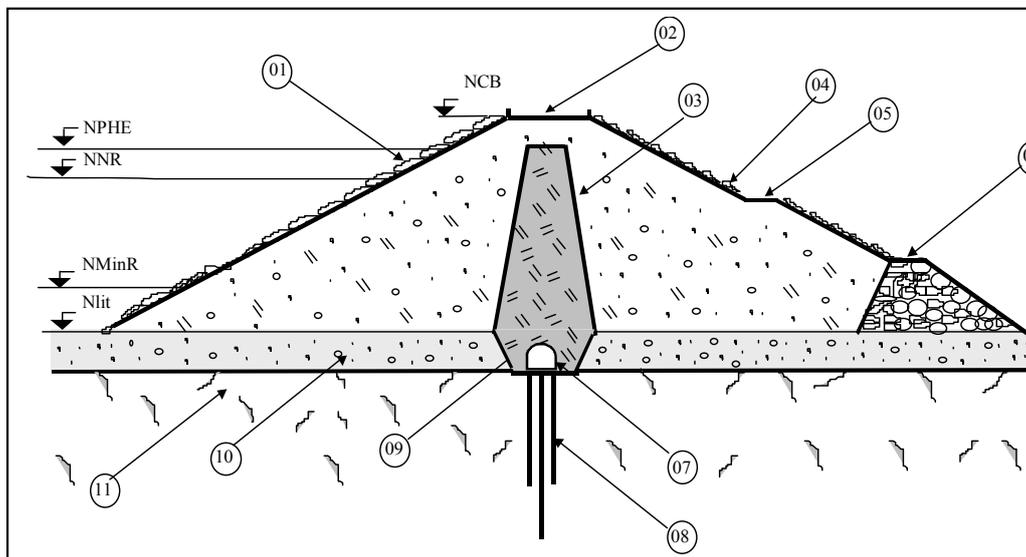


Figure IV-04: Schéma principal de structure d'un barrage en terre

- 01- Revêtement du talus amont.
- 02- Crête du barrage.
- 03- Organe d'étanchéité.
- 04- Revêtement du talus aval.
- 05- Berme.
- 06- Organe de drainage.
- 07- Galerie d'injection et de visite.
- 08- Rideau d'injection.
- 09- Parafouille.
- 10- Sol de fondation perméable.
- 11- Sol de fondation imperméable.

