

BARRAGES RIGIDES

1. Introduction

Le choix d'un ouvrage rigide pour les petits barrages n'est pas le plus fréquent. Statistiquement, on construit beaucoup plus de petits barrages en remblai que d'ouvrages rigides.

Quelles sont, le plus souvent, les raisons du choix d'un ouvrage rigide ?

- nécessité d'évacuer une crue importante ;
- présence de fonctions hydrauliques complexes dans l'ouvrage (ouvrage vanné pour assurer, par exemple, l'évacuation des sédiments et garantir la pérennité de la retenue, vidange de fond de fort débit) ;
- incertitude sur l'hydrologie : les ouvrages rigides sont généralement moins sensibles au déversement que les ouvrages en remblai. Sur les sites où il y a une grande incertitude sur les crues.

Quelles sont les conditions requises pour pouvoir projeter un ouvrage rigide ?

- ✓ Un barrage rigide nécessite une fondation rocheuse de bonne qualité.
- ✓ La deuxième exigence pour construire un ouvrage rigide est de disposer, dans des conditions économiques acceptables, de granulats de bonne qualité nécessaires à sa construction.

Ces deux exigences sont d'ailleurs souvent satisfaites simultanément.

2. Barrage poids

C'est le type le plus couramment répandu parmi les petits barrages en béton. L'ouvrage massif résiste à la poussée de l'eau et aux sous-pressions par son poids propre.

Comparé au barrage voûte ou à contreforts, la conception et le calcul de tels ouvrages restent simples. Leur construction ne fait pas appel à des techniques sophistiquées. Les coffrages sont réduits. A contrario, le volume de béton est plus important.

2.1 FONDATION

Le barrage poids classique doit être construit sur un rocher sain, sauf cas particulier nécessitant des dispositions spécifiques. Trois arguments plaident en faveur d'une fondation de bonne qualité :

- ✓ la structure rigide de l'ouvrage ne peut guère s'accommoder de mouvements différentiels ;
- ✓ le diagramme des contraintes transmises à la fondation est radicalement différent entre la situation où le barrage est plein et celle où il est vide, ce qui peut induire des phénomènes de fatigue d'un rocher médiocre au fil des vidanges et remplissages ;
- ✓ les gradients hydrauliques en fondation sont élevés et pourraient conduire à des phénomènes d'érosion interne en cas de rocher de qualité médiocre.

2.1.1 TRAITEMENT DE LA FONDATION

Le niveau d'assise du barrage est le rocher sain qui est le plus souvent fracturé. Un traitement de la fondation par injections s'impose donc dans la plupart des cas, y compris pour les petits barrages.

Si le barrage est équipé d'une galerie, les injections sont faites en forages depuis cette galerie (voir figure 1-a. Lorsque le barrage n'est pas équipé de galerie - ce qui est le plus souvent le cas pour les petits barrages - les forages d'injection sont réalisés depuis le pied amont .

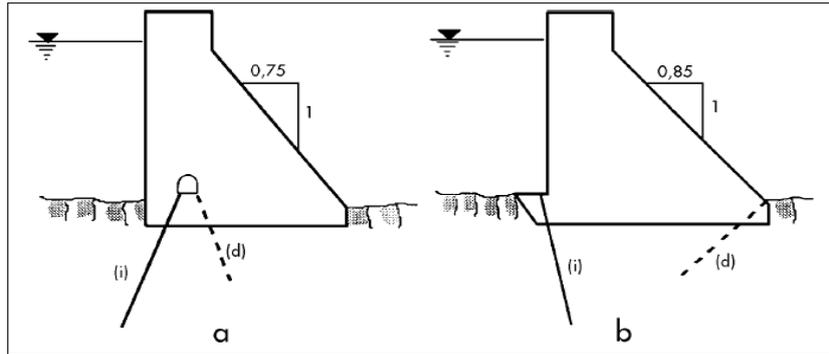


Fig. 1 - Implantation du rideau d'injection (i) et du voile de drainage (d) : a - avec galerie ; b - sans galerie

2.1.2 DRAINAGE

La stabilité des barrages poids classiques est fortement liée aux sous-pressions régnant sous l'ouvrage. Un drainage de la fondation est donc à recommander. Cependant, pour être réellement efficace, le drainage doit être fait relativement en amont, c'est-à-dire depuis une galerie.

2.2 ANALYSE DE STABILITÉ

2.2.1 Les actions

Nous proposons de classer les actions à prendre en compte dans les calculs en :

- actions permanentes ;
- actions variables ;
- actions accidentelles.

I. Action permanente

✓ Le poids propre

La densité d'un béton conventionnel vibré de barrage poids est le plus souvent de l'ordre de 2,4.

✓ Poussée des sédiments déposés en pied amont

Les sédiments en cours de consolidation exercent une poussée qui est a priori légèrement inclinée sur l'horizontale. Le coefficient de poussée peut être pris égal à :

$K_0 = 1 - \sin \varnothing$ (formule de Jacky) \varnothing : angle de frottement interne des sédiments. Il convient de faire le calcul en contraintes effectives, c'est-à-dire avec la densité déjaugée pour les sédiments

II. Action variable

Poussée de l'eau et des matières en suspension

Cette poussée s'exerce perpendiculairement à la surface du parement amont. La densité d'une eau chargée de sédiments peut atteindre couramment 1,05 à 1,10.

Le niveau d'eau à prendre en compte est celui des plus hautes eaux lors de la crue de projet.

✓ Sous-pressions sous la fondation

Le calcul est en général à faire pour la crue de projet. En l'absence de drainage, on considère habituellement un diagramme trapézoïdal avec la pleine sous-pression (u_m) du plan d'eau en pied amont et une sous-pression (u_v) égale au niveau d'eau en pied aval (figure 2-a).

En cas de drainage et dans l'hypothèse d'un entretien régulier des drains, il est recommandé de considérer que le drainage est efficace à 50 %, on considère que le voile a pour effet de diminuer d'un tiers la sous-pression juste à son aval.

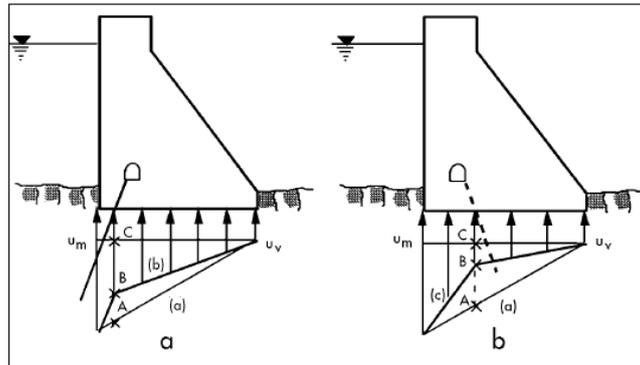


Fig. 2 - Diagramme indicatif des sous-pressions : (a) - sans injection ni drainage
(b) - avec voile d'injection
(c) - avec drainage

III. Action accidentelle : les séismes

L'action d'un séisme est prise en compte classiquement par la méthode dite « pseudo-statique », qui revient à modifier le vecteur des forces de pesanteur pour le calcul du poids propre de l'ouvrage :

- le vecteur g à une composante horizontale d'intensité $a.g$;
- simultanément, la contrainte de poussée de l'eau à la profondeur z est augmentée d'une valeur ΔP dont WESTERGARD propose l'expression suivante :

$$\Delta P = 0,875 \alpha \gamma_w (Hz)^{0.5} \text{ en kPa, avec } H \text{ la hauteur du barrage en mètres et } \gamma_w \text{ en kN/m}^3$$

Dans le cas d'un barrage déversant, la poussée totale de l'eau est donc augmentée d'une valeur :

$$\Delta P = 0,58 \alpha H^2 \text{ (pour un mètre de longueur de barrage)}$$

2. 3 Calcul de stabilité

Les méthodes utilisées pour les petits barrages consistent à considérer un plot de barrage comme un bloc indéformable soumis à des combinaisons des actions décrites ci-dessus. On analyse successivement la stabilité au glissement, la stabilité au renversement et la stabilité interne.

Stabilité au glissement

Si N et T sont les composantes normale et tangentielle de la résultante des actions sur la fondation, le critère couramment retenu est :

$$\frac{Ntg\phi}{T} \geq F$$

Ceci revient à négliger la cohésion des fondations. L'angle de frottement ϕ entre le barrage et sa fondation est en général pris égal à 45° pour un rocher sain, mais peut prendre des valeurs beaucoup plus faibles dans certains cas (par exemple $\phi = 25^\circ$ pour des fondations marneuses). Le coefficient de sécurité F doit être supérieur ou égal à 1,5 pour les combinaisons fréquentes ou rares et à 1,3 pour les combinaisons accidentelles (séisme).

Stabilité au renversement

On préfère généralement l'écrire en considérant les moments (par rapport au pied aval) des forces motrices M_m et stabilisatrices M_s :

- pour les charges usuelles : $M_s / M_m > 1,5$
- pour les charges exceptionnelles : $M_s / M_m > 1,25$
- pour les charges extrêmes : $M_s / M_m > 1,1$

Stabilité interne

On étudie la stabilité de la partie supérieure du barrage, le long d'un plan horizontal situé à une profondeur z sous le niveau de la retenue. Maurice LÉVY a proposé un critère pour lequel la contrainte normale σ_v à l'amont, calculée hors sous-pressions, reste toujours supérieure à la pression de l'eau au même niveau : $\sigma_v > \gamma_w z$

En fait, ce critère paraît très sévère et la qualité des bétons actuels permet de réduire cette exigence.

Le critère habituellement retenu est donc : $\sigma_v > 0,75 \gamma_w z$
(critère de Maurice LÉVY satisfait à 75 %).

2.4 DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES DES BARRAGES EN BÉTON CONVENTIONNEL

Les joints

Un barrage poids en béton conventionnel doit être équipé de joints subdivisant l'ouvrage en plots et permettant d'absorber les effets dus au retrait hydraulique du béton et aux variations thermiques annuelles. De ce point de vue, il n'y a pas de spécificité pour les petits barrages. Les joints sont en général espacés de 15 à 20 mètres pour les barrages en BCV et de 20 à 50 mètres pour les barrages en BCR.

Les bétons

Classiquement, les barrages poids en béton conventionnel sont réalisés avec un béton non armé dosé à environ 250 kg de liant. le bétonnage par temps froid ($< 0^\circ\text{C}$) sera interdit et des précautions spéciales sont à prendre entre 0 et 5°C . En cas de bétonnage par temps sec et chaud, on portera une attention toute particulière à la cure du béton (effectuée plutôt à l'eau qu'avec des adjuvants).

3. BARRAGE POIDS EVIDES

La réalisation d'un barrage-poids nécessite la mise en place d'un volume important de matériaux qui, dans la plus grande partie de l'ouvrage, ne subit que des efforts peu importants. Il semble donc intéressant de faire mieux participer la matière au travail de la structure, en la concentrant dans les zones où elle est nécessaire et en la supprimant là où elle ne l'est pas.

Ce type de barrage a été proposé dès 1900 par FIGARI. Il se compose d'une succession de contreforts ou piliers triangulaires en béton non armé, épaissis à l'aval et à l'amont de manière à réaliser des masques continus, en laissant à l'intérieur de l'ouvrage d'important évidements en forme de cellules verticales dont le fond est au niveau de la fondation et le sommet à une certaine distance au-dessous du couronnement. Le parement amont est incliné comme dans les barrages à contreforts. Les joints de contraction sont placés en général dans l'axe des évidements ; souvent les contreforts sont jumelés deux à deux pour assurer une plus grande rigidité transversale, les joints étant alors placés dans l'axe d'un évidement sur deux.

3.1 Comparaison entre les barrages-poids et les barrages évidés

Comparés aux barrages-poids, les barrages évidés ont été préférés à une certaine époque pour les raisons suivantes :

- la réduction des sous-pressions et des pressions interstitielles, ainsi qu'une grande accessibilité au rocher de fondation
- une meilleure résistance au glissement
- une économie du volume des matériaux mis en œuvre.

Le domaine d'application de ce type d'ouvrage est proche de celui des barrages-poids. Il dispute aussi le terrain d'application aux barrages à voûtes multiples ou à contreforts, qui sont plus délicats à construire et résistent moins bien au gel.

3.2 Principe

Le paramètre s ($< 2,5$) caractérise l'allégement et correspond au rapport de la longueur d'un plot

sur l'épaisseur du contrefort.

Les conditions de stabilité sont légèrement détériorées par la diminution du poids, notamment vis à vis du glissement.

Inversement, l'effet déstabilisateur des sous-pressions est réduit par la création des évidements aval. Une hypothèse minimale a priori pessimiste, consiste à admettre que le profil des sous-pressions n'est pas modifié. Par contre, en terme d'efforts globaux, la sous-pression n'agit sous les parties évidées, sous réserve que l'intervalle entre deux contreforts soit libre et ne soit pas obturé par un radier générale

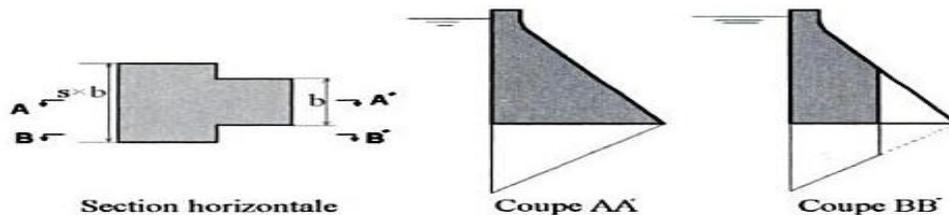


Diagramme des sous-pressions

l'étude de stabilité du barrage-poids évidé au glissement et au renversement ainsi que de contrainte se fait en appliquant la résistance aux matériaux à une section en T et non plus à une section rectangulaire.

Le dimensionnement global de ces barrages consiste à obtenir le volume de béton minimal en ajustant les paramètres suivants :

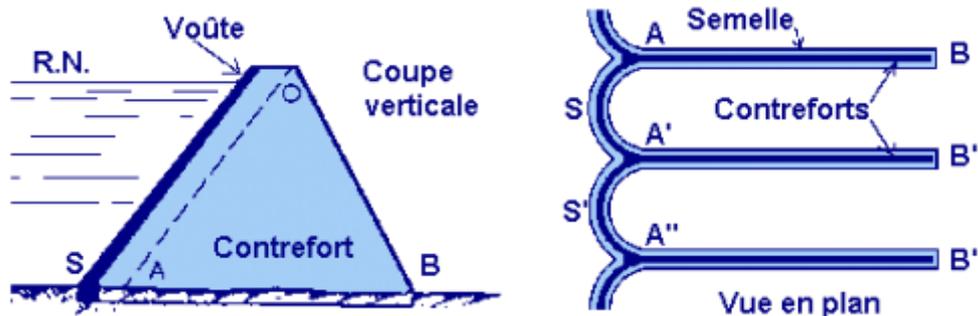
- Importance relative du coefficient s d'évidement ;
- Epaisseur du mur amont ;
- Fruit amont et aval.

La limitation du fruit amont peut par ailleurs, s'imposer pour des raisons constructives, notamment du fait des coffrages en surplomb

4. LES BARRAGES A CONTREFORTS

Les barrages à contreforts sont des barrages en béton constitués :

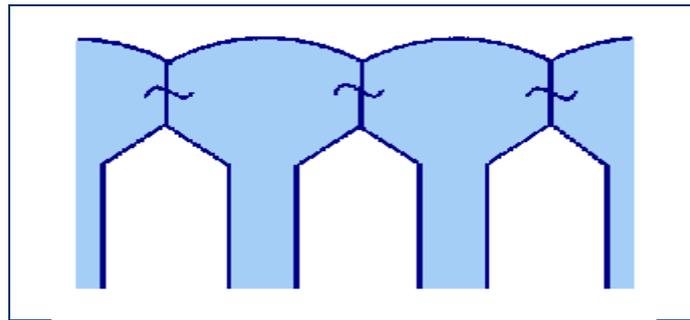
- des murs, généralement de forme triangulaire, construits dans la vallée parallèlement à l'axe de la rivière. Ces murs sont les contreforts.
- des bouchures entre les contreforts pour maintenir l'eau de la retenue. Ces bouchures s'appuient sur les contreforts auxquelles elles transmettent la poussée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



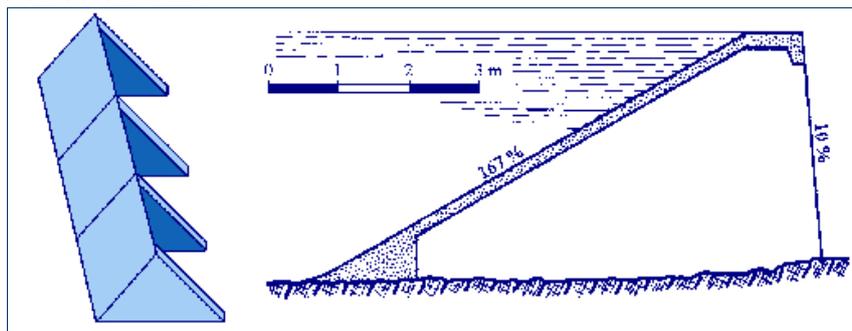
Les bouchures sont très souvent inclinées vers l'aval pour que la poussée de l'eau soit orientée vers le bas de façon à améliorer la stabilité des contreforts. Dans le sens transversal, notamment vis-à-vis des effets sismiques de rive à rive, les contreforts peuvent être munis de butons.

Les bouchures elles-mêmes peuvent être de plusieurs types :

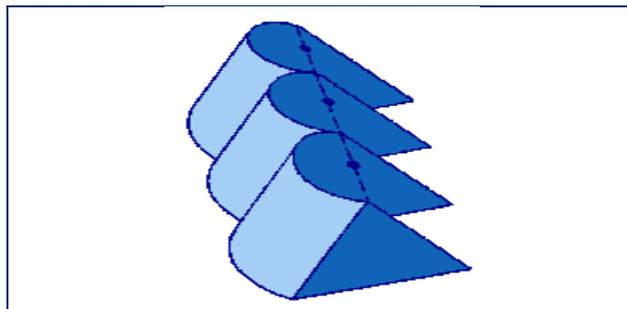
- un épaissement amont du contrefort. Une étanchéité doit donc être prévue entre chaque demi-bouchure.



- une dalle plate en béton armé.



- une voûte de faible dimension. Les voûtes sont en béton armé et de très faible épaisseur.



Ces barrages offrent un avantage considérable pour la quantité de béton nécessaire : il faut 4 à 5 fois moins de béton pour un barrage à contreforts par rapport à un barrage-poids de même hauteur. Inversement, il s'agit de structures complexes, plus sensibles aux effets thermiques et aux séismes et qui nécessitent une attention particulière pour le contact avec le rocher de fondation.

4.1 Particularités physiques:

Les barrages à contreforts ont toujours, plus ou moins la forme d'un triangle proche du triangle isocèle (comme sur le schéma ci-dessus).

Dans leur principe, les barrages à contreforts comprennent deux éléments fondamentaux. Tout d'abord ils comportent une série de murs parallèles, généralement de profil triangulaire, orientés dans le sens de la vallée, plus ou moins épais et plus ou moins espacés, et résistants à la poussée de l'eau. Ils possèdent en outre des bouchures qui permettent de transmettre la poussée de l'eau vers les contreforts.

Ce sont les contreforts qui assurent individuellement la stabilité de l'ouvrage. On leur donne généralement une forte inclinaison de leur côté amont. L'avantage de cette disposition est de faire participer le poids de l'eau à la stabilité et de permettre en conséquence une diminution du poids du barrage et donc du volume de béton à mettre en œuvre.

4.2 Particularités géologiques :

Les barrages contreforts sont bien adaptés aux vallées larges avec une fondation rocheuse de bonne qualité. Si le rocher de fondation est recouvert d'une couche relativement épaisse d'alluvions ou de rochers altérés, les fouilles des contreforts restent individualisées. De plus, plus l'écartement est grand entre chaque contrefort moins les fouilles seront importantes et donc les concepteurs n'auront pas à prévoir le dégagement du lit de la rivière. Ces barrages peuvent aussi être construits lorsque des appuis solides sont éloignés, les autres barrages ne convenant pas.

En somme, les barrages à contreforts sont donc bâtis dans des milieux espacés mais où les barrages poids ne peuvent pas être mis en œuvre à cause des coûts trop importants liés au dégagement du cour d'eau.

Ces barrages ont besoin d'une étanchéité parfaite sous et dans leurs contreforts, c'est pourquoi plusieurs rangées de drainage sont construites sous chaque appui.

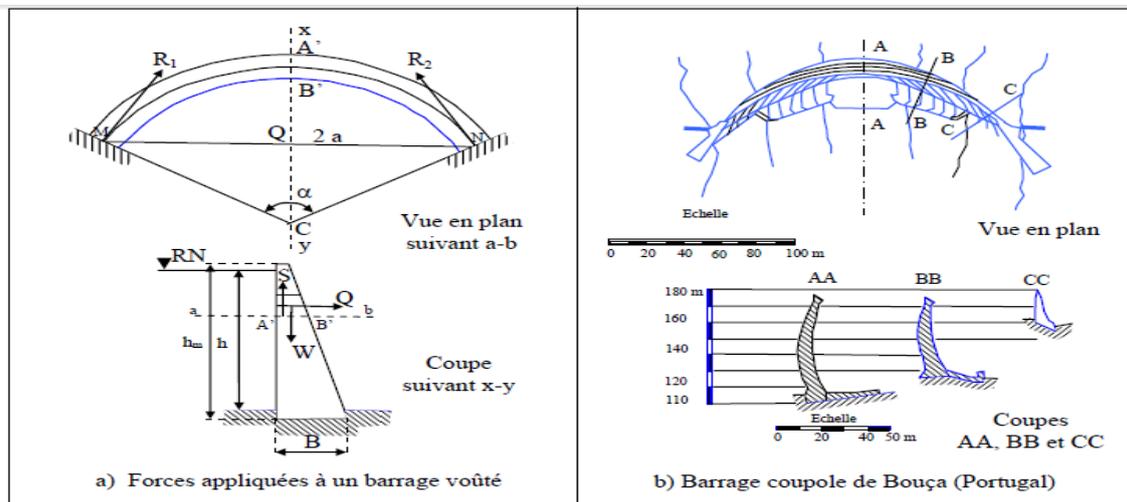
5. BARRAGE VOÛTES

Ce sont des barrages en forme d'arc qui résistent à la poussée de l'eau en prenant appui sur les rives. Ils se comportent comme un pont en arc. L'ouvrage est constitué par une voûte de convexité tournée vers l'amont dont l'épaisseur croît depuis le couronnement jusqu'à la base.

5.1 Différents types

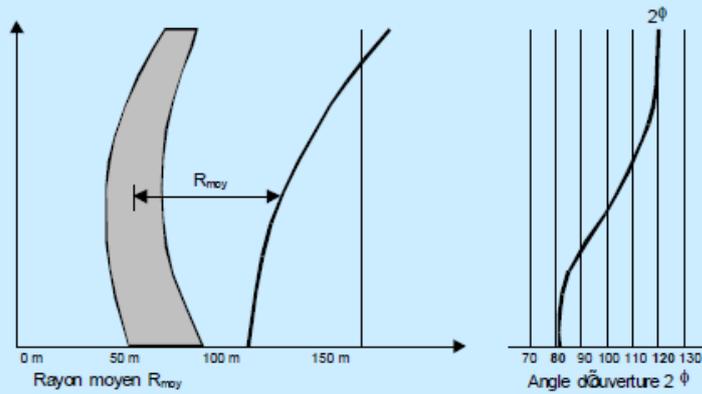
Les profils en travers ont une forme générale voisine de celle d'un trapèze, avec le rapport B/h_m en générale compris entre 0.10 et 0.20 avec B et h_m sont respectivement la largeur de base et la hauteur maximale du barrage. Cependant, ce rapport est voisin de 0.75 pour un barrage poids. Les deux variantes classiques de la forme générale des barrages voûtes sont:

- barrages type « voûte épaisse » ou « poids voûte », lorsque la largeur de base est supérieure à celle strictement nécessaire à l'équilibre d'une voûte pure. Le parement amont pouvant être cylindrique à axe vertical ou incliné vers l'aval (a).
- barrage « voûte-coupole », lorsque leur profil en travers présente une forme d'arc ; cette double courbure permet de leur donner une épaisseur inférieure à celle d'un barrage voûte classique (b).

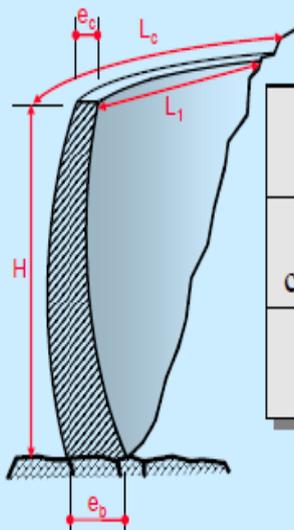


Différents types de barrage voûte (Ginocchio, 1959).

Barrages-voûtes à double courbure Rayon et angles d'ouverture des arc

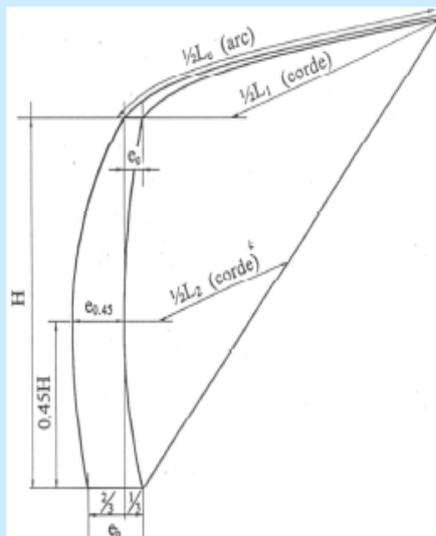


Epaisseur de la console à la section principale



Epaisseur	Vallée large en U	Vallée étroite en V
au couronnement	$e_c = \frac{H}{15}$	$e_c = \frac{H}{20}$
la base	$e_b = \frac{L_c}{20}$	$e_b = \frac{L_c}{15}$

Epaisseur de la console à la section principale



US Bureau of Reclamation

$$e_c = 0.01 \cdot (H + 12 \cdot L_1)$$

$$e_{0.45} = 0.95 \cdot e_b$$

$$e_b = \left[0.012 \cdot H \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot \left(\frac{H}{122} \right)^{\left(\frac{H}{122} \right)} \right]^{\frac{1}{3}}$$

5.2 Condition de stabilité

Les forces extérieures que doit supporter un barrage voûte sont presque les mêmes que celles d'un barrage poids. Cependant, leur importance relative est très différente. Dans un barrage voûte, les forces de soulèvement sont moins importantes, mais les charges dues à la glace et aux contraintes thermiques sont beaucoup plus importantes.

Les calculs sont effectués, en général, en découpant le barrage en anneaux horizontaux d'épaisseur unité supposés indépendants les uns des autres. A chaque anneau sont appliquées les forces principales suivantes :

- poids propre W
- poussée de l'eau Q
- réactions R1 et R2 des surfaces d'appui

5.2.1 Equilibre statique

Cet équilibre est réalisé si les trois conditions suivantes sont remplies :

- 1) La résultante des 3 forces Q, R1 et R2 est nulle
- 2) Les réactions R1 et R2 rencontrent les surfaces d'appui sous un angle inférieur à l'angle de frottement des maçonneries sur le rochet de fondation (condition de non glissement).
- 3) Les appuis peuvent résister aux réactions R1 et R2

5.2.2 Equilibre élastique

Cet équilibre sera réalisé si les contraintes en chaque section droite des anneaux restent inférieures à la valeur admissible. Plusieurs méthodes sont utilisées pour le calcul approché du barrage :

- a) Formule du tuyau :

$$\sigma = \frac{pD}{2e}$$

Cette méthode conduit à une variation linéaire de B avec la hauteur et à un angle d'ouverture économique de 133°.

- c) Méthode des arcs encastrés (formule de Bresse comme pour les ponts en arcs)
- d) Méthode des arcs console (méthodes itératives basées sur l'égalité des déplacements dont la résolution se ramène à un système de 2MN équations à 2MN inconnues, avec M est le nombre de consoles et N le nombre d'arcs).

5.3 Voûtes multiples

Un barrage à voûtes multiples comprend deux parties distincts jouant chacune un rôle particulier :

- un masque d'étanchéité constitué d'un certain nombre de voûtes en béton ou en béton armé de faible épaisseur
- des contreforts en béton sur lesquels s'appuient les voûtes et qui reportent sur le sol les poussées exercées par celles-ci.

Les barrages voûtes demandent beaucoup moins de béton que les barrages poids (1/3). En général, ils ont un prix de revient plus faibles (coffrages plus coûteux +béton armé). Mais ils ne conviennent pas à tous les sites, sachant qu'ils doivent être localisés dans des vallées relativement étroites et supportés par des berges en roches bien solides.