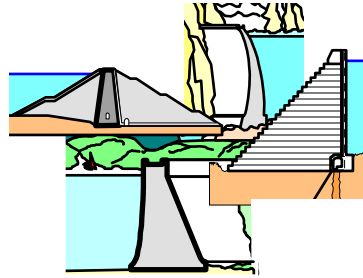


LES BARRAGES



Cours réalisé par Alain Buron et Alain Meilhac

SOMMAIRE

01 HISTORIQUE	page 1
02 LES DIVERS TYPES D'AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES	page 1
03 FONCTIONS D'UN BARRAGE	page 3
03.01 Etanchéité.....	page 3
03.02 Stabilité	page 3
03.03 Equipements.....	page 3
03.03.01 Equipements de sécurité et d'entretien	page 4
03.03.02 Equipements hydroélectriques	page 4
03.03.03 Equipements de circulation	page 4
04 ETUDES PREALABLES.....	page 5
04.01 Choix du site de retenue.....	page 5
04.02 Choix du site du barrage	page 5
04.03 Choix du type de barrage	page 5
04.04 Choix définitifs	page 6
05 DIVERSES CATEGORIES DE BARRAGES.....	page 6
05.01 Les barrages fixes.....	page 6
05.01.01 Les barrages en béton.....	page 6
05.01.01.01 Conception	page 6
05.01.01.02 Réalisation des barrages poids et barrages voûtes	page 11
05.01.02 Les barrages en remblai ou matériaux meubles.....	page 15
05.01.02.01 Conception.....	page 15
05.01.02.02 Réalisation des barrages en remblai.....	page 18
05.02 les barrages mobiles	page 19
06 AUSCULTATION ET SURVEILLANCE DES BARRAGES.....	page 21

01 HISTORIQUE

Il faut remonter au II^e Siècle avant J.C. pour découvrir l'utilisation de la force motrice de l'eau qui actionne des roues à palettes ou à augets (ancêtre de la turbine).

Il a fallu attendre le XIX^e Siècle et l'invention de la turbine par Benoist de FOURNEYRON qui a eu l'idée d'utiliser la pression de l'eau pour entraîner une roue à eau.

En 1883 Marcel DESPREZ réalise le transport de l'énergie à moyenne tension entre VIZILLE et GRENOBLE.(5 Kw sur 14 Km). La force hydraulique fournit alors de l'énergie électrique à distance. L'hydroélectricité est née.

Dans la période de 1920 à 1940, 51 barrages sont édifiés. Le 8 Avril 1946 la loi nationalisation de l'industrie électrique confie à E.D.F. la mission de construire, d'exploiter les moyens de production, et de vendre l'énergie électrique. L'équipement hydroélectrique se poursuit jusqu'en 1966 avec la mise en service de l'usine marémotrice de la RANCE.

Aujourd'hui, avec l'avènement de l'énergie nucléaire, E.D.F est conduit à revoir les fonctions des centrales hydroélectriques sous d'autres aspects :

- grâce à la souplesse et la rapidité d'intervention (démarrage presque instantané et modulable) elle fournit un appoint d'énergie aux heures et périodes de forte demande
- stockage d'eau potable, d'eaux industrielles
- irrigation des terres agricoles
- soutien d'étiage
- écrêtement des crues
- réfrigération des centrales nucléaires
- navigation
- plans d'eau à vocation touristique
- etc.

02 LES DIVERS TYPES D'AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES

Pour produire de l'énergie électrique, on transforme l'énergie hydraulique (chute d'eau) en énergie mécanique avec une turbine puis cette énergie mécanique est transformée grâce à un alternateur couplé à la turbine, en énergie électrique.

Pour une même puissance fournie, une turbine peut être alimentée par un gros débit et une faible chute, ou par un petit débit et une forte chute. En considérant un rendement de l'installation de 80 %, 1 Kwh peut être obtenu soit par 1 m³ d'eau tombant de 450 m de hauteur, soit par 100 m³ tombant de 4.50 m de hauteur.

1 kwh, c'est l'énergie produite par 1000 watts pendant 1 heure soit $1000 \times 3600 = 3.6 \cdot 10^6$ joules.

$$\text{RENDEMENT} = \frac{W_{\text{fournie}}}{W_{\text{chute}}} \Leftrightarrow W_{\text{chute}} = \frac{W_{\text{fournie}}}{\text{RENDEMENT}} = \frac{3.6 \cdot 10^6}{0.80} = 4.5 \cdot 10^6 \text{ joules}$$

$$W_{\text{chute}} = m \cdot g \cdot h \Leftrightarrow m = \frac{W}{g \cdot h} = \frac{4.5 \cdot 10^6}{10 \cdot 450} = 1000 \text{ kg d'eau donc } 1 \text{ m}^3$$

La puissance électrique disponible d'un aménagement hydraulique se calcule selon la formule suivante :

$$P = k \cdot Q \cdot H \text{ avec}$$

P : puissance en kW

k = 8 à 8.5 (coefficient de rendement énergétique de l'installation)

Q : débit en m³/s

H : hauteur de chute en m

Dés lors, à chaque site qui présente des caractéristiques géographiques, géologiques, topographiques et hydrologiques qui lui sont propres correspond un type d'aménagement particulier.

On distingue 4 types d'aménagements.

n les aménagements de hautes chutes :

Ils se situent en zones montagneuses, pour des débits souvent faibles avec une hauteur de chute importante (200 à plus de 1200m). L'eau des torrents est emmagasinée dans une retenue, et elle est dirigée vers l'usine par galeries ou des conduites forcées. L'eau est dirigée, avec toute la vitesse liée à la chute, vers les augets de la turbine dite à action (turbine Pelton). L'énergie cinétique est transformée en énergie mécanique. La distance qui sépare l'usine du plan d'eau amont est souvent de plusieurs kilomètres.

ex : barrage de Cap de Long (Hautes Pyrénées)

n les aménagements de moyennes chutes :

Ils se situent sur de cours d'eau à pente assez forte et à débit abondant. Leur capacité de stockage est généralement moindre que celle des équipements de hautes chutes. Très souvent l'usine se situe au pied du barrage, sinon la liaison usine-barrage sera assurée par une galerie d'amenée ou conduite forcée.

ex : barrage de Chastang (Corrèze)

n les aménagements de basses chutes :

Ces aménagements sont situés sur des cours d'eau à faible pente et à très fort débit. On parle aussi de barrages au fil de l'eau. Ils ne disposent pratiquement d'aucune capacité de stockage. Ils sont implantés sur un canal de dérivation ou dans le lit d'un cours d'eau.

ex : usine de VOGELGRUN sur le Rhin

Dans les aménagements de moyenne et basses chutes, on utilise des turbines dites à réaction (turbine Francis, turbine Kaplan, turbine à hélice). Le dispositif d'injection de l'eau dans la turbine et la forme de la roue sont tels que l'eau ne possède qu'une fraction de la vitesse possible, donc elle possède à la fois de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle de pression. Les turbines Francis sont utilisées dans les aménagements de moyennes chutes, tandis que les turbines Kaplan et les turbines à hélices sont utilisées dans les aménagements de basse chute.

n les stations de transfert d'énergie par pompage (S.T.E.P.)

Le principe des S.T.E.P. consiste à échanger une masse d'eau entre deux bassins séparés l'un de l'autre par une dénivellation. L'aménagement fonctionne comme accumulateur d'énergie : il produit de l'électricité en turbinant l'eau stockée dans le bassin supérieur pendant les périodes de forte demande, il en consomme pour pomper l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur pendant les périodes creuses. L'écart du coût de production entre les périodes creuses et les périodes de pointe donne un intérêt économique à ces aménagements.

ex : S.T.E.P. de Montézic (Aveyron)

n Un aménagement exceptionnel : l'usine marémotrice de La Rance (Côtes d'Armor)

Cette centrale est, à ce jour, la seule au monde à être capable de convertir la force des marées en énergie électrique de façon industrielle. Elle est équipée de 24 groupe bulbes de 10 Mw chacun, logés dans une digue

qui barre l'estuaire de la Rance sur 700 m. Ils fonctionnent aussi bien en pompe qu'en turbine dans les deux sens d'écoulement.

03 FONCTIONS D'UN BARRAGE

03.01 Etanchéité

L'étanchéité des barrages de retenues est évidemment l'objectif prépondérant.

On doit distinguer :

- **l'étanchéité propre du barrage** qui est liée à sa constitution, et donc peut aisément être maîtrisée et contrôlée
- **l'étanchéité du bassin de retenue** qui dépend de la géologie du site (nature des terrains, état de fracturation, réseaux karstiques éventuels, ...), elle est établie lors du choix du site et peut éventuellement être traitée sur des zones de faible étendue
- **l'étanchéité de la liaison barrage - sol de fondation**; la zone de pied de barrage est celle des plus fortes pressions, et le terrain peut être en partie remanié lors de la construction de l'ouvrage, cette zone doit donc être contrôlée et traitée soigneusement.

03.02 Stabilité

Les barrages sont soumis aux efforts liés à l'action de l'eau :

- la pression hydrostatique sur les parois en contact avec la retenue
- la pression dynamique exercée par les courants d'eau
- la pression interstitielle des eaux d'infiltration dans le sol de fondation (sous pression) qui non seulement réduisent les actions de contact du sol sur son support mais réduisent aussi la résistance de ces terrains.

On doit prendre en compte le poids propre du barrage et les actions de liaison du sol de fondation.

On devra vérifier :

- la stabilité d'ensemble de l'aménagement (barrage et massif de fondation) qui dépend des qualités du massif de fondation
- la stabilité propre du barrage sous l'ensemble des actions extérieures.
- la stabilité interne du barrage sous les sollicitations.

03.03 Equipements

03.03.01 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⁽¹⁾, 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.

03.03.02 Equipements hydroélectriques

Les équipements hydroélectriques peuvent se décomposer en 3 parties:

- une partie d'équipement hydraulique concernant la circulation de l'eau.
- une partie de transformation d'énergie (turbine, alternateur)
- une partie électrique concernant la transformation et le transport de l'électricité.

Seule la partie hydraulique est du domaine des travaux publics.

Les prises d'eau doivent être convenablement protégées (criblage, dessablage) pour éviter la dégradation des équipements.

Les conduites forcées doivent être très résistantes avec des parois très lisses pour limiter les pertes de charge et les cavitations. L'ensemble des équipements hydrauliques est équipé de vannes et de dispositifs de régulation des pressions et des débits.

03.03.03 Equipements de circulation :

Les barrages sont équipés de galeries permettant les accès aux équipements hydrauliques et électriques et permettant l'auscultation et le contrôle du barrage.

Pour permettre la navigation fluviale, des écluses ou canaux de dérivation peuvent être aménagés (exceptionnellement on peut utiliser des ascenseurs à bateaux pour de fortes dénivellations).

Pour favoriser la circulation des poissons migrateurs (saumons), on équipe les barrages de passes à poissons (canaux à faible vitesse d'écoulement).

Il est très fréquent que les barrages soient utilisés comme voie de circulation en crête, on équipe donc le sommet d'une chaussée et des dispositifs usuels de sécurité

¹ **cavitation** : Lorsque que la pression d'un liquide est inférieure à la pression de vapeur de ce même liquide, il change d'état (Liquide → Vapeur). Il se forme alors des cavités de vapeur qui perturbent l'écoulement du liquide et le fonctionnement des pompes.

04 ETUDES PREALABLES

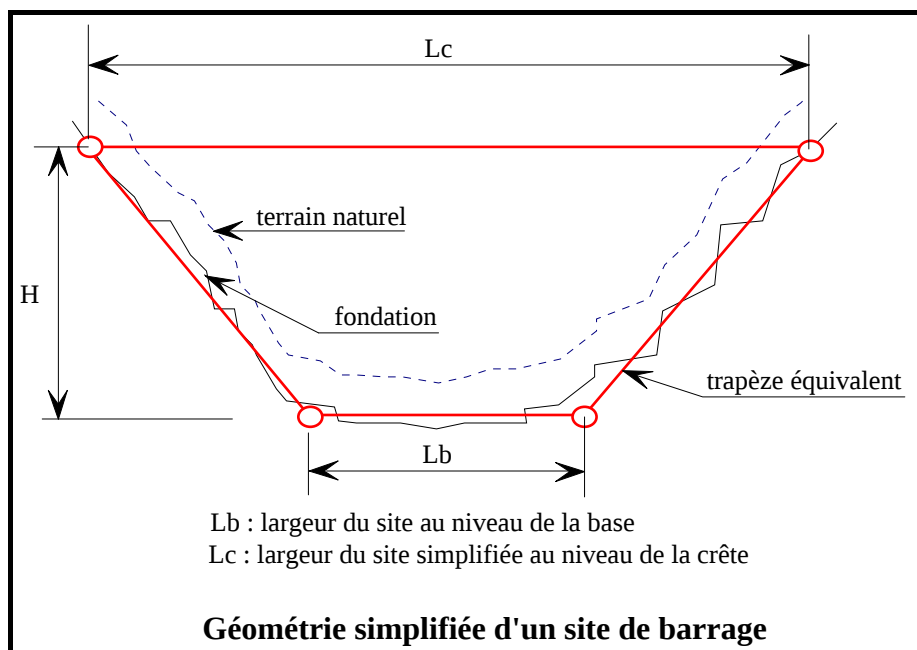
04.01 Choix du site de retenue

Le choix du site de retenue s'effectue à partir :

- des données hydrologiques (bassin versant de la retenue, pluviométrie, débits d'apport des cours d'eau, crues...)
- des données géologiques (constitution des massifs, perméabilité, état de fracturation, stabilité des massifs)
- des données topographiques (volumes des retenues en fonction des niveau des eaux.

04.02 Choix du site du barrage

Le choix de la position du barrage se fait essentiellement en fonction des données topographiques. On recherche un verrou, c'est à dire un rétrécissement de vallée qui permettra de minimiser le volume de l'ouvrage. Souvent, on doit faire un compromis entre volume de la retenue (vallée large), l'altitude de la retenue et l'importance de l'ouvrage.



Le choix entre les sites possibles se fait sur les conditions géologiques du verrou pour permettre la stabilité et l'étanchéité de l'ouvrage.

04.03 Choix du type de barrage

Le choix du type de barrage se fait à partir des conditions locales:

- des qualités géotechniques du support (les barrages bétons s'accommodent mal des supports déformables)
- des ressources en matériaux de construction (en qualité et en quantité)

04.04 Choix définitifs

La décision définitive est prise en prenant en compte, les bénéfices escomptés (production énergétique, protection des sites,...), les coûts (acquisitions, travaux...) et l'impact sur l'environnement (naturel et humain).

05 DIVERSES CATEGORIES DE BARRAGES

On distingue deux grandes catégories de barrages : les barrages fixes et les barrages mobiles

05.01 Les barrages fixes

Il en existe de très nombreux types que l'on peut toutefois diviser en deux sous-catégories selon la nature des matériaux utilisés pour leur construction : les barrages en béton et les barrages en matériaux non liés (remblais).

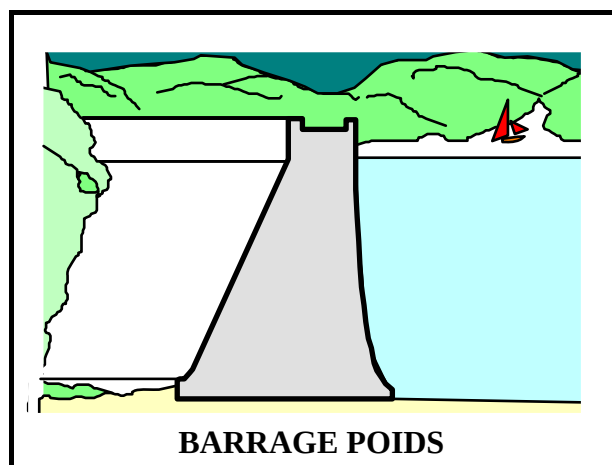
05.01.01 Les barrages en béton

05.01.01.01 Conception

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. (barrages contreforts).

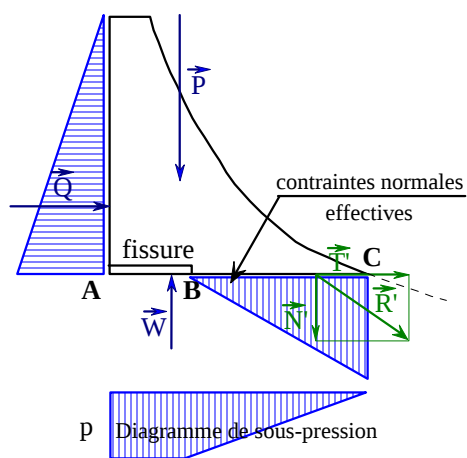
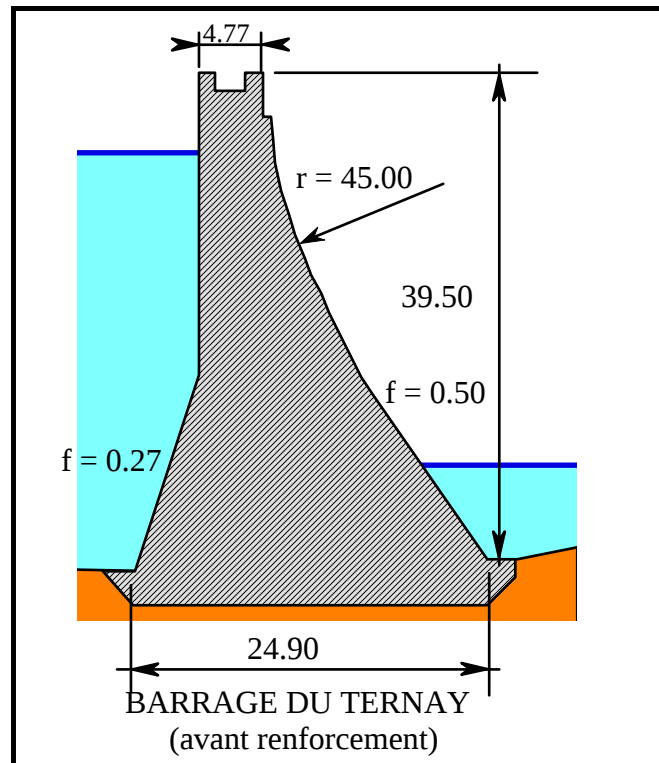
n les barrages poids

C'est un des types de barrage les plus anciens. Jusqu'au XIX^e siècle, ils ont été construits en maçonnerie, puis en béton. Ils présentent l'avantage de ne solliciter que très peu la résistance des berges, par contre leur construction nécessite une grande quantité de béton, et une excellente qualité du sol d'assise.

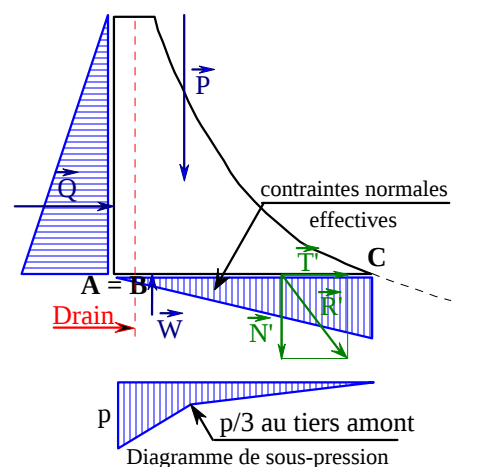


Actions exercées sur un barrage poids stabilité et dimensionnement

C'est Maurice LEVY (1838 - 1910) ingénieur français qui, à la fin du XIX^e siècle, a mis en évidence l'importance des sous-pressions dans la stabilité des barrages poids. Les barrages poids modernes sont caractérisés par une section pratiquement triangulaire. La somme de leurs fruits amont et aval est comprise entre 0.70 et 0.80.



EQUILIBRE AVEC FISSURATION
(profil non drainé)
Fig a



EFFET DU DRAINAGE SUR L'EQUILIBRE
Fig b

Les actions exercées sur le barrage sont :

$\vec{P}$: poids du barrage

$\vec{Q}$: poussée de l'eau

$\vec{W}$: résultante des pressions d'eau interstitielle (ascendante) sur la section ABC

$$R = P + Q, \quad R' = P + Q + W,$$

$$\text{Composantes de } R' \quad \left| \begin{array}{l} N' = N - W \text{ (composante normale)} \\ T' = T \text{ (composante tangentielle)} \end{array} \right.$$

Les ouvrages du XIX^e siècle ont été dimensionnés en négligeant la sous-pression $\vec{W}$ due à l'eau percolant dans le barrage ou dans sa fondation. On sous-estimait alors l'inclinaison de la résultante effective $\vec{R}'$ devant résister au cisaillement. On peut noter que toute apparition de fissure côté amont entraîne l'apparition de sous-pression (voir fig a).

On doit vérifier :

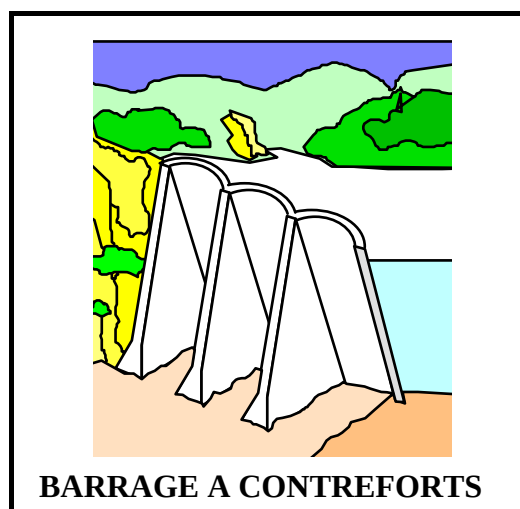
- que la contrainte totale au pied amont est au moins égale à la pression du réservoir
- que la contrainte effective au pied amont est une compression
- la stabilité au glissement (rapport T/N)

Une première approximation du volume de béton d'un barrage poids est donnée par la formule suivante :

$$V_p = 0.14 H^2 (L_c + 2L_b)$$

n les barrages à contreforts

Les contreforts en béton de forme triangulaire supportent en principe des voûtes de faible portée ou des dalles planes qui transmettent la poussée de l'eau vers le sol. Ces barrages nécessitent moins de béton (20 à 25 % de moins) que les barrages poids et n'exigent pas de vallée étroite comme les barrages voûtes. Il est néanmoins nécessaire que le rocher soit de bonne qualité. Dans de telles structures, le parement amont (dalles ou voûtes) doit être incliné de l'ordre de 0.3/1 (rapport de l'horizontale / la verticale) pour profiter de la composante verticale de la poussée de l'eau. Les coffrages sont plus complexes à réaliser. L'influence des variations thermiques sur les fondations est importante. On préfère donc à ce type de construction, les barrages en B.C.R..

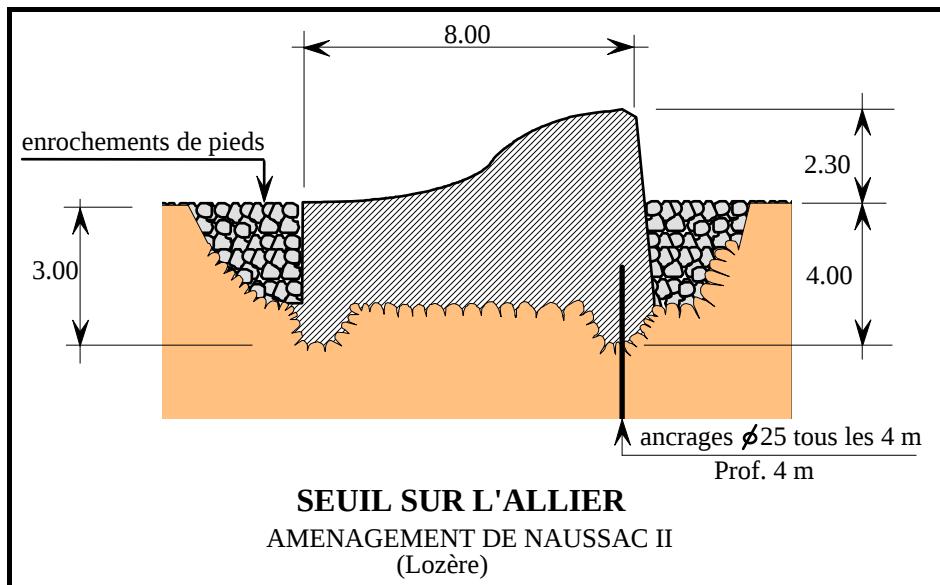


n les barrages poids évidés

Ce sont des barrages où l'on a créé des vides, par coffrage, dans leur partie interne. Il est paradoxal de vouloir alléger un barrage poids, mais le gain de poids est largement compensé par la diminution des sous-pressions

grâce à un drainage intense réalisé à partir de ces cavités. Il existe très peu de constructions de ce type en Europe.

n les seuils submergés

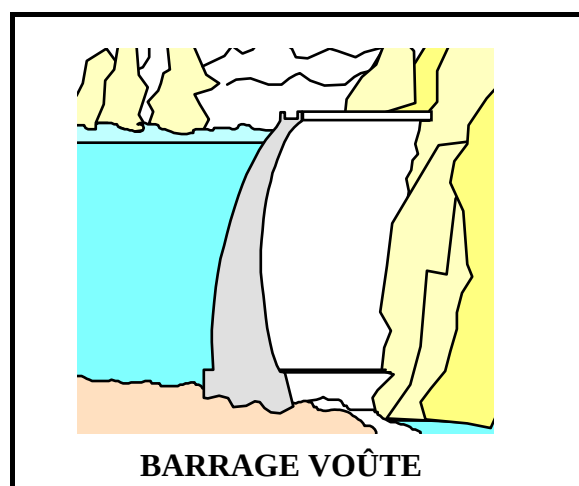


Ce sont de petits barrages déversants en toutes circonstances. Ils sont caractérisés par :

- leur faible hauteur de chute
- un niveau de bief aval important par rapport à celui des fondations, ce qui influe favorablement sur l'équilibre des poussées, mais augmente les sous-pressions, d'autant que le drainage est souvent malaisé.
- la lame déversante exerce des efforts dynamiques qui s'ajoutent à ceux déjà cités.

n Les barrages voûtes

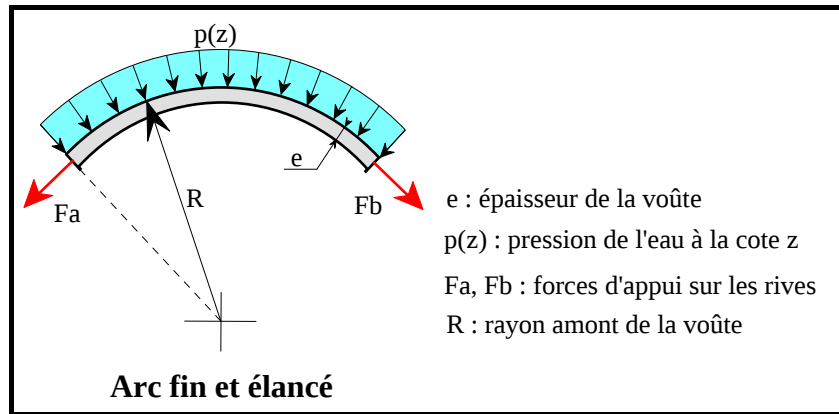
Ils sont constitués par une coque en béton à simple ou double courbure. Ce type de barrage est implanté dans une vallée présentant une zone relativement étroite (verrou) pour permettre l'arc-boutement de l'ouvrage sur les rives qui doivent être géologiquement très saines.



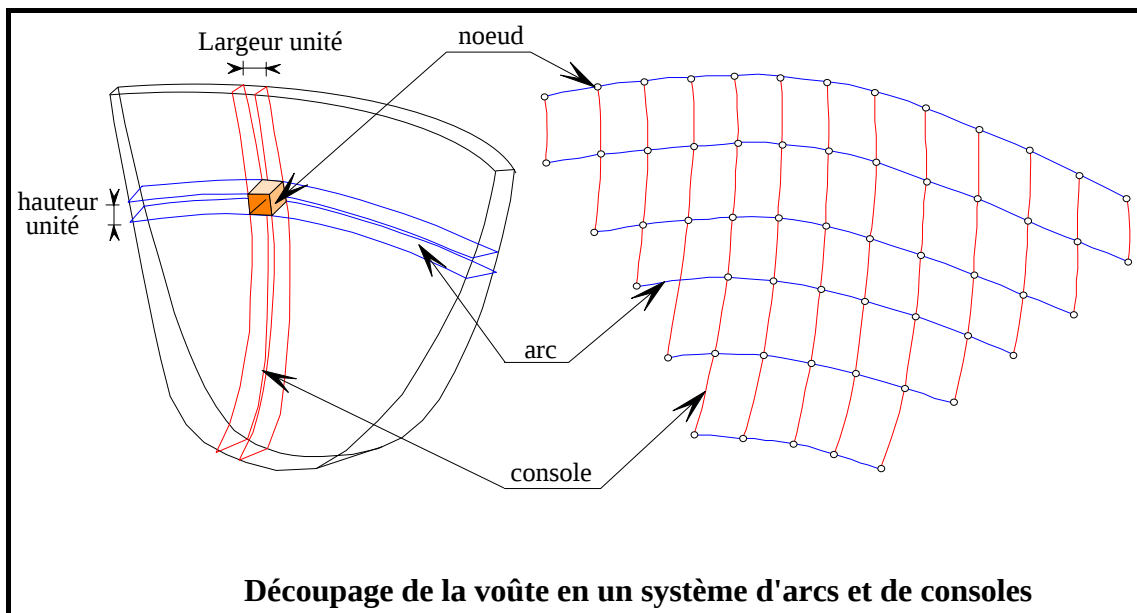
La courbure de la voûte permet de reporter les efforts de pression sur les appuis de rive, tout en conservant une paroi comprimée. Une première approche, très grossière, de dimensionnement consiste à considérer une superposition d'arcs supposés indépendants. La contrainte dans le béton est généralement de l'ordre de 5 MPa afin de limiter les problèmes de déformations aux ancrages.

La valeur de la contrainte est alors déduite de la formule du tube et vaut :

$\sigma = \frac{p(z) \cdot R}{e}$	σ (MPa) : contrainte moyenne dans un arc
	$p(z)$ (MPa) : pression de l'eau à la cote z
	R (m) : rayon amont de la voûte
	e (m) : épaisseur de la voûte



Dans la réalité, les arcs ne sont pas indépendants; de plus le barrage est partiellement encastré en pied, ce qui conduit à adopter d'autres modèles de calculs par un double découpage de la voûte en poutres courbes horizontales (arcs) et en poutres verticales (console). Les efforts appliqués à chaque noeud se répartissant entre ces deux familles de poutres et les déplacements des arcs et des consoles sont égaux à leur intersection. Actuellement, on utilise des méthodes numériques de calcul par éléments finis.



Le volume utile de la voûte peut être calculé par la formule suivante :

$V_u = \frac{H^2}{16 \sigma} + \frac{H}{\sigma} L^2 + 3 Lb^2 + 2 Lb Lc$	$V_u \text{ (m}^3\text{)}$: volume utile de la voûte $\sigma \text{ (m)}$: Contrainte moyenne d'arc en mètres d'eau $H \text{ (m)}$: hauteur du barrage $Lc \text{ (m)}$: largeur en crête simplifiée du site $Lb \text{ (m)}$: largeur du site au niveau de la base
---	---

n Barrages à voûtes multiples

Les voûtes successives reportent leurs charges sur des contreforts, on peut ainsi réduire considérablement les volumes (par rapport à des barrages poids) même pour des largeurs importantes.

Pour assurer la stabilité de tel barrage on doit trouver un compromis entre:

- des contreforts et voûtes minces mais inclinées ce qui procure de réels problèmes de réalisation (Faux la montagne H= 19m, L=130 m , épaisseur des voûtes 6cm).
- des contreforts et voûtes épaisses et verticales (Daniel-Johnson au Québec H=251 m, L= 1314 m, portée des voûtes 75 m)

05.01.01.02 Réalisation des barrages poids et barrages voûtes

n Les travaux préliminaires

Ils consistent :

- à réaliser les accès au site (routes, chemins d'accès, pistes)
- réaliser la dérivation du cours d'eau (percement de galeries, construction de batardeaux amont et aval, etc.)
- à ouvrir des carrières pour l'extraction des matériaux nécessaires à la construction de l'ouvrage
- aménager des aires de stockage des matériaux
- aménager les postes de fabrication (concassage, criblage, lavage des matériaux, fabrication des armatures, fabrication des bétons, centrale d'injection, assemblage des coffrages)
- mettre en place les systèmes de desserte du chantier (grues, blondin, convoyeurs à bandes, etc.)
- installer les cantonnements, bureaux, etc.

n Les terrassements

Ce type d'ouvrages nécessite des fondations de très bonne qualité; ce qui exclue les fondations autres que rocheuses. La partie superficielle du rocher est en général de moindre qualité (altérations dues aux conditions atmosphériques, aux infiltrations d'eau, etc.). On procède alors au déroctage à l'explosif de cette partie sur une profondeur variant de 1 à 10 m environ pour obtenir un assise satisfaisante. Le déroctage a lieu selon une technique contrôlée, c'est à dire à mailles serrées et charges limitées, avec un prédécoupage périphérique pour éviter d'endommager la roche laissée en place.

n Les fondations

Les travaux de fondations consistent à forer à partir du carreau d'excavation les trous d'injections du voile profond (étanchéité), les trous des injections de collage de l'ouvrage au rocher (compensation des retraits du béton) et les trous de drainage. Le voile profond est réalisé par des injections sous pression (5 à 25 bars) de coulis (bentonite-ciment). Les injections de collage se font à partir de la galerie périmétrale, lorsque que la contruction du corps du barrage est avancée.

n Le barrage proprement dit

La réalisation du corps du barrage fait appel à des techniques de coffrage classiques (coffrage grim pant, auto-grim pant). Les levées de bétonnage sont comprises entre 1.50 et 3.00 m. Le béton coulé en grande masse pose le problème majeur de la **maîtrise de l'exothermie due à l'hydratation du béton**. La construction de ce type de barrages est conduite par la **réalisation de plots de béton** indépendants (environ 15 m) **séparés par des joints**. Par souci d'économie et aussi pour limiter l'échauffement, les dosages des bétons sont modulés selon la place qu'ils occupent dans le barrage. les bétons seront plus dosés près des parements (étanchéité, résistance aux agressions extérieures) et près de la base (résistance mécanique) qu'au coeur du barrage. On utilise des ciments à faible exothermie (C.L.K., C.H.F), ou on remplace une partie du ciment par des liants moins rapides comme les cendres volantes. Souvent, on complète ces précautions par des dispositions spéciales :

- pré-réfrigération du béton par refroidissement des granulats et/ou de l'eau, ou substitution partielle de l'eau de gâchage par des paillettes de glace.
- post-réfrigération par réseaux de serpentins noyés dans le béton, dans lesquels circule de l'eau réfrigérée.

La granulométrie des bétons est continue et en général de l'ordre de 0/63, 0/100, 0/150) pour des dosages moyens en liant de 225 kg/m³.

La vibration du béton est assurée par des engins (bulldozer, mini-pelle, etc.) équipés d'une batterie gros vibreurs hydrauliques (150 mm). Près des parois, elle est réalisée manuellement avec des vibreurs (électriques ou pneumatiques) de Ø 100 minimum.

Après la réalisation de chaque plots, les plots sous-jacents sont abondamment arrosés pour éliminer toute trace de laitance. L'arrosage diminue aussi à la chaleur dégagée par le béton.

En fin de construction d'un barrage voûte, on réalise des injections de collage des plots (coulis de ciment) entre-eux afin de rendre la voûte monolithique. Cette opération s'appelle "clavage". Elle est conduite sous contrôle précis des pressions d'injection et des déformations.

Un barrage poids ne trouve son équilibre thermique qu'au bout de quelques mois à quelques années. Le parement amont doit être alors équipé de systèmes d'étanchéité au droit des joints qui ont tendance à s'ouvrir.

Exemple :

Le barrage de Puy-Laurent en Lozère (barrage voûte mis en service début 1996) a été réalisé avec un béton dont la proportion de cendres volantes est particulièrement élevée. La faible exothermie de ce béton a permis de réaliser des plots de 30 m de longueur soit le double des longueurs habituelles.:

- dosage en liant :

250 kg /m³ dont 60 % de ciment C.H.F 45 fourni par CEDEST, 40 % de cendres volantes de la centrale thermique E.D.F. d'Abli

- granulats : 4 classes ont été retenues

- 0/4 roulé provenant d'un gisement morainique de Lozère
- 5/12 roulé provenant du Rhône
- 10/32 concassé à partir de la carrière du site
- 32/63 concassé à partir de la carrière du site

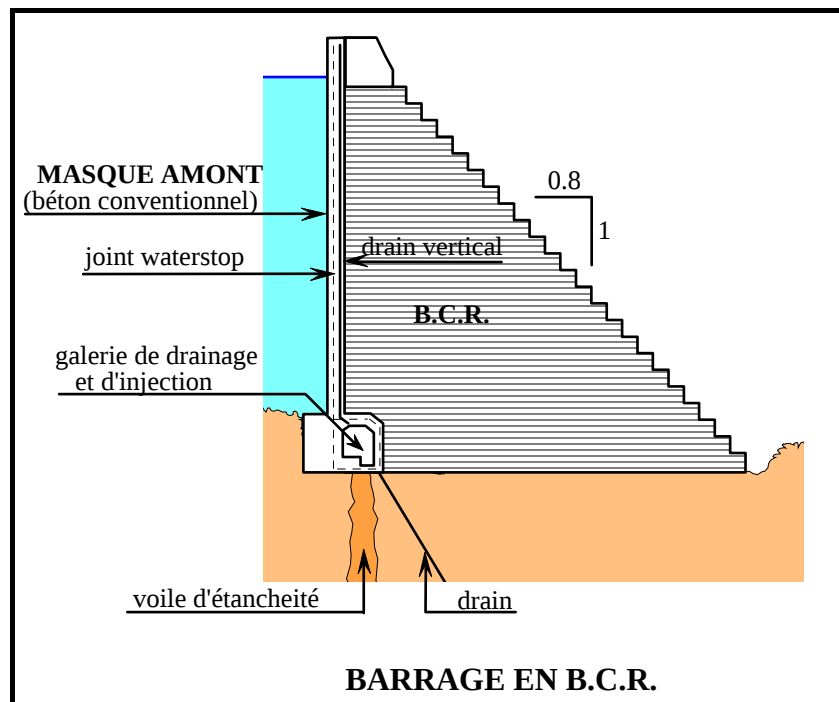
- eau et adjuvants

120 litres avec plastifiant réducteur d'eau et entraîneur d'air.

- résistances obtenues sur mortier ISO :

- en compression : 20 Mpa à 7 jours, 34 MPa à 28 jours
- en flexion : 4 Mpa à 7 jours, 7 Mpa à 28 jours

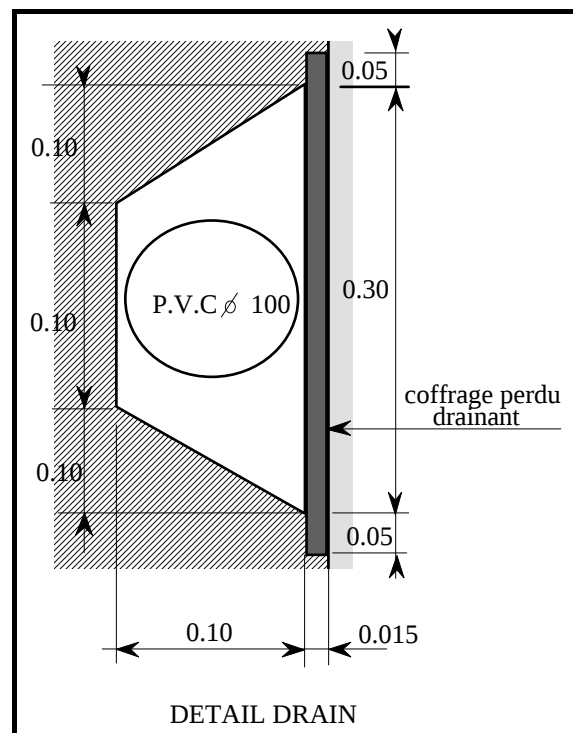
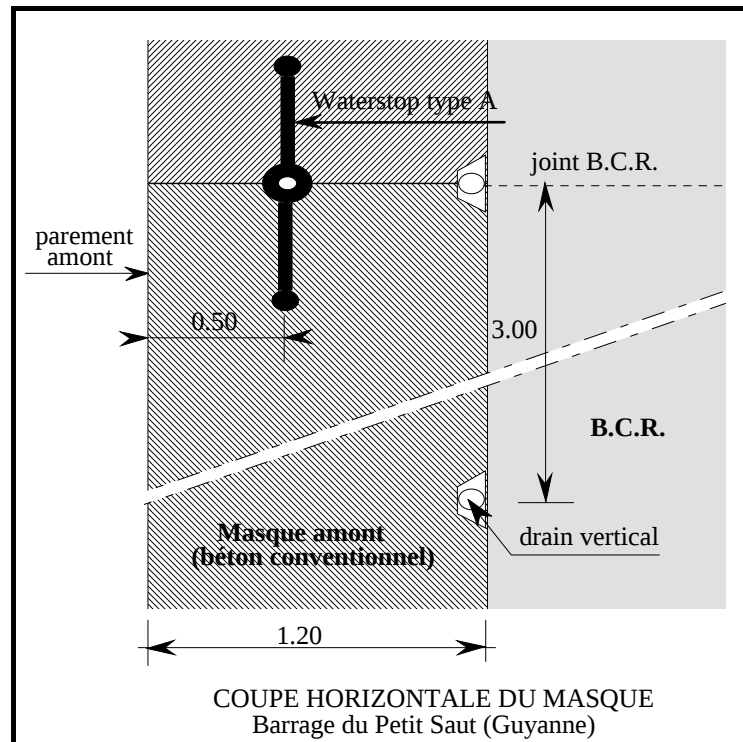
n Barrages en béton compacté au rouleau (B.C.R.)



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/m^3 , ce qui réduit l'échauffement thermique et donc le nombre de joints. Les granulats utilisés pour le corps du barrage sont en général une grave recomposée.

Les points délicats 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.

Exemples de barrages en B.C.R. :

- Barrage des Olivettes (H = 35 m)
- Barrage du Sep (Puy de Dôme)
- Barrage de Petit Saut (Guyanne) dont voici quelques chiffres :

Volume B.C.R.: 240 000 m³ en 5 mois

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

Capacité de production : 400 t/h en continu

05.01.02 Les barrages en remblai ou matériaux meubles

Il s'agit des barrages en terre ou enrochement, ils sont particulièrement adaptés aux sites peu encaissés présentant des qualités de terrain médiocres. Ils sont particulièrement employés pour les barrages de faible hauteur, bien qu'on trouve des ouvrages exceptionnels de plus de 100 m de haut. La proportion de barrages (de plus de 15 m) réalisés en terre ou en enrochement est d'environ 70%.

05.01.02.01 Conception

La stabilité propre du barrage est assurée par le poids du massif de terre. En général, ces barrages présentent des répartitions de charge qui les rendent compatibles avec les supports médiocres. Par ailleurs, leur souplesse permet une adaptation aux déformations et tassements des supports. Par contre, les volumes à mettre en oeuvre deviennent rapidement très importants.

On doit donc envisager les problèmes de tassement du sol support, et d'infiltration dans le sol de fondation.

Les tassements du sol support sont d'autant plus nuisibles qu'ils se produisent tardivement (après la réalisation), et de manière différentielle (les tassements sont plus importants au centre). Ces tassements peuvent provoquer des fissurations importantes de l'ouvrage. Elles peuvent être traitées par les méthodes usuelles de consolidation, ou en adaptant la vitesse de construction au temps de dissipation des tassements.

Les infiltrations dans le sol de fondation peuvent provoquer des fuites importantes mais aussi des dégradations par entraînement des matériaux (phénomène de renard). Le plus souvent, on dispose un écran d'étanchéité (injections, palplanches, paroi moulée,...) en zone amont ou dans le prolongement de la zone d'étanchéité (barrage en enrochement ou à noyau). En arrière de cet écran, on place une zone de drainage permettant d'évacuer les surpressions et les infiltrations éventuelles.

Le problème essentiel est donc leur étanchéité et leur stabilité interne.

n Barrage homogène

Le barrage est constitué d'un seul matériau suffisamment résistant et imperméable ($k = 10^{-7}$ m/s).

Pour assurer la stabilité des parements amont et aval on réalise des talus dont la pente dépend des qualités de stabilité et de perméabilité du matériau.

L'étanchéité du massif est assurée par l'épaisseur du barrage et l'imperméabilité du matériau.

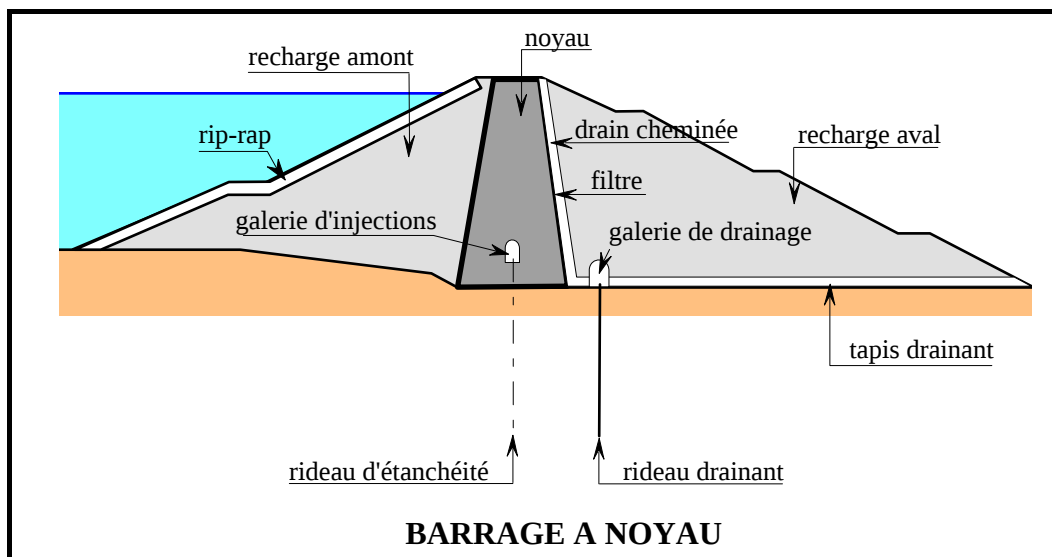
Incidence de l'eau sur la stabilité :

Lorsque le barrage est plein, les écoulements à l'intérieur du barrage se font de l'amont vers l'aval selon des lignes sensiblement horizontales qui tendent à entraîner le talus aval. On doit donc réduire les pentes ou insérer un drain en pied de barrage pour faire chuter les lignes d'écoulement.

Lorsque le barrage subit une vidange rapide, le gradient hydraulique s'inverse. Les pressions interstitielles ne peuvent pas s'évacuer rapidement dans un matériau peu perméable. On a alors un risque d'instabilité du talus amont qui peut être stabilisé par une recharge perméable (enrochement).

Les quantités disponibles de matériaux présentant les qualités nécessaires à la réalisation du barrage homogène sont souvent faible, ce type d'ouvrage est donc le plus souvent réservé aux ouvrages de faible importance.

n Barrages à noyaux



Ces barrages sont constitués de zones de caractéristiques variables réalisées autour d'un noyau en matériau imperméable en argile ($k = 10^{-7}$ m/s). Le noyau est le plus souvent vertical mais il peut aussi être incliné. En général, les zones ont des perméabilités et des granulométries de plus en plus élevées à partir du noyau ce qui leur confère le rôle de filtres et de drains. De plus cette disposition permet de réduire les effets des gradients hydrauliques sur la stabilité des talus et donc d'avoir de plus fortes pentes. Les drains sont les organes de sécurité de l'ouvrage.

Quelques définitions :

le noyau : partie verticale ou inclinée assurant l'étanchéité du barrage disposée au centre du remblai

les recharges (amont ou aval) : parties construites avec des sols frottants, perméables de préférence, qui assurent la résistance et supportent le noyau.

les drains : zones souvent peu épaisses de forte perméabilité, aptes à collecter les fuites, donc réduire les pressions interstitielles.

les filtres : zones souvent peu épaisses dont la granulométrie, intermédiaire entre celle des parties voisines, s'oppose aux migrations de particules sous l'action des écoulements. Ils luttent contre l'érosion interne. (phénomène de renard)

le rip-rap : couche superficielle d'enrochement posé sur un remblai plus fin, et le protégeant des vagues, des courants, etc.

le drain cheminée : Il est ainsi nommé car il est disposé quasi verticalement à l'aval du noyau (ou situé vers le centre d'un remblai homogène). Son épaisseur est de l'ordre de 3 m pour des raisons constructives.

le tapis drainant aval : Il couvre environ la moitié aval de la fondation à partir du noyau et conduit les fuites jusqu'au pied aval. Son épaisseur est d'au moins 50 cm.

n Barrage en enrochement

Le corps du barrage est constitué de matériaux dont la caractéristique recherchée est la stabilité mécanique (enrochements). Les enrochements permettent d'obtenir des pentes plus fortes. Leur perméabilité (matériaux contenant très peu d'argile) permet de réduire les pressions interstitielles. Les blocs peuvent atteindre des dimensions voisines du mètre. Ils sont mis en place par un compactage puissant afin de limiter les problèmes de tassements différés.

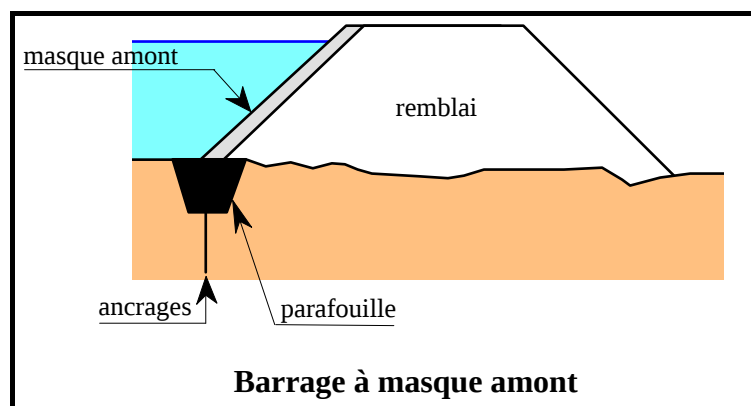
L'étanchéité est assurée par un masque amont. Le masque est réalisé en matériau étanche de préférence souple pour supporter les tassements du support. On utilise de plus en plus des membranes synthétiques (géomembranes) le plus souvent soudées, ou des revêtements en béton bitumineux. Les revêtements en béton armé sont pratiquement abandonnés.

Selon la nature des matériaux retenus pour le corps de barrage et l'étanchéité, on peut être conduit à interposer des couches de liaisons sous le masque pour assurer la régularité d'appui et le drainage d'éventuelles infiltrations.

Les problèmes particuliers de cette technique se situent au niveau de la continuité de l'étanchéité, en partie courante (joints), mais surtout au niveau des limites du revêtement (scellement du masque).

Exemples : barrage de Naussac (Lozère)
 barrage du Mont Cenis (Alpes)

n Barrage à masque amont



L'étanchéité est placée sur le parement amont du barrage. Les matériaux utilisés pour la réalisation de l'étanchéité sont :

- une dalle en béton armé avec très peu de joints (épaisseur 30 à 80 cm)
- masque en béton bitumineux composés de deux à trois couches d'enrobés routiers plus riches en liant (7 à 9 %) pente 2/1.
- géomembranes qui doivent être protégées par une couche superficielle (géotextile, petits enrochements, dalles, etc.)

Le problème commun à tous les types de barrages à masque amont est la liaison étanchéité-fondation. On réalise, en général, une plinthe en béton appelée **para fouille** ancrée à la fondation.

n Autres systèmes d'étanchéité

En l'absence de terre à noyau sur le site, on est contraint d'adopter d'autres techniques pour assurer l'étanchéité de l'ouvrage :

- noyau de béton bitumineux

barrage de Storglomvatn en Norvège : noyau en B.B de 1 m d'épaisseur construit à l'avancement par couches de 20 cm.

- paroi moulée en béton plastique qui rejoint et pénètre la fondation

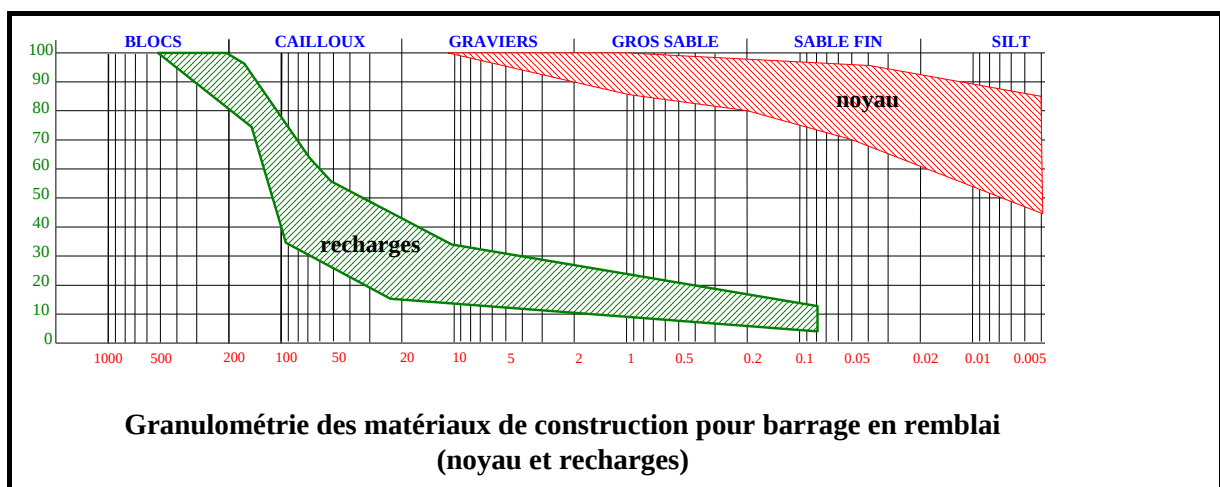
05.01.02.02 Réalisation des barrages en remblai

Il s'agit pour l'essentiel de travaux de terrassement, compliqués par les volumes à mettre en oeuvre, le zonage des terrains, et le problème des consolidations.

Les travaux préalables consistent à décaper la surface d'implantation du barrage et à canaliser les eaux (dérivation provisoire).

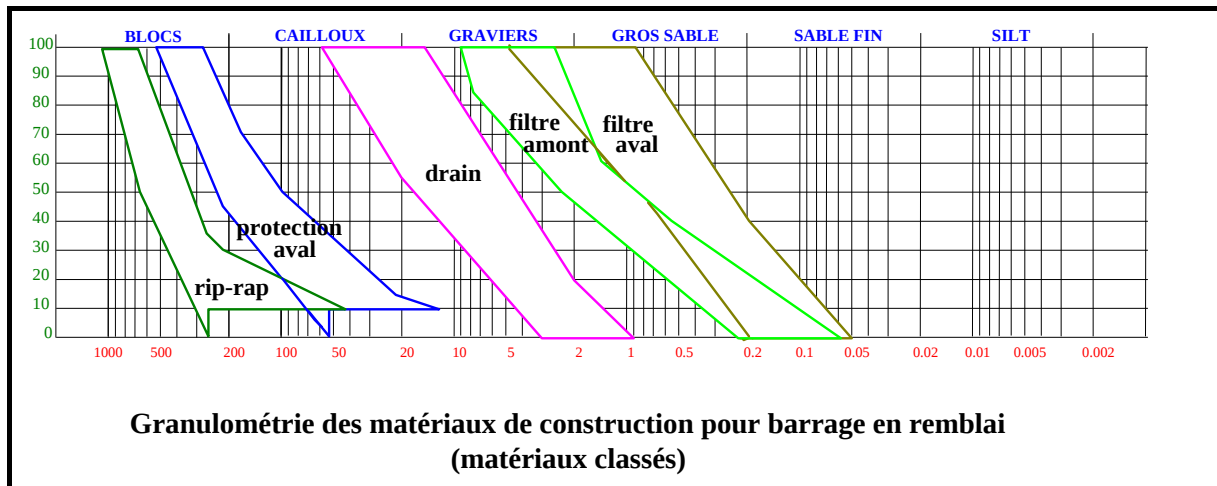
L'organisation des différents ateliers de terrassement (extraction, transport, mise en place) doit être particulièrement rigoureuse et coordonnées, notamment pour les barrages où des zones de matériaux différents sont mises en place simultanément.

La qualité des matériaux extraits doit être contrôlée en permanence (pour vérifier leur conformité et adapter leur mode de mise en place).



La mise en place se fait en recherchant la compacité maximale qui permet d'obtenir : la résistance maximale, la perméabilité minimale, les tassements minimaux. On recherche un compactage intense (permettant de réduire les teneurs en eau) et homogène (pour assurer le collage des couches).

Pour les zones de faible perméabilité, l'évolution des pressions interstitielles doit être surveillée en cours de réalisation. L'augmentation trop rapide des contraintes (due à la montée de l'ouvrage) provoque une augmentation des surpressions interstitielles qui n'ont pas eu le temps de s'évacuer. Ceci réduit le frottement des matériaux et donc la stabilité de l'ouvrage.



Les tassements du barrage sont inévitables, ils doivent être prévus (hauteur de réalisation), limités (compactage, teneur en eau) et surtout homogènes. Des tassements trop importants risquent de provoquer des fissurations du barrage.

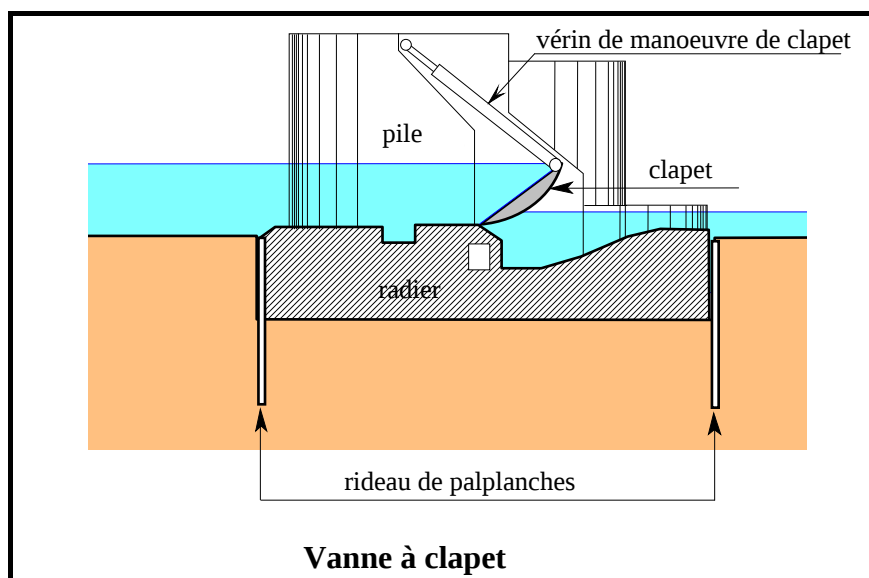
05.02 les barrages mobiles

On trouve ce type de barrage essentiellement dans les basses chutes.

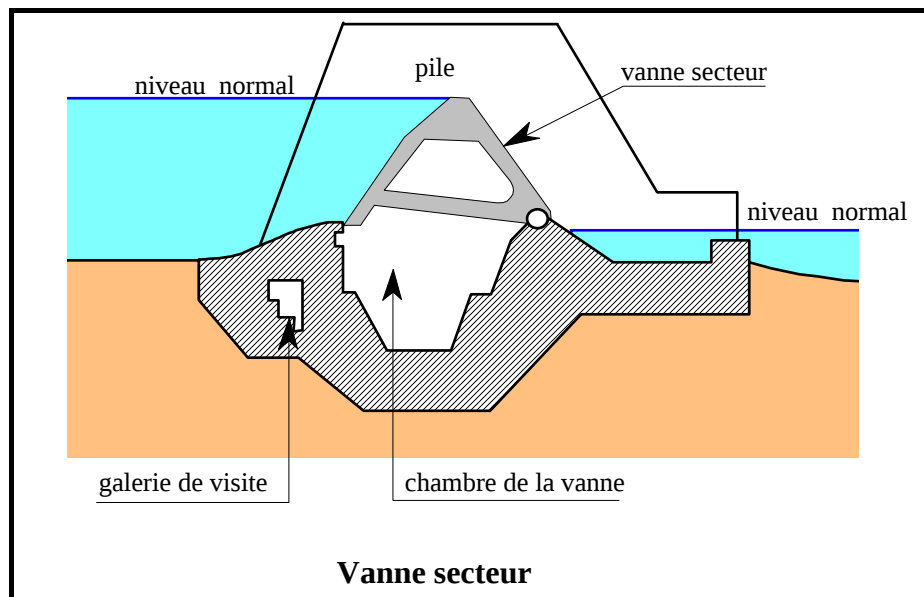
Exemple : Barrage de Sainte Marguerite (Lozère)

Il s'agit de barrages dont une partie est mobile pour laisser au cours d'eau un débouché suffisant pour éviter l'élévation du niveau amont, notamment pendant les crues. Ils permettent de moduler le débit du cours d'eau, et le niveau d'étiage en commandant l'ouverture de vannes. Les manoeuvres des vannes sont aujourd'hui automatisées. Il existe plusieurs types de vannes :

- les vannes à clapet : structure métallique articulée à la base et manoeuvrée soit par des vérins, soit par des treuils. L'écoulement se fait par déversement en partie supérieure. En position effacée, le clapet s'escamote dans la fosse du radier. Cette solution est économique pour des portées jusqu'à 30 m et des hauteurs de bouchure de 5 m.



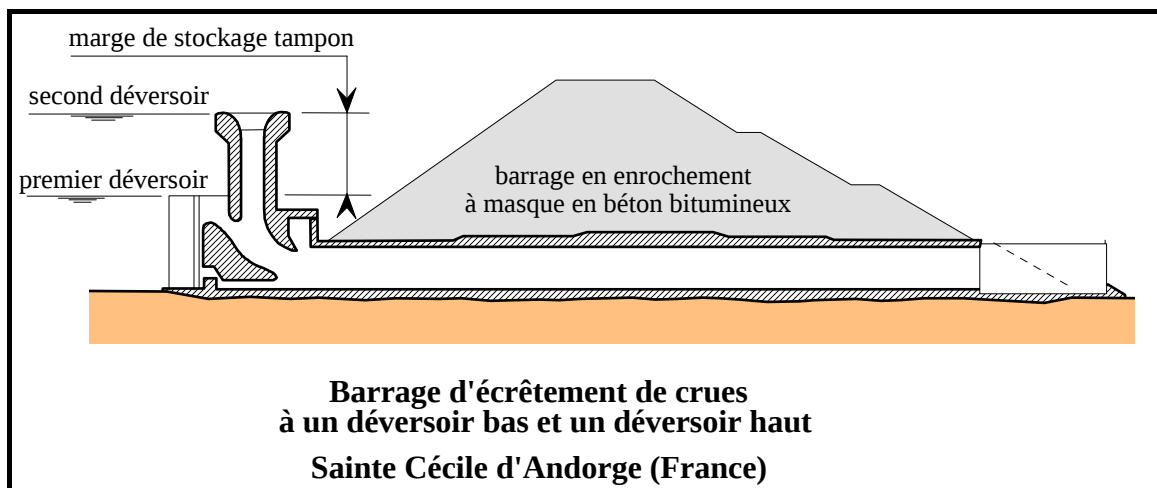
- les vannes secteur : structure métallique comportant un bras métallique et s'effaçant dans le radier. Ce type d'ouvrage nécessite des radiers importants, et donc onéreux.



- les vannes segment : elles sont de conception identique aux vannes secteur. Au lieu de s'abaisser, elles se relèvent et permettent un écoulement par le bas. Leur partie supérieure est souvent munie d'un clapet qui facilite le réglage du niveau et permet l'évacuation des corps flottants (bois, débris, glace, etc.).

05.03 Les déversoirs d'orages

Il s'agit d'ouvrages qui permettent de réguler le débit aval d'un cours d'eau en évitant les crues lors de précipitations abondantes. Ils sont constitués d'un bassin de stockage créé par un barrage, et d'un système de trop plein dont la section est limitée et par là même le débit.



06 AUSCULTATION ET SURVEILLANCE DES BARRAGES

Les contrôles portent essentiellement sur les phases de réalisation du barrage, ils doivent confirmer les hypothèses retenues pour l'étude notamment au niveau de la géologie et de l'hydrologie du site. Les premiers contrôles probants seront réalisés lors des injections, on pourra ainsi vérifier que les débits d'injections sont conformes aux prévisions ce qui fournit une indication sur la qualité de la mise en oeuvre.

La surveillance du barrage se prolonge sur toute la durée d'existence du barrage, elle comporte:

- des examens visuels de contrôle des dégradations éventuelles
- des mesures topographiques permettant de vérifier les déformations d'ensemble de l'ouvrage
- des mesures des déplacements internes (inclinomètres, pendules,...)
- des mesures d'extensométrie permettant de contrôler les déformations locales (capteurs installés en permanence dans l'ouvrage)
- des mesures piézométriques permettant de contrôler l'état des pressions d'eau dans le barrage et dans le massif environnant.

La surveillance des barrages permet de se prémunir contre les risques majeurs en programmant les opérations d'entretien ou de rénovation, mais aussi cela fournit les renseignements nécessaires à l'affinement des techniques de conception des futurs ouvrages.

Pour conserver son efficacité, la retenue doit régulièrement être purgée de ses alluvions (vase, blocs, dépôts organiques) qui risque de compromettre le bon fonctionnement des équipements de sécurité.

Pour en savoir plus : - **Techniques de l'ingénieur C 5555**

 - **Revue travaux**

 - **Cassettes vidéos**

- **Grand Maison (terre)**
- **Laparan (voûte)**
- **Pla de Soulcen (terre)**
- **Turkwel - Kenya (voûte)**
- **Puy Laurent (voûte)**
- **L'aigle (voûte)**
- **Bort (poids-voûte)**

TRAVAUX PRATIQUES SUR LES BARRAGES

La travail qui vous demandé répond à un double objectif . D'une part, il vous permet de synthétiser une exploitation de documents traitant du thème sur les barrages, et d'autre part il vous prépare à l'épreuve professionnelle de synthèse (oral).

SUJETS D'ETUDE SUR LES BARRAGES

N° sujet	Désignation du sujet	Date de l'exposé oral	nom des candidats
01	Barrage de Montézic (Aveyron)	06/11/2002	JUDE BIGOT
02	Barrage de Naussac (Lozère)	08/11/2002	MIGNAUD ORMEAUX
03	Barrage de Puy Laurent (Lozère)	08/11/2002	BOURY DARPHEUILLE
04	Barrage du Petit Saut (Guyanne)	13/11/2002	CHAUVY PESCHEUX
05	Barrage de Gabcikovo (Slovaquie)	13/11/2002	COMBY BOTTER
06	Barrage de Turkwel (Kenya)	20/11/2002	LAVAL JOURDE
07	Barrage d'Eguzon (Creuse)	20/11/2002	CHALMIN NOUVEAU
08	Auscultation et surveillance des barrages	22/11/2002	MARTINON BOLTS
09	Seuil mobile en Maine	22/11/2002	VILLEJOUBERT FRITSCH
10	Barrage sur l'Agly (Rapport VERRIER)	27/11/2002	RAYNAL BRUEL
11	Barrage de Sassièrre	27/11/2002	CASTAGNIER PINA
12	Ouvrage hydraulique du MAS CHABAN	04/12/2002	CAPDEVIELLE ROUSSEL
13	Barrage de VILLEREST	04/12/2002	CLOSSE

Chaque groupe préparera, pour **la date indiquée**, un exposé sur le sujet choisi. La durée de l'exposé est fixée à 15 minutes; il sera suivi d'un questionnement de 5 minutes.

Pour chaque groupe, la personne qui assurera la prestation orale sera désignée A L'AVANCE, sachant qu'en cas d'absence la personne prévue, elle sera remplacée par son binôme.

Cette prestation devra être particulièrement soignée et préparée (plan, documents écrits, transparents, etc.). Elle sera minutée, ce qui suppose qu'elle aura été testée au moins une fois entre les personnes du groupe.

Votre travail préparatoire à la prestation orale (documents écrits, transparents, etc.). sera remis au professeur à la fin de l'exposé et fera l'objet d'une notation.

Vous pouvez compléter vos recherches par tous les moyens à votre convenance (C.D.I., documents personnels, vidéo, internet, etc.).

Surtout n'écrivez pas sur les documents qui vous sont prêtés. Merci !