
Suite ... BARRAGE ET RETENUES COLLINAIRES

Remarque : Pour mieux comprendre le cours, il faut voir les figures dans le support de cours.

Etude topographique

La topographie constitue le support essentiel du travail du géologue qui doit toujours situer plus ou moins précisément les observations qu'il réalise. L'étude topographique est engagée au stade de l'étude de faisabilité. Elle est basée sur la cartographie aérienne et les fonds de cartes à l'échelle 1/25 000 ou 1/50 000. Elles permettront de choisir l'emplacement final du barrage qui doit remplir les conditions suivantes:

- La largeur de la gorge doit être la plus faible possible afin de réduire le volume des remblais,
- La capacité du réservoir doit être la plus grande possible pour une hauteur donnée du plan d'eau.

Echelle du bassin versant : Elle est basée sur :

- Photographie aérienne,
- Cartes aux échelles appropriées,
- Situation de la retenue à l'échelle du bassin versant,
- Morphologie : études hydrologiques,
- Précision des cartes : définir les éléments caractéristiques du bassin, réseau hydrographique, définition du relief.

Crues et ouvrages hydrauliques :

Le coût des ouvrages d'évacuation des crues dépend des caractéristiques hydrologiques du bassin versant. Au contraire, un déversoir de petites dimensions favorise plutôt le choix d'un barrage en remblai. Lorsqu'une galerie est requise pour assurer la dérivation provisoire du cours d'eau durant les travaux, cette galerie peut être avantageusement intégrée aux ouvrages d'évacuation des crues.

Morphologie de la vallée

L'emplacement idéal et le plus économique est celui d'un site étroit, précédé à l'amont par un élargissement de la vallée, à condition géologiques que les appuis du barrage soient sains.

En première approximation, une vallée large conviendra mieux à l'aménagement d'un barrage en remblai. Un site étroit conviendra aussi à un barrage poids et un site très étroit conviendra aussi à une voûte. Tout cela bien sûr sous réserve que les fondations le permettent.

Il est à noter que les tailles considérées pour ces calculs sont variables.

Le critère topographique dépend de deux rendements différents :

Rendement topographique : il est calculé de la façon suivante : $R_T = \frac{V_R}{S_E}$

V_R : le volume de la retenue calculé à l'aide des courbes HSV (Hauteur surface Volume)

S_E : la surface écran de la digue donnée par la section transversale de l'Oued.

Courbe hauteur-Volume-Surface

Les données topographiques, nous permettent de reconstituer la courbe Hauteur-Volume du barrage.

$$V_{i+1} = \frac{S_i + S_{i+1}}{2} * h \quad (14)$$

V_{i+1} : volume du bassin versant en m^3

S_i : surface du plan d'eau correspondant à la courbe i (ha)

S_{i+1} : surface du plan d'eau correspondant à la courbe $i+1$ (ha)

h : dénivelée entre deux courbes de niveau n et $n+1$ (m)

Rendement économique :

$$R_E = \frac{V_R}{S_D}$$

V_R : le volume de la retenue

V_D : le volume de la digue.

Ces deux rendements permettent de faire une comparaison topographique entre les sites proposés.

Géologie et conditions de fondation

Le critère géologique se base sur la qualité des fondations en termes de résistance, rigidité, fracturation et pendage. Pour pouvoir comparer géologiquement entre les axes proposés, une étude géologique et géotechnique détaillée de chaque axe est requise. Elle doit étudier :

- Les types de fondations,
- La sismicité,
- La stratigraphie,
- Les degrés de fracturation,
- L'existence éventuelle de failles,
- Les profondeurs des substratums,
- L'étanchéité de la retenue (essais Lugeon),
- Présence d'éventuels Karsts (cas des roches carbonatées) les résistances et les modules de rigidité en se basant sur des essais,
- Les caractéristiques géotechniques des fondations (cohésion et angle de frottement interne).

Objectifs d'une étude géologique :

Les points essentiels à considérer dans ces types d'ouvrages sont les suivant :

- Adaptation de l'ouvrage au site ;
- La stabilité de la zone de fondation ;
- L'étanchéité du site et de la cuvette (nécessite un levé géologique à 1:5000 ou à 1:10000) ;
- Les ouvrages annexes ;
- Recherche des matériaux de construction ;
- La stabilité des versants de la cuvette ;
- La sismologie du site ;
- Les apports solides (qui risquent d'envaser la cuvette).

Etude Géotechnique (sol et roche) : Concerne des renseignements sur :

Fondations

- Tassements (sol)
- Déformations (roche)
- Perméabilité
- Sécurité à la rupture
- Altération

Matériaux De Construction

- Granulométrie
- Teneur en eau naturelle
- Comportement au compactage
- Perméabilité
- Tassements/consolidations
- Stabilité
- Durabilité
- RENSEIGNEMENTS REQUI

Matériaux disponibles

La disponibilité sur le site, ou à proximité, de matériaux utilisables pour la construction d'un barrage a une incidence considérable, souvent même prépondérante sur le choix du type de barrage :

- sols utilisables en remblai ;
- enrochements pour remblai ou protection de talus (rip-rap) ;
- agrégats à béton (matériaux alluvionnaires ou concassés) ;
- liants (ciment, cendres volantes ...).

La possibilité d'extraire ces matériaux de l'emprise de la retenue permet d'accroître la capacité de stockage. En outre, cela minimise généralement les coûts de transport et de remise en état des zones d'emprunts.

Etude sismologiques

L'étude sismologique se base sur l'historique ou déterministe (sismotectonique), de la sismicité du site est entreprise et aboutit à la définition de deux séismes de référence :

- le séisme de projet, que l'ouvrage doit être en mesure de supporter sans aucun dommage ;
- le séisme maximal probable, auquel le barrage doit pouvoir résister sans ruine ni mise hors service de ses organes de sécurité.

CRITÈRES ÉCONOMIQUES

La finalité de l'étude socio-économique est de fournir des données permettant d'apprécier l'intégration du projet dans son environnement socio-économique. Elle permet de :

- Fournir des données ou des informations nécessaires à l'estimation des besoins en eau et la connaissance du site ;
- Mesurer l'adhésion des populations au projet ;
- Recenser les populations à déguerpir ou à exproprier du fait de la création de l'ouvrage
- Examiner la situation foncière en fonction des textes et de l'occupation ou utilisation traditionnelle ou en cours des terres du site ;
- Apprécier les préjudices encourus par les collectivités du fait de la création de l'ouvrage
- Sensibiliser les populations ;
- Dégager les mesures d'accompagnement nécessaires à la réussite du projet, etc...

Etude préliminaire :

L'étude préliminaire consiste à réunir le maximum d'informations reliées à l'historique du barrage, ses caractéristiques topographiques, la connaissance de la géologie locale et l'hydrodynamique de la région. En dehors de la planification et des aspects juridiques d'un projet de barrage, les principales études préliminaires à mener avant le choix de l'emplacement du barrage sont :

- Les études topographiques,
- Les études géologiques,
- Les études géotechniques,
- Les études hydrologiques.

Etude climatique

Les conditions climatiques influencent de manière prépondérante les conditions d'exécution de l'ouvrage, le délai d'exécution. Il peut en être de même en ce qui concerne la durabilité de barrage.

Quelques aspects particuliers sont décrits ci-dessous à titre d'exemple :

- ❖ Noyau argileux des barrages en remblai (condition pendant la construction).
- ❖ Barrage a contrefort (condition pendant l'exploitation, température par exemple).
- ❖ Masque amont en béton asphaltique. Ce matériau est particulièrement sensible aux effets des températures extrêmes :
- ❖ Déformation plastique sous température élevée,
- ❖ Vieillesse accéléré sous l'effet du gel et de l'exposition au rayonnement solaire.

Etude de température et de l'évaporation :

L'analyse des séries de températures et des évaporations est insérée au niveau des aspects suivants :

- ✓ Caractérisation du climat de la région,
- ✓ Estimation des paramètres climatiques,
- ✓ Elaboration du calcul de régularisation du réservoir,
- ✓ Elaboration du bilan hydrique.

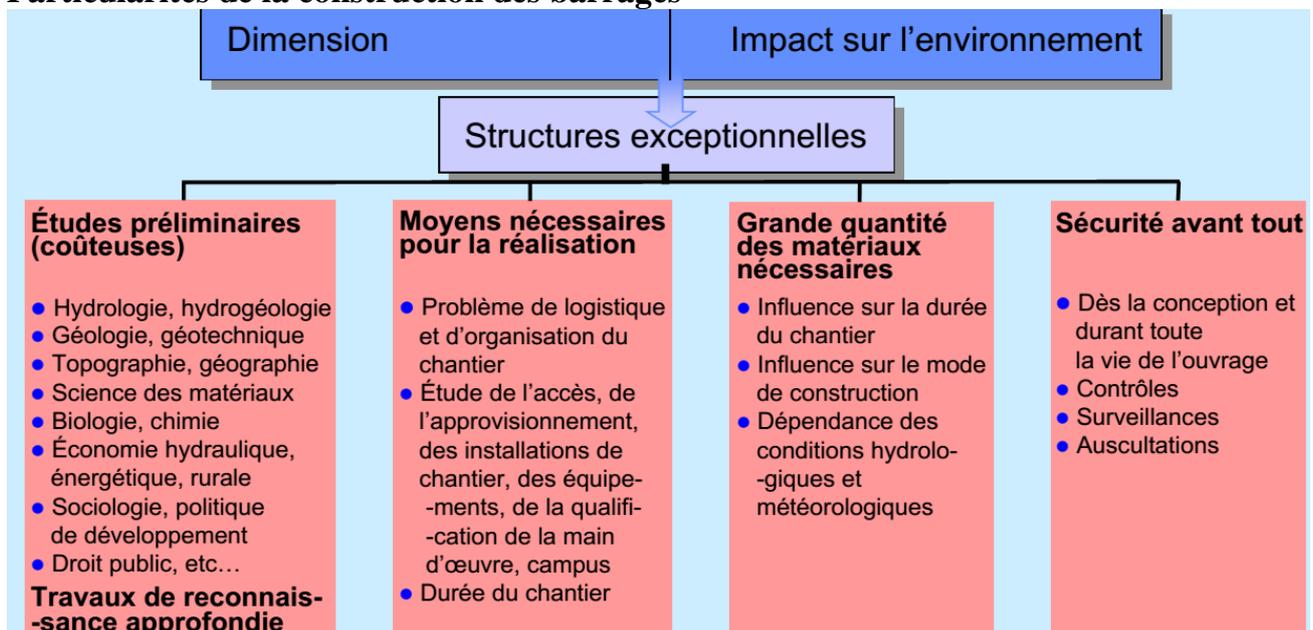
Choix du site et du type de barrage :

Les principaux paramètres à prendre en compte dans le choix du type de barrages sont les suivants :

- La zone sismique
- La topographie et les apports du bassin versant ;
- La morphologie de la vallée ;
- Les conditions géologiques et géotechniques ;
- Le contexte météorologique et le régime des crues.

Dans plusieurs cas, après considération de ces aspects, plusieurs types de barrages resteront possibles. Des considérations économiques permettront alors de départager les solutions.

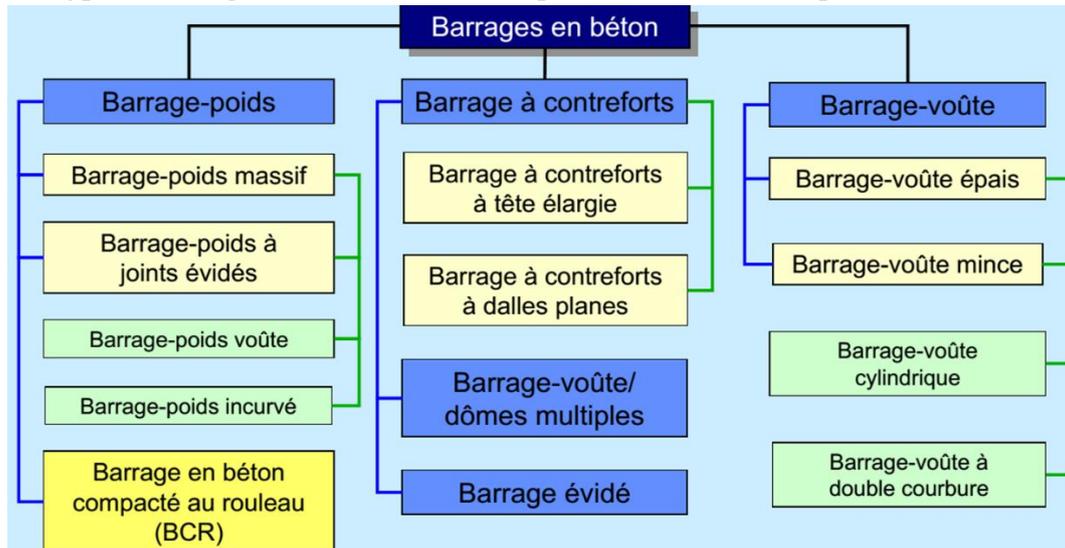
Particularités de la construction des barrages



Chapitre II : Barrages en Béton

1. Différents types de barrage en béton

Le choix du type de barrage utilise des critères importants et doivent impérativement être respectés.



Ces barrages s'opposent à la force créée par la pression de l'eau soit par leur propre poids (barrages poids), soit en reportant sur les rives par un effet de voûte la poussée hydraulique (barrages voûte), soit encore en associant ces deux possibilités (barrages poids-voûte), soit enfin en reportant sur les efforts sur le sol par l'intermédiaire de contreforts.

1. Barrage poids

Construit en maçonnerie ou en béton, les barrages poids sont souvent utilisés pour des vallées larges ayant des fondations rocheuses et sont très épais. Ces barrages provoquent de faibles contraintes sur les parois rocheuses des vallées. Ces constructions nécessitent beaucoup de matériaux mais ils sont tout de même toujours très utiles lorsque les fondations et que la géologie ne permet pas la construction de barrage voûte ou à contreforts.

Les barrages poids évidés utilisent moins de béton puisque qu'ils sont creux à l'intérieur. En conséquence, l'ensemble des barrages sont donc très sensibles aux séismes. Le changement de température ne provoque pas de contraintes importantes.

Stabilité d'un Barrage poids :

La méthode classique d'étude de la stabilité d'un barrage poids consiste à analyser l'équilibre global du barrage ou d'une partie de celui-ci sous l'action du poids, de la poussée hydrostatique, des sous-pressions et éventuellement d'autres actions secondaires (par exemple poussée des sédiments, action du vent ou séisme).

Les critères de dimensionnement de l'ouvrage portent sur la répartition des contraintes normales (limitation des tractions au pied amont et limitation des contraintes de compression) et sur l'inclinaison de la résultante. Cette méthode de calcul met en évidence le rôle majeur des sous-pressions dans l'équilibre des barrages poids et donc l'importance du drainage.

Différentes composantes d'un barrage poids (Voir l'image au cours)

Sollicitations - Forces et action d'un barrage Poids: **E** : poussée de l'eau ; **E_o** : amont **E_u**: aval ; **h** et **v** composantes et horizontales verticales ; **P** : poids propre ; **F_T** : poussée des terres (sédiments accumulés au fond du lac) ; **S** : sous-pression. ; **D** : actions dynamiques dues aux tremblements de terre. ; **T** : actions à cause de température.

Avantages d'un barrage poids

- Faibles contraintes dans le béton
- Faibles contraintes transmises au rocher
- Les variations de température ne produisent que des contraintes faibles
- Gradient des sous pressions sous la fondation faible
- Évacuateur de crue pour facilement être intégré
- De plus, nous évitons autant que possible des formes complexes qui entraînent une augmentation inutile du coût de coffrages.

Inconvénients d'un barrage poids

- Volume d'excavation important
- Volume de béton important
- Refroidissement artificiel nécessaire lors de la prise du béton
- Sous- pressions importantes sous la fondation
- Sensibilité aux tassements
- Sensibilité aux séismes

2. Barrage à contreforts

Très peu répandus dans le monde, les barrages à contreforts sont, pour la plupart, des murs plats ou en multi-voutes en béton qui s'appuient sur des contreforts en béton armé eux même encastrés dans les fondations. Ainsi l'eau est repoussée sur les contreforts inférieurs et sur les rives. Dans ce type d'ouvrages, l'étanchéité est assurée par le voile en béton armé situé en amont et la stabilité vis à vis de la poussée de l'eau par les contreforts.

Différents types de barrages à contreforts (Voir l'image au cours)

Avantages d'un barrage à contreforts

- Volume de béton plus faible que pour le barrage- poids
- Contraintes moyennes transmises au rocher
- Faibles sous-pressions sous la fondation
- Échauffement faible lors de la prise du béton
- L'évacuateur de crues peut facilement être intégré

Inconvénients d'un barrage à contreforts

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

3. Barrage voûte

Les barrages voûtes ne s'accommodent que de vallées relativement étroites et de forme assez régulière. Ils sont utilisés lorsque la largeur de la gorge ne dépasse pas 5 à 6 fois la hauteur du barrage projeté. Pour des largeurs plus importantes des dispositions constructives particulières doivent être adoptées. La force de l'eau est alors répartie sur les flancs rocheux.

La courbure de la voûte permet de reporter les efforts de pression sur les appuis de rive, tout en conservant une paroi comprimée.

Avantages d'un barrage Voûte

- Volume de béton faible
- Volume d'excavation relativement faible
- Faible sous-pression sous la fondation
- Haute résistance au séisme

Inconvénients d'un barrage Voûte

- Contraintes importantes dans le béton
- Contraintes importantes dans le rocher sous la fondation
- Efforts transmis obliquement aux appuis latéraux
- Sensibilité limitée aux tassements
- Échauffement durant la prise du béton pouvant nécessiter des mesures particulières
- Gradient de sous-pression sous la fondation important
- Drainage des fissures des massifs d'appui devant être rigoureusement traités
- Difficulté d'intégration de l'évacuateur de crues dans la digue

Les matériaux utilisés pour les barrages en béton :**Barrages en béton compacté au rouleau (B.C.R.) :**

C'est la technique actuelle qui prédomine pour la construction de barrages poids. Le béton n'est plus coulé dans des coffrages, ni vibré avec des aiguilles, mais il est répandu avec des engins de travaux publics (bulldozers, niveleuses) et serré par des compacteurs vibrants suivant des techniques de terrassements routiers. L'épaisseur de couches varie de 30 à 60 cm. L'objectif principal est de ne rajouter aux granulats que la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du ciment. Les dosages en ciment sont d'environ 100 kg/m³, ce qui réduit l'échauffement thermique et donc le nombre de joints. Les granulats utilisés pour le corps du barrage sont en général un grave recomposé.

Les difficultés de la construction de ce type de barrage sont :

- *la résistance mécanique, notamment au cisaillement, des surfaces horizontales de contact entre deux couches superposées. Cette résistance dépend de plusieurs facteurs (propreté du chantier, quantité de fines, ségrégation, température, temps écoulé entre la réalisation de deux couches, etc.).*
- La résistance des couches au cisaillement peut être améliorée en utilisant un mortier de collage, ou plus simplement en nettoyant au jet haute pression la surface de reprise.

- *l'étanchéité du barrage qui est, la plupart du temps, constituée par un masque amont en béton conventionnel vibré (B.C.V.), ou pour des ouvrages modestes, par une membrane en matériaux plastiques (P.V.C., polyéthylène, etc.). Comme tous les barrages, les barrages en B.C.R. sont équipés de systèmes de drainage efficaces, de galeries de visites.*

Les barrages construits en B.C.R. permettent de faire d'importantes économies sur les matériaux (ciment) tout en autorisant des cadences de travail très élevées grâce à une mécanisation très poussée.

Formulation du B.C.R. :

Sable concassé 0/5 : 17 % ; sable naturel : 17 % ; 5/25 : 32.3 % (recomposé à partir de 5/10 et 10/25) ; 25/50 : 28.4 % ; liant : 5.3 % (120 kg /m³) ; Masse volumique en place : 2.3 t/m³

Béton conventionnel vibré (BCV) :

La technologie des barrages poids en BCV met en œuvre des bétons de granulométrie importante (jusqu'à 80 millimètres) et des dosages en ciment de l'ordre de 200 à 250 kg/m³.

L'exothermie de la réaction d'hydratation du béton conduit pendant la prise à de fortes augmentations de température du béton et à un risque de fissuration lors du refroidissement.

Les barrages en BCV sont pour cette raison construits par plots de dimensions horizontales courantes 15 x 15 mètres nécessitant la mise en œuvre de nombreux joints de contraction, transversaux et longitudinaux (au moins pour les barrages de grande hauteur). Pour les petits barrages, il est généralement possible de se contenter de joints transversaux.

La technique des barrages poids en BCV nécessite comme la maçonnerie une importante main d'œuvre, en particulier pour la réalisation des coffrages.

Béton cyclopéen (Maçonnerie) :

Le Béton cyclopéen est un béton contenant des gros blocs de pierre, des moellons, des galets, pouvant avoir des tailles jusqu'à 400mm. Il est généralement utilisé pour de gros volumes ne demandant pas de résistance mécanique élevée (ouvrage massif, remplissage par exemple). En outre il nécessite un matériel de malaxage adapté. Quant au dosage en ciment, il varie de 200 à 350Kg/m³.

Le problème de ces barrages réside dans la qualité de mise en place du béton entre blocs et de sa vibration et aussi le contrôle des couches de 10 à 20 cm de béton de contact entre les couches des blocs.

Surélévation des barrages poids**Raisons :**

- La retenue est sous-dimensionnée.
- Diminution de la retenue suite à un alluvionnement.
- Meilleure utilisation des apports.
- Compensation pluriannuelle.
- Pompage (apports artificiels).

Conditions préalables :

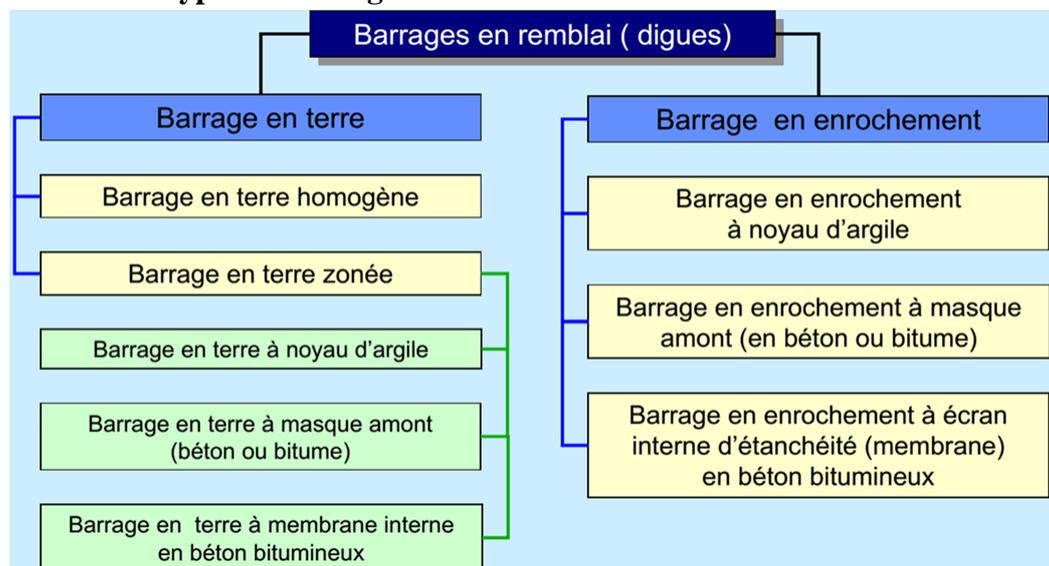
- Le comportement du barrage doit être irréprochable.
- La fondation est adéquate.
- Les sous-pressions sont bien connues.
- La qualité du béton du barrage est suffisante.

Mesures propres à assurer le refroidissement du béton

- Refroidissement naturel
- Refroidissement artificiel du béton pendant son durcissement
- Système de refroidissement avec des tuyaux métalliques en forme de serpentins noyés dans le béton
 - Refroidissement initial du béton frais (mesure complémentaire à 2)
- Agrégats : protéger de l'insolation ; refroidissement en coulant de l'eau froide par-dessus ; souffler l'air froid à travers les agrégats
- **Eau** : refroidir ; remplacer l'eau par de la paillettes de glace
- **Ciment** : souffler de l'air froid dans les silos de stockage
- **Béton** : refroidir pendant le transport (refroidir les bacs conteneurs) ; distances courtes de transport
 - Emploi de ciment à lent dégagement de chaleur
- Ciment de laitier, de haut fourneau ; ciment aux pouzzolanes, aux cendres volantes.

Chapitre 3 : Barrages en Terre et Retenues collinaires

Les barrages en remblai (digues) sont constitués essentiellement de matériaux granulaires naturels meubles prélevés à proximité immédiate de l'ouvrage. 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.

1. Différents types de barrages en terre**1.1. Les barrages en terre homogènes :**

Ils sont totalement construits avec un seul matériau qui est le plus souvent argileux. Ce matériau doit présenter des caractéristiques permettant de garantir une étanchéité suffisante et une stabilité du remblai.

Barrage en terre homogène

Lorsque la perméabilité du sol d'emprunt principal est trop importante, la solution consiste à concevoir un barrage en remblai zoné, c'est-à-dire constitué de plusieurs matériaux repartis par zones dans le corps du barrage.

1.2. Les barrages en terre à noyau étanche :

Dans le cas où la quantité des matériaux imperméables disponibles sur site est insuffisante pour réaliser tout le corps du barrage, on opte le plus souvent pour un ouvrage à zones avec un noyau en argile assurant l'étanchéité. Ce type de barrages présente toutefois l'inconvénient d'une mise en œuvre plus compliquée Et la nécessité de séparer par des filtres de transition les différentes zones.

Notons que le noyau étanche peut être vertical ou incliné et parfois remplacé par un diaphragme en béton au ciment ou bitumineux.

i) Le barrage à noyau central :

Le barrage à noyau est composé d'un noyau central constitué d'un matériau imperméable et de recharge c'est-à-dire une couche supérieure qui recouvre les flancs du noyau.

La stabilité du massif sera assurée par des zones perméables appelées recharges. Ces recharges peuvent être au nombre variables et disposées différemment d'un barrage à un autre en fonction de la nature du matériau et des conditions spécifiques à chaque barrage.

Les recharges peuvent être constituées d'enrochement ou d'alluvions. Elles permettent d'assurer la stabilité du barrage, alors que le noyau central assure son étanchéité.

ii) Barrage a noyau incliné :

L'élément étanche ou très peu perméable, comme un noyau en limon argileux peut dans certains cas être déplacé vers l'amont jusqu'à l'élimination complète du corps amont, on obtient la solution d'une digue à noyau incliné.

Plus le noyau est incliné plus la pente du parement amont est conditionnée par les propriétés mécaniques du matériau du noyau.

1.3. Les barrages en terre à masque amont :

Les barrages en terre à masque sont des remblais perméables avec un écran imperméable appelé masque placé sur le parement amont.

Le corps du barrage est construit avec un matériau quelconque pour autant qu'il soit peu déformable et pouvant assurer la stabilité au glissement de l'ensemble de l'ouvrage.

Le masque qui assure l'étanchéité peut être en béton, en produits bitumineux ou en géo membrane. La présence de ce masque sur le parement amont présente un double avantage de pouvoir faire des réparations en cas de dégradation du masque et de permettre de faire des vidanges rapides sans risque de glissements.

1.4. Barrages en enrochements (rock-fill dams)

Les matériaux de carrière avec lesquels sont constitués les barrages en enrochements sont toujours perméables. Ces enrochements sont donc toujours associés à un autre élément assurant la fonction d'étanchéité.

En général, ce type de barrages est composé d'enrochements de volume compris entre 0.1 et 10 m³ (0,25 à 25 tonnes). L'inconvénient de ce dernier procédé est que l'ouvrage est soumis après

achèvement à des tassements importants (de l'ordre de 5% de la hauteur). Ceux-ci peuvent être réduits en procédant à un arrosage d'eau sous hautes pressions, pendant la construction. Le compactage du massif étant assuré par la chute des enrochements de hauteurs pouvant atteindre 50 m.

3. Les organes d'étanchéités 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 pertes d'eau par infiltration.

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

3.1. Noyau en argile compacté

Le noyau en matériau argileux compacts, dispose verticalement au centre du barrage ou en position inclinée à l'amont de celui-ci son épaisseur reste de l'ordre de 1/6 de la hauteur de l'ouvrage.

3.2. Diaphragme interne

L'étanchéité des barrages en terre au moyen de diaphragme a pris une très grande importance dans le monde entier et dans toutes les zones climatiques ; cet élément d'étanchéité (mieux que plus part des autres) satisfait, en effet, aux exigences de sécurité les plus strictes grâce à sa déformation sa bonne résistance à l'érosion et au vieillissement, et surtout grâce mode de construction sans joints.

3.3. Masque amont

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

i) Masque en béton de ciment

La dalle doit posséder des joints de construction, du fait du retrait, que l'on munit de lames d'étanchéité. Ces joints sont respectivement parallèles et perpendiculaires aux lignes de plus grande pente du talus, ces dernières étant nécessaires pour diminuer l'importance des efforts de flexion.

ii) Masque en béton bitumineux :

C'est a priori le produit idéal en raison de sa remarquable étanchéité et de sa résistance à flexion. Si certaines fissures se produisent, elles se colmatent d'elles-mêmes peu à peu sous l'effet de la pression de l'eau par déformation plastique. Un béton bitumineux agit de façon plastique aux déformations lentes, de façon élastique aux déformations rapides, or le tassement s'effectue en général de façon lente. Également, les différentes couches de béton bitumineux se soudent littéralement à chaud.

iii) Masque en acier : L'inconvénient en est généralement une question de coût.

iv) Masque en terre : Au moyen de terre argileuse compactée, nous pouvons réaliser une étanchéité convenable, avec des épaisseurs qui sont des caractéristiques de perméabilité du matériau utilisé.

3.4. Etanchéité des fondations des barrages en terre :

On peut considérer les trois cas suivants pour les barrages de types homogènes et zonés :

Cas d'une fondation constituée de matériaux peu perméables : il est recommandé d'exécuter une clé d'étanchéité en matériaux argileux compacts afin de tenir compte de la fissuration superficielle et d'hétérogénéités éventuelles.

Cas d'une fondation ou la présence de couches perméables n'a été mise en évidence que jusqu'à une profondeur de quelques mètres : la clé d'étanchéité doit les barrer et être ancrée dans le niveau étanche. Si ce dernier est le rocher sain, après son nettoyage et une régularisation éventuelle de sa surface, la mise en place d'une première couche d'épaisseur décimétrique constituée d'argile humide permet d'assurer un bon contact.

Cas d'une fondation perméable jusqu'à une profondeur importante : les injections sont utilisables aussi bien dans le cas de fondation meuble que dans celui de massifs rocheux plus ou moins fissurés, les produits d'injection étant adaptés au matériau traité (coulis bentonite-ciment, coulis spéciaux) ; la coupure comporte les plus souvent trois lignes de forages :

i) Clé : C'est une tranchée remplie de matériaux assurant l'étanchéité du massif, qui doit recouper la couche perméable et s'ancrer dans le substratum imperméable. Cette solution est adoptée lorsque l'épaisseur de la couche imperméable n'est pas très grande car l'exécution de la tranchée et son remblai fait d'une manière mécanique.

ii) Paroi moulée : Cette solution est assez classique dans les terrains meubles ; elle est aussi possible dans les fondations rocheuses selon la technique, plus coûteuse.

iii) Tapis d'étanchéité amont : Consiste à étancher la cuvette totalement ou partiellement à l'aide d'une géomembrane ou d'un tapis en matériaux argileux compacts (au minimum deux couches épaisseur de 0,20 mètre chacune).

Avantages des barrages en terre

- Utilisation des matériaux locaux pour la construction du barrage.
- Possibilité de construction ce type de barrages sur n'importe quelles régions géographiques
- Possibilité d'utiliser n'importe quel type de sol.
- Tous les procédés de construction sont mécanisés.
- Construction de ces barrages pour n'importe quelle hauteur.

Inconvénients des barrages en terre

- Impossibilité de conduire le débit de crues à travers le corps de la digue
- Présence de l'écoulement souterrain dans le corps du barrage, qui crée les conditions de déformation du barrage.
- Grande pertes d'eau en cas d'utilisation des sols perméables et utilisation des dispositifs contre la filtration.

Dimensionnement du barrage**1. Dimensionnement de la digue**

A) Hauteur du barrage (H_t) : La hauteur du barrage est égale à la hauteur normale de la retenue (NNR), majorée de la charge maximale au-dessus de seuil du déversoir de crue (h) et la revanche (R). Le niveau normal de la retenue correspond à la capacité utile à stocker. Cette capacité est déterminée en tenant compte du volume des besoins, de la surface à irriguer et de la tranche morte correspondante aux dépôts solides d'égal an.

B) Le niveau des plus hautes eaux (PHE) : Le niveau des plus hautes eaux est égal au niveau normal de la retenue majoré de la charge sur le déversoir de crue. $PHE = NNR + h$

C) La revanche (R) : C'est la tranche comprise entre la côte des plus hautes eaux et la crête de la digue. Elle a pour fonction d'assurer une protection contre les effets des vagues. Elle est estimée par plusieurs formules, par exemple la formule de : Stevenson, Gaillard, Mallet & Pacquant.

D) Côte de la crête du barrage (CCB) : La côte de la crête du barrage est égale à la côte correspondante au niveau des plus hautes eaux (PHE), majorée de la revanche (R). $CCB = PHE + R$

E) Tassement du corps du barrage (T) : Pour des ouvrages conçus et réalisés dans de bonnes conditions, ces tassements sont estimés à environ 1% de la hauteur du barrage après sa construction.

$$T = 1 \% (CCB - CCA)$$

F) Hauteur totale du barrage (H_t) : La hauteur totale du barrage est égale à la côte de la crête du barrage (CCB), diminuée de la côte de la section maîtresse du barrage (la côte à l'exutoire), en ajoutant le tassement.

$$H_t = (CCB - CCA) + T$$

G) La largeur en crête : La largeur en crête d'une digue en terre doit être suffisante pour qu'il n'y ait pas de circulation d'eau importante dans la digue près de son couronnement, quand la retenue soit pleine ; elle doit permettre également, la circulation des engins pour l'entretien de l'ouvrage.

La largeur en crête d'une digue n'est jamais inférieure à 3 mètres. Pour des ouvrages de hauteur supérieure à 10 mètres, on adopte souvent une largeur en crête égale 1/3 de la hauteur du barrage. Par ailleurs, on peut évaluer cette largeur par les formules empiriques suivantes :

G.1) Formule de T.TKNAPPEN : $b = 1.65\sqrt{H} > 3 \text{ m}$

G.2) Formule de E.F.PREECE : $b = 1.1\sqrt{H} + 1$

H) La longueur en crête du barrage (L_t) : La longueur en crête du barrage est mesurée sur une carte topographique d'échelle (1/10000) du site. C'est la distance séparant les deux points d'interaction de l'axe de la digue avec la courbe de niveau ayant pour la côte (CCB).

I) La pente des talus : La pente d'un talus est le produit de la hauteur sur sa projection horizontale au sol. Elle est fixée par les conditions de stabilité mécanique du massif et ses fondations. Pour déterminer la pente des parements, on donne en général des pentes, qui paraissent optimales, compte tenu de la nature des matériaux de construction et la hauteur du barrage. A titre indicatif, le tableau nous donne quelques valeurs, qui doivent être confirmées par l'étude de stabilité.

Pente des talus en fonction de la nature des matériaux (THERZAGUE)

Hauteur de la digue en (m)	Type de la digue	Pente des talus	
		Amont	Aval
< 5 m	- homogène	1/2.5	1/2
	- à zones	1/2	1/2
5 à 10 m	- homogène, granularité étendue	1/2	1/2.5
	- homogène, à fort pourcentage d'argile	1/2.5	1/2.5
	- à zones	1/2	1/2.5
10 à 20 m	- homogène, granularité étendue	1/2.5	1/2.5
	- homogène, à fort pourcentage d'argile	1/3	1/2.5
	- à zones	1/2.5	1/3

Protection de l'ouvrage

9.1. Protection des talus

Lors de la construction du barrage en terre, il y'a lieu de protéger les talus amont et aval contre le phénomène d'érosion, qui est dû aux vents et aux pluies. Il est également impératif de protéger la digue contre le phénomène de renard et la résurgence qui est néfaste à la stabilité du barrage (est un phénomène interne qui se produit avec l'augmentation des vitesses d'écoulement de l'eau sous une formation ou un remblai).

a) Talus aval

Le talus aval est protégé par une couche de 15 cm d'épaisseur de terre végétale. Cependant les eaux d'infiltrations peuvent être considérées aussi comme un danger sur la stabilité de l'ouvrage, d'où la nécessité de disposer d'un drain aux pieds de la digue.

b) Talus amont

Ce talus protégé contre l'effet des vagues par une couche d'enrochement (protection des pierres) ou par un revêtement imperméable (béton bitumineux).

9.2. Protection par un système de drainage interne

Un tel système a pour but de réduire ou d'annuler les pressions interstitielles le long du talus aval de la digue, en empêchant la résurgence néfaste à la stabilité.

a) Tapis drainant

Il est constitué de matériaux drainant disposés au contact du sol de fondation en partie aval.

L'efficacité du tapis drainant dépend beaucoup de l'anisotropie hydraulique du corps de la digue k_h/k_v (rapport des coefficients de perméabilité horizontale et verticale) ; elle est maximale lorsque celui-ci est isotrope ($k_h/k_v = 1$).

b) Drain cheminé vertical où incliné vers l'amont

Ce type de drain est complété par un tapis drainant horizontal. La pression interstitielle est nulle à l'aval du drain, éliminant ainsi toute résurgence et érosion agressive.

9.3. Protection complémentaire**a) Massif du pied aval**

Le système drainant est généralement complété par un massif de pied aval en matériaux grossiers (graviers et enrochement), souvent encré d'environ de 1 m, dans le sol de fondation. Les eaux de collecte sont récupérées dans un drain vers l'exutoire.

b) Puits de décharge ou tranchée drainante

La tranchée drainante est profonde dans le sol de fondation le long du pied aval. Ceci, nous conduit à la réalisation de puits ou des tranchées de manière à réduire des sous pressions excessives appliquées à la base de la couche de surface.

Ouvrages annexes**Longueur du seuil déversant**

La longueur du seuil déversant a été déterminée avec la crue brute. Nous utilisons la loi de débit du déversoir dénoyé avec la crue de projet et la crue de sécurité (on considère que la totalité de la crue est évacuée par l'évacuateur).

Bassin de dissipation et Chenal d'évacuation

Le bassin de dissipation est la partie de l'évacuateur qui sert à dissiper l'énergie de chute et son action érosive. Il doit pouvoir contenir le ressaut hydraulique à l'aval. Le choix du type de bassin de dissipation a été fait en fonction de la vitesse de l'eau à l'entrée du bassin et du nombre de Froude.

Equipements de sécurité et d'entretien

Il s'agit de prises d'eau commandées par des vannes et protégées par grilles permettant d'évacuer rapidement tout ou partie de la retenue. Le problème est d'éviter les dégradations, dues à la puissance de l'écoulement, aussi bien pour l'ouvrage que pour les rives en aval de l'ouvrage.

Évacuateurs de crue :

Il s'agit de trop plein permettant de limiter le niveau d'eau dans le barrage lorsque le débit d'alimentation devient trop important. L'évacuation se fait par le haut du barrage soit le long d'un canal à l'air libre où une partie de la puissance sera consommée par les remous, soit par-dessus le barrage où une partie de l'énergie est absorbée par frottement et pulvérisation dans l'air.

Vidanges de fonds :

Il s'agit de prises d'eau situées au point bas du barrage permettant la vidange pour l'entretien. Les conduites traversent le plus souvent le barrage. Pour éviter la cavitation, qui entraînerait une érosion importante des conduites, on utilise des formes très progressives et des parois les plus lisses possibles (blindages métalliques). En sortie, on cherche à réduire la vitesse de l'écoulement par élargissement des conduites et éventuellement projection dans l'air.