

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Mohamed BOUDIAF M'sila-Faculté de technologie  
Département d'hydraulique



## Polycopié de cours ouvrages hydrauliques

### Les barrages

### 1<sup>ère</sup> Partie



Dr. GHODBANE Messaoud

## **Préface**

Les barrages sont des ouvrages hydrauliques, qui représentent un appui très important dans le développement économique par la restitution et la gestion des ressources en eau pour l'utiliser dans les différents domaines (A.E.P, agriculture, industrie, production d'énergie électrique, ...etc.

Ce présent cours représente une synthèse tirée de plusieurs ouvrages dans le domaine de construction et conception des barrages. Il regroupe l'essentiel des connaissances sur ces ouvrages, élaboré pour servir comme un support et référence aux étudiants d'hydraulique et génie civil de fin de cycle (Licence et Master).

## Table des matières

Liste des figures .....	i
Liste des tableaux .....	iii
<b>Chapitre 1 Généralités sur les barrages .....</b>	<b>1</b>
1.1 Définition, Historique et Statistiques des barrages .....	1
1.2 Fonctions d'un barrage .....	2
1.3 Conditions naturelles d'un site .....	4
1.4 Harmonisation avec le contexte social et naturel .....	4
1.5 Ruptures et risques liés aux barrages .....	5
1.5.1 Les Causes de rupture des barrages .....	5
1.5.2 Types de ruptures des barrages .....	6
1.6 Ressources en eau en Algérie .....	7
1.6.1 Répartition des eaux mobilisables .....	8
1.6.2 Les barrages en Algérie .....	8
<b>Chapitre 2 Les barrages rigides .....</b>	<b>10</b>
2.1 Introduction .....	10
2.2 barrages rigides, caractéristiques générales .....	10
2.3 Matériaux utilisés en construction .....	10
2.4 Forme structurale (profil), stabilité et dimensionnement .....	11
2.4.1 Barrages poids .....	11
2.4.1.1 Calcul de la stabilité statique des barrages poids .....	12
2.4.2 Barrage-voûte .....	15
2.4.2.1 Calcul de la stabilité du barrage-voûte .....	17
2.4.2.2 Stabilité élastique .....	17
2.4.2.3 Dimensionnement .....	20
2.4.3 Barrage à contreforts .....	21
2.4.3.1 Barrages-planches planes .....	22
2.4.3.2 Calcul de la stabilité .....	24
2.4.4 Barrages à voûtes multiples .....	24
2.4.4.1 Calcul de la stabilité .....	25
<b>Chapitre 3 Barrages en remblai .....</b>	<b>26</b>
3.1 Introduction .....	26
3.2 barrages en remblai, caractéristiques générales .....	26
3.2.1 Les barrages en terre .....	27
3.2.1.1 Propriétés des matériaux de construction .....	27
3.2.1.2 Forme et composants principaux du barrage .....	28

---

3.2.1.3 Classification des barrages en terre.....	29
3.2.1.4 Conception et réalisation du barrage .....	32
3.2.1.5 Stabilité et dimensionnement du barrage en terre.....	33
3.2.1.5.1 Calcul de la stabilité du barrage.....	33
3.2.1.5.2 Dimensionnement du barrage .....	41
3.2.1.6 Etude des infiltrations dans le corps du barrage .....	43
3.2.1.7 Erosion interne, phénomène de Renard et Boulance) .....	54
3.2.1.8 Dispositifs de protection contre les effets de l'eau (Filtres, Drains,...)....	60
3.2.2 Les barrages en enrochement .....	69
3.2.2.1 Classification des barrages en enrochements .....	69
3.2.2.2 Etanchéité et conditions de construction.....	69
3.2.2.3 Les conditions de stabilité .....	70
3.2.2.4 Calcul de la stabilité du barrage.....	70
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>74</b>

### Liste des figures

Figure 1 : Coupe schématique de la structure du barrage Saad El Kafara (Le Delliou 2003).....	1
Figure 2: Forme du Profil du barrage .....	1
Figure 3: Tranches de volume total de la retenue.....	3
Figure 4: Relèvement du plan d'eau et formation de la courbe de remous .....	4
Figure 5: Forme et profil du barrage .....	11
Figure 6: Sollicitations – Forces et Actions .....	12
Figure 7: Forces appliquées sur le corps du barrage .....	13
Figure 8: Barrage à voûte épaisse-Monteynard -France .....	15
Figure 9: Barrage multi- voûtes (Grandval -France) .....	15
Figure 10: Fonctionnement en voûte .....	16
Figure 11: Différents types de barrage voûte (Ginocchio, 1959).....	17
Figure 12: Surfaces d'appuis en cônes .....	17
Figure 13: Représentation graphique de la résultante des pressions d'eau.....	18
Figure 14: Angle d'ouverture économique .....	19
Figure 15: Esquisse d'une voûte.....	20
Figure 16: Forme de la console de clé de la voûte.....	20
Figure 17: Barrage à contreforts .....	21
Figure 18 : Contreforts-déversoir .....	22
Figure 19: Dalle (planche)- contreforts .....	22
Figure 20: Charges sur planche et contreforts .....	23
Figure 21: Emplacement et renforcement des contreforts .....	23
Figure 22: Forme et angle d'ouverture des voûtes .....	25
Figure 23: Forces appliquées / Multi- voûtes .....	25
Figure 24: Essai de cisaillement .....	27
Figure 25: Résistance au cisaillement .....	28
Figure 26: Largeur de la base en fonction de la pente .....	28
Figure 27: Barrages en terre homogènes .....	29
Figure 28 : Barrages à noyau étanche .....	29
Figure 29 : Barrages en terre zonés .....	30
Figure 30 : Barrages en remblai avec écran interne (membrane) .....	31
Figure 31 : Barrages à masque amont .....	31
Figure 32 : Barrages à masque amont en béton armé .....	32
Figure 33 : Pose de géomembrane (Barrage de Sar Cheshmeh, Iran) .....	32
Figure 34: Influence de la fondation sur la conception du barrage (Schleiss, A. J. 2004) .....	33
Figure 35: Découpage en tranche.....	35
Figure 36: Sollicitation pseudo-statique .....	37
Figure 37: Les sections de rupture les plus critiques en fonction de type du barrage en terre .....	38
Figure 38: Glissement du parement amont sous l'effet de vidange rapide .....	39
Figure 39: Barrage en terre homogène construit sur un substratum imperméable .....	39
Figure 40: Découpage du volume de sol et forces appliquées sur chaque tranche .....	40

Figure 41: Ligne de saturation pour barrage homogène sans drain sur sol imperméable.....	44
Figure 42: Ligne de saturation d'un barrage à drain horizontal .....	45
Figure 43: Ligne de saturation d'un barrage à noyau .....	46
Figure 44: Forces exercées sur un volume élémentaire de sol .....	48
Figure 45: Réseau d'écoulement.....	49
Figure 46: Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène sur sol imperméable sans drain.....	50
Figure 47: Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène avec drain horizontal sur sol imperméable.....	50
Figure 48: Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène avec drain horizontal sur sol perméable de même perméabilité que le massif.....	51
Figure 49: Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de terrain d'assise moins perméable que le massif du barrage ( $K_1 > K_2$ ).....	51
Figure 50: Tracé du réseau d'écoulement dans le cas d'une vidange rapide partielle.....	52
Figure 51: Détermination de la pression interstitielle .....	52
Figure 52: Erosion interne.....	54
Figure 53: Phénomène de Boulance .....	54
Figure 54: Barrage en terre homogène reposant sur un substratum imperméable.....	56
Figure 55: Tracé de la courbe de saturation .....	58
Figure 56: Barrage en terre homogène avec drain horizontal reposant sur un substratum Imperméable.....	58
Figure 57: Exemple de fuseau granulométrique de filtre .....	62
Figure 58: Fonctionnement de filtre géotextiles .....	63
Figure 59: Réalisation de filtres en géotextile protégeant un drain horizontal (Photo Irstea - G2DR).....	63
Figure 60: Protection amont en enrochements.....	64
Figure 61: Disposition du drain et du filtre (fondation imperméable).....	65
Figure 62: Disposition du drain et du filtre (fondation perméable).....	65
Figure 63: Drain vertical.....	66
Figure 64: Puits filtrants .....	66
Figure 65: Courbe granulométrique des sols A et B .....	67
Figure 66: Fuseau granulométrique de la zone de transition .....	68
Figure 67: Barrage en enrochements du Ghrib .....	69
Figure 68: Barrage en maçonnerie.....	71

**Liste des tableaux**

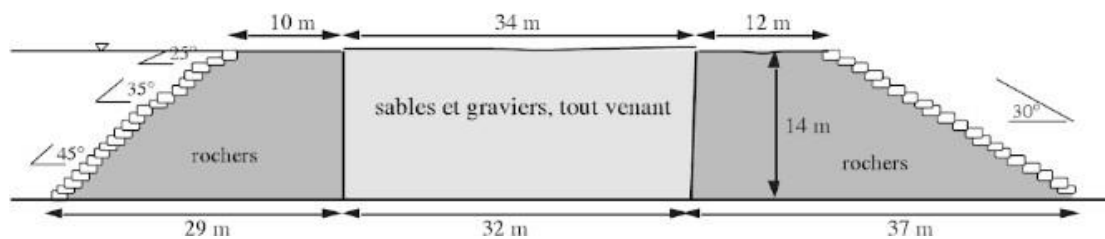
Tableau 1: Quelques grands barrages dans le monde .....	2
Tableau 2: Accidents de quelques barrages survenus avant 1995.....	6
Tableau 3: Répartition des potentialités en eau.....	7
Tableau 4: Ressources mobilisables par les barrages .....	8
Tableau 5: Quelques barrages construits en Algérie .....	9
Tableau 6: Les dosages types de béton.....	11
Tableau 7: Valeur du coefficient de frottement interne selon le matériau de construction .....	13
Tableau 8: Pente des talus du barrage de remblai en fonction de la hauteur .....	28
Tableau 9: Calcul par la méthode des tranches.....	40
Tableau 10: La pente des talus en fonction de la nature des matériaux (THERZAGUI).....	43
Tableau 11: Ordre de grandeur du coefficient de perméabilité (Schlosser 1988).....	48
Tableau 12: Coefficient de LANE en fonction de la nature de terrain (Rolley, Kreitmann et al.1977)	55
Tableau 13: Coordonnées de la ligne de saturation.....	57

## Chapitre 1 Généralités sur les barrages

### 1.1 Définition, Historique et Statistiques des barrages:

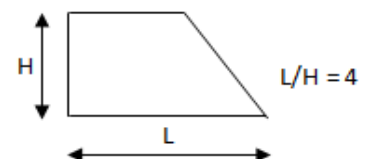
On entend par barrage hydraulique, toute structure en travers d'un cours d'eau ou fermant une dépression, ayant pour but de retenir de l'eau soit pour la stocker pendant une durée fonction de la finalité, et/ou de créer une chute.

La plupart des références historiques cite le barrage de Saad El Kafara (Figure 1) construit en Egypte environ 2600 av. JC, comme étant le plus ancien "vrai barrage" de 14m de hauteur, 113m de longueur et créant une retenue d'environ 500000m<sup>3</sup> (Le Delliou 2003). Sa structure était constituée d'une partie centrale en tout venant imperméable avec deux épaulements en enrochement. Il été détruit par submersion au cours de sa construction à cause de l'absence d'un évacuateur de crue.



**Figure 1 :** Coupe schématique de la structure du barrage Saad El Kafara sur le wadi Garawi (Le Delliou 2003)

Les ruines d'autres barrages qui ont été construits à la même époque indiquent que le rapport de la largeur de la base à la hauteur était de l'ordre de 4,  $L/H = 4$  (Figure 2).



**Figure 2 :** Forme du Profil du barrage

Par la suite des techniques de réalisation des barrages et les ouvrages ont été perfectionnés par les Romains présentent des rapports  $L/H$  plus réduits de l'ordre de 3.

Ces ouvrages n'étaient pas cimentés, ce qui limitant leur hauteur à faibles valeurs. Mais bientôt les constructeurs ont utilisé des maçonneries cimentées d'abord à l'argile, puis à l'aide d'un mortier à la chaux.



De nombreux barrages de ce type furent construits en Espagne au XVI<sup>ème</sup> et XVII<sup>ème</sup> siècles. Leur hauteur avoisinait 20 ou 30 mètres. Leur profil se rapprochait plutôt du rectangle avec un parement amont vertical et parement aval en gradins (exemple : barrage ; d'Alicante 1500, Puentes 1790, Grijar 1850. C'est vers l'année 1855 que l'on établit que le profil rationnel devrait se rapprocher du triangle. Aujourd'hui il existe plus de 50000 grands barrages dans le monde. Les quatre pays constructeurs de barrages en comptent les trois quarts : 45% en Chine, 14% en Etats unis, 9% en Inde, 6% en Japon et la France avec environ 1% du total mondial. Parmi les grands barrages dans le monde on peut citer (Tableau 1) :

**Tableau 1 : Quelques grands barrages dans le monde**

Type du barrage	Nom du barrage	Pays	Hauteur (m)	Années de mise en service
Barrages-poids	- Grande-Dixence	Suisse	285	1961
	-Bahkra	Inde	225	1963
	-Grande Coulée	USA	168	1942
	- Trois-Gorges	Chine	147	1968
	-Izvorul montaler	Romanie	127	1961
	-Krasnogorsk	Ex URSS	124	1967
	-Génissiat	France	104	1948
	- Beni Haroun	Algérie	120	2003
Barrages Voûtes et MV	-Monvoisin	Suisse	237/250	1957/1991
	-Veriont	Italie	262	/
	- Luzzone	Suisse	225	/
	-Tignes	France	180	1952
	- Al cendra	Espagne	198	1970
	-Karun (I)	Iran	200	1970
	- Kölnbrein	Autriche	200	1977
	- Inguri	Géorgie	271.5	/
	-Strastra-Redding	Californie	180	/
	-Santa-Guistina	Italie	152.5	/
- Flaming Gorge	USA	153	/	

## I.2- Fonctions d'un barrage

Les barrages ont plusieurs fonctions, dont le but principal est l'accumulation, leurs constructions sont détectées par nécessité, soit pour : irrigation, AEP, industrie, production d'énergie électrique, protection contre les crues, pisciculture, ou autres (dilution des eaux usées, protection contre le charriage et l'envasement « barrage de décantation » ex : barrage Boughzoul situé en amont du barrage Ghrib). Comme ils peuvent aussi servir de support à une voie de communication ou au passage de conduites industrielles. Suivant leur rôle, les ouvrages hydrauliques peuvent être des ouvrages de retenue (Digue, prise d'eau, évacuateur et bassin de dissipation), des ouvrages de transport d'eau (canaux, conduites et galerie), ou des ouvrages spéciaux.

Les déversoirs, les ouvrages de dissipation d'énergie, les galeries et les ouvrages de prise d'eau, forment les ouvrages annexes du barrage.

Un barrage comporte le plus souvent un **massif** constituant le **corps** du barrage encastré sur fond et les berges du cours d'eau. Il est fréquemment complété par des parties mobiles, presque toujours métalliques, mais de dimensions et de dispositions très diverses, qui servent à régler l'écoulement des eaux. Les ouvrages de retenues (barrages) peuvent être classés comme suit :

#### A- Ouvrages de retenue à niveau constant :

Se sont des barrages de faible hauteur de dérivation ou de prise d'eau, qui détournent seulement une partie de débit dans un canal ou une galerie, ou des barrages de maintien d'un plan d'eau pour l'exercice des sports, nautique, la réfrigération des centres thermiques.

#### B- Ouvrages de retenue à niveau variable :

Se sont des barrages d'accumulation, appelés réservoirs, en même temps ils relèvent le plan d'eau pour créer une charge de chute. Le volume total du réservoir (figure 3) est divisé en:

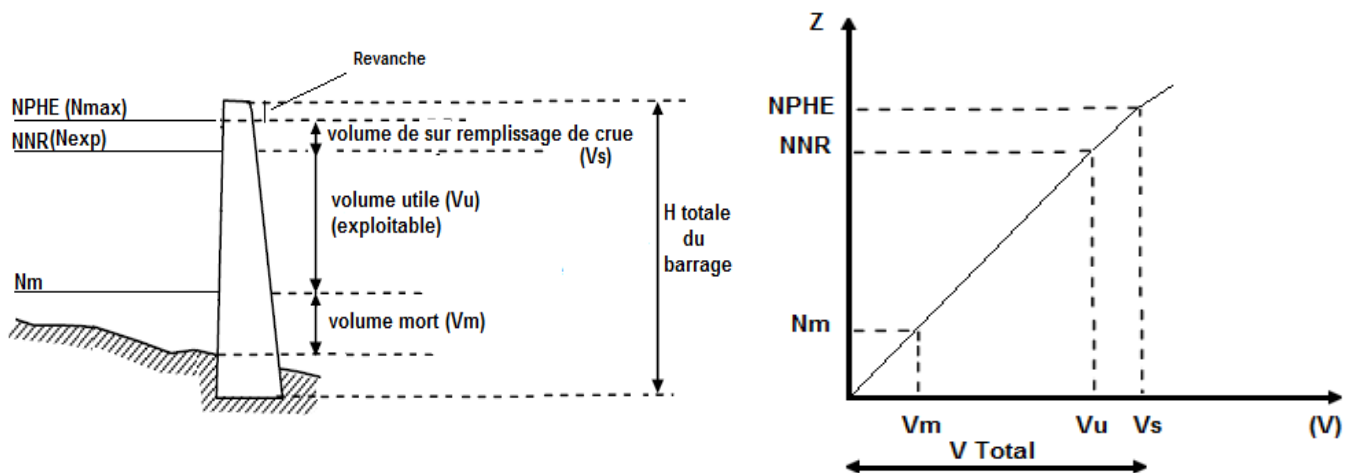


Figure 3 : Tranches de volume total de la retenue

##### a)- Volume mort ( $V_m$ ) :

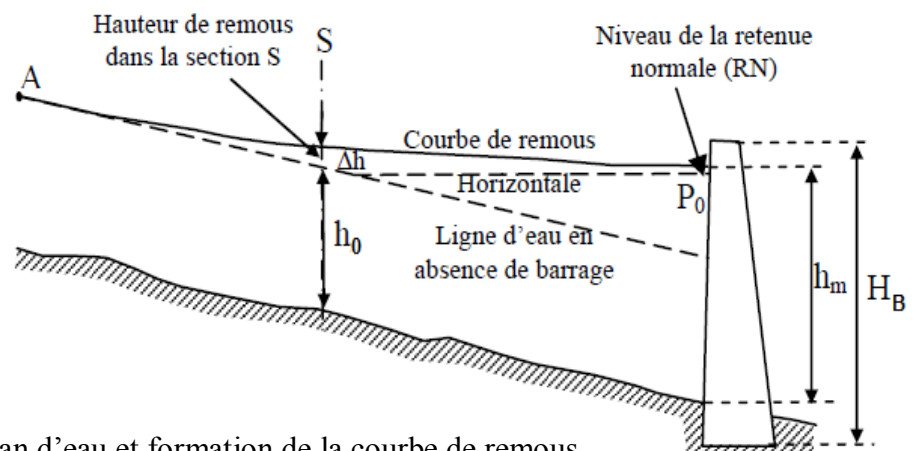
C'est le volume entre le lit du cours d'eau et le niveau mort ( $N_m$ ), qui est destiné à l'accumulation des matières solides du cours d'eau. Il doit assurer la durée de la vie du réservoir. Dans cette condition, on peut déterminer ( $V_m$ ) et ensuite ( $N_m$ ) correspondant (figure I.3).

##### b)- Volume utile ( $V_u$ ) :

Le volume utile ou exploitable est utilisé pour la régularisation des eaux afin de satisfaire les besoins en eau. Il est déterminé par le calcul de la régularisation. La profondeur du volume utile  $V_u$  additionnée au niveau mort ( $N_m$ ) nous donne le niveau normal de la retenue ( $NNR$ ).

C'est le volume entre le niveau NNR et NPHE, ce volume  $V_s$  est déterminé par le calcul de la régularisation de crue, il est prévu pour éviter le surdimensionnement des évacuateurs de crues.

On pratique, le barrage relève le plan d'eau et produit une courbe de remous (figure I.4)



**Figure 4.** Relèvement du plan d'eau et formation de la courbe de remous

### I.3 Conditions naturelles d'un site

Pour réaliser un barrage, il faut que les conditions naturelles soient réunies telles que les ressources en eau (bassin versant dont la pluviométrie, débit d'apport des cours d'eau suffisants aux besoins des consommateurs et crues probables) et sites favorables.

L'étude d'un barrage nécessite l'intervention de plusieurs disciplines scientifiques complémentaires les unes des autres à cause de la nature complexe et délicate (données environnementales du site, hydrauliques, hydrologiques, géologiques, géotechniques et notamment le choix des matériaux de son corps, de la fondation et des mesures spécifiques de sécurité).

Le choix du type de barrage s'impose tout naturellement, sans qu'il soit nécessaire de faire des investigations poussées.

D'une autre part, le choix du type de barrage sera un compromis (accord) entre les différents aspects suivants : nature de la fondation, disponibilité de matériaux à proximité, hydrologie, pour aboutir au meilleur choix économique.

### I.4 Harmonisation avec le contexte social et naturel

Le contexte social et naturel convient également à étudier dans le choix du barrage, c'est à dire sous influence directe de l'homme et de ses activités. En premier lieu, il faudra veiller à acquérir une bonne connaissance du contexte social et des systèmes de production (Agriculture, industrie,...). Il est nécessaire de s'intéresser aux éventuels groupes à déplacer mais aussi à ceux susceptibles de les accueillir sur leurs propres terroirs. Si des déplacements de populations sont indispensables, il est bien évidemment nécessaire d'en déterminer avec le plus grand soin les modalités.

## I.5 Ruptures et risques liés aux barrages

Les barrages ce sont des ouvrages hydrauliques, souvent importants, très complexes du point de vue de leur conception, leur réalisation, de leur exploitation et qui nécessitent un entretien soutenu et soigné. En effet la ruine partielle ou totale d'un tel ouvrage se traduit toujours par une catastrophe, la plupart du temps nationale. On peut citer quelques catastrophes mondiales connues :

- Barrage Malpasset (France) : *Le 2 décembre 1959, le barrage se rompt par rupture de la fondation au terme de son premier remplissage, retardé pour des problèmes d'expropriation de terrain dans la retenue. Il y eut 421 morts et des dégâts matériels considérables,*
- Barrage Eder (Allemagne) : *Ce barrage a été détruit partiellement durant la Seconde Guerre mondiale par des bombes.*
- Barrage de Fergoug (Algérie) : *Le barrage a subit successivement deux crues importantes qui dépassent la lame de dimensionnement ce qui causé de sérieux dégâts que l'on se contente de réparer, y compris une rupture partielle de l'évacuateur....etc.*

### 1-5.1 Les causes de ruptures des barrages

#### \* Problèmes techniques

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

#### \* Causes naturelles

Les causes naturelles peuvent être à l'origine de rupture de barrage. Il en est ainsi des crues exceptionnelles d'intensité supérieure à celle retenue pour le dimensionnement des évacuateurs de crues. Les glissements de terrains, qui peuvent toucher l'ouvrage lui-même dans le cas de barrages en remblai ou les terrains l'entourant. Ils peuvent également provoquer la rupture de l'ouvrage par déstabilisation des talus ou par submersion. Les séismes peuvent causer des dommages non négligeables sur les barrages et le risque sismique est systématiquement pris en compte lors de la conception des ouvrages, même s'il est peu élevé.

#### \* Causes humaines

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

### 1-5.2 Types de ruptures des barrages.

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

Les barrages en maçonnerie ou en béton sont menacés par une rupture instantanée partielle ou totale, produite par renversement ou par glissement d'un ou de plusieurs plots (Voir Tableau 2): Accidents de barrages survenus avant 1995).

**Tableau 2 :** Accidents de quelques barrages survenus avant 1995

N°	Nom du Barrage	Pays	Année de Rupture	Hauteur (m)	Longueur (m)	Volume de Retenue (hm <sup>3</sup> )	Cause de la rupture	Nombre de Victimes
1	Blackbrook I	GB	1799	28	160	0.2	T	/
2	Puentes	Spain	1802	69	291	13	M	600
3	Killington	GB	1836	18	250	3.4	T	/
4	Torside	GB	1855	31	270	6.7	T	
5	Dale Dyke	GB	1864	29	380	3.2	T	-
6	Tabia	Algérie	1865	25	/	/	/	/
7	Cuba	USA	1868	15	/	0.5	/	/
8	Fergoug I	Algeria	1881	33	300	30	M	200
9	Cheurfas	Algeria	1885	42	/	17	M	10
10	Horse Creek	USA	1914	17	5000	21	E/T	/
11	Ogayarindo	Japon	1963	24	100	0.16	T	/
12	Ovcar Banja	Yougoslavie	1965	27	/	3	T	1200
13	Nanak Sagar	Inde	1967	16	19300	210	T	/
14	La Laguna	Mexique	1969	17	675	4.3	T	
15	Gotvan	Iran	1980	22	710	x	/	200
16	Ruahih	N Zealand	1981	32	67000	31	E	
17	Hinds Lake	Canada	1982	12	5200	7500	T	
18	Tous	Espagne	1982	77	780	50	E	20
19	Embalse Aromos	Chilli	1984	42	220	60	T	
20	Dibbis (X)	Irak	1984	17	650	50	/	/
21	Noppikoski	Suède	1985	19	175	0.7	T	0
22	Kantale	Sri Lanka	1986	27	2500	135	T	
23	Mafeteng	Lesotho	1988	23	500	?	T	
24	Quail Creek	USA	1988	24	610	50	T	/
25	Spitskop	SA	1988	17	760	61	T	0

Les ouvrages hydrauliques présentent trois particularités :

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

### I-6-Ressources en eau en Algérie

Les ressources réelles en eau en Algérie sont en termes de potentialités évaluées à 19.2 Milliard de m<sup>3</sup>, répartis comme suit (Tableau 3) :

**Tableau 3** : Répartition des potentialités en eau

Zones	Écoulements de surface Milliards de m <sup>3</sup>	Nappes souterraines Milliards de m <sup>3</sup>	Total
Zone Tellienne	11,8		
Hautes plaines	0,6	1,8	14,2
Sud	/	5	5
Total	12,4	6,8	19,2

L'analyse de la répartition des potentialités en eau montre une irrégularité au détriment surtout des hautes plaines dont l'insuffisance pluviométrique (écoulement de surface), rejailit évidemment sur leur part minime dans les 1,8 Milliard de m<sup>3</sup> que recèlent les nappes souterraines de l'Algérie du Nord. Le Sahara dont les écoulements de surface sont négligeables, car ils sont quasi nuls offre l'avantage de ses appréciables ressources souterraines (5 Milliard de m<sup>3</sup>) peu exploitées actuellement, contrairement aux eaux souterraines du Nord qui font l'objet d'une exploitation quasi complète.

Les ressources en eau en Algérie risque de s'avère insuffisantes dès l'horizon 2025 face à la croissance de la population et les coûts liés à leur mobilisation vont en s'alourdissant. Rappelons que les potentialités en eau évaluées à 19,4 Milliard de m<sup>3</sup> se réduisent en 12,43 Milliard de m<sup>3</sup> en termes de ressources réellement mobilisables, en raison des limites techniques et économiques imposées aux possibilités de stockage. Sur les 12,4 Milliard de m<sup>3</sup> que totalisent les ressources potentielles en eau de surface, on ne peut en effet, en fonction des barrages installés et envisageables, récupérer que 5,7 Milliard de m<sup>3</sup>.

Pour les écoulements de surface, les barrages réalisés à ce jour ne permettent de mobiliser que 2 Milliard de m<sup>3</sup>. Les ouvrages engagés en réalisation ou programmés pour l'immédiat et le proche avenir permettront de porter le volume des ressources mobilisables à 5,7 Milliard de m<sup>3</sup>.

### I-6.1-Répartition des eaux mobilisables

La répartition des barrages selon les ressources mobilisables est cependant très déséquilibrée au niveau des diverses zones et régions de notre pays. La majorité des ressources mobilisables se trouvent dans la zone tellienne avec 94,1% (Tableau 4 & 5).

**Tableau 4 : Ressources mobilisables par les barrages**

Régions	Volumes mobilisables
Oran	0,372
Cheliff	1,277
Alger	1,319
Soummam	0,471
Constantine	1,146
Annaba	0,781
<b>S/Total de la zone Tellienne</b>	<b>5,366 Milliards de m<sup>3</sup> (94,1%)</b>
Oued Mellegue	0,129
Hodna	0,044
Aurès Nememchas	0,065
Chott Chergui	0,024
<b>S/Total des Hauts Plateaux</b>	<b>0,262 Milliards de m<sup>3</sup> (4,5%)</b>
<b>Sud</b>	<b>0,080 Milliards de m<sup>3</sup> (1,4%)</b>
<b>Total</b>	<b>5,708 Milliards de m<sup>3</sup></b>

### I-6.2-Les barrages en Algérie

L'Algérie à la fin de la période coloniale ne disposait que de 15 barrages sur tout le territoire. Aujourd'hui après des investissements considérables dans le secteur de l'hydraulique, 79 barrages sont exploités et répartis entre les différentes régions du pays comme suit : 14 en région Ouest ; 17 en région Chélif ; 18 en région Centre et 30 en région Est. On peut citer quelques barrages (Tableau 5).

Les projections à 2030 prévoient à ce que le nombre passera à 139 barrages avec une capacité de stockage de 12 milliards de m<sup>3</sup> sur l'ensemble du pays.

**Tableau 5** : Quelques barrages construits en Algérie

Barrages	Villes	Années	Hauteur (m)	Capacité (Mm <sup>3</sup> )	Type
Meurad	Cherchel	1854	26	6	Terre
Tlelat	Mascara	1870	26,62	0,7	Terre
Hamiz	Alger	1879 /1935	50	27	Poids
Cheurfa	Sig	1882/1935/ 1988	37,5	16	Poids
Boughzoul	Média	1932	13,5	50	Terre
Oued Fouda	Chlef	1932	101	228	Poids
Benkhada	Tiaret	1936	60	50	Enrochement
Ghrib	Ain Defla	1939	105	280	Enrochement
Ksob	M'sila	1939	39,8	50	Voûtes Multiples
Beni Bahdel	Tlemcen	1944	73	61	Voûtes Multiples
Bouhnifia	Mascara	1948	99	72	Enrochement
Zerdezas	Skikda	1949	64	14.9	Poids
Foum El Gherza	Biskra	1951	75	47	Voûte
Sarno	Sidi Belabas	1953	34,4	22	Terre
Iril Emda	Setif	1954	75	160	Enrochement
Mefrouche	Tlemcen	1962	32	15	Voûtes Multiples
Erraguene	Setif	1963	82	200	Voûtes Multiples
Cheffia	Annaba	1965	58	170	Terre
Djourf Tourba	Béchar	1969	36	360	Poids
Fergoug	Mohamadia	1871/1935	44	32	Terre
Beni Haroun	Mila	2003	118	960	Poids



## Chapitre 2 Les barrages rigides

### 2.1 Introduction:

Les barrages sont selon les matériaux utilisés pour leur construction en deux grandes catégories:

- ✓ Les barrages **rigides** réalisés en béton et/ou en maçonnerie.
- ✓ Les barrages **souples** réalisés en (remblai) terre et/ou enrochements.

Les barrages rigides regroupent les barrages poids, contreforts, voûte, et voûtes multiples qui diffèrent les uns des autres par la forme de l'ouvrage.

Les barrages se classent selon leur façon de s'opposer à la poussée de l'eau en :

\* **Barrage poids** : leur poids s'oppose à la poussée de l'eau. Les efforts s'exercent principalement sur le sol de la fondation (effet de gravité).

\* **Barrages-voûtes** : Ces ouvrages en arc reportent les efforts de poussée sur les rives. Ce qui nécessite des appuis de rives de très bonne qualité.

### 2.2 Les barrages rigides, caractéristiques générales :

Les barrages rigides 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).

Au niveau de l'évacuateur, le choix s'orientera souvent vers des ouvrages en béton, mais il ne faut pas écarter d'emblée des solutions telles que déversoirs en gabions, en perré au mastic bitumineux, souvent judicieuses à la fois sur les plans techniques et économiques.

### 2.3 Matériaux utilisés en construction

Les barrages rigides, en béton ou en maçonnerie sont caractérisés par leur capacité de déformation relativement faible. Ils ne s'accroissent, sauf exception, que de fondations rocheuses saines et peu déformables et leur coût n'est raisonnable que si la cuvette se ferme sur un verrou de faible largeur, facile à obstruer. Dans cette catégorie, on distingue :

- Les Barrages-poids (gravité) en (béton/armé et maçonnerie) ;
- Les barrages-voûtes ou multi-voûtes en (béton/armé) ;
- Les barrages à contreforts en (béton/armé).

La réalisation des barrages en maçonnerie est devenue actuellement très rare en raison de la mécanisation des chantiers et de prix de revient élevé à cause de la main d'œuvre (exemple : barrage de Fergoug est en maçonnerie avec liant à Chaux).

Les barrages-poids en béton sont réalisés soit en béton conventionnel vibré, soit en béton compacté au rouleau (BCR). Le béton utilisé dans la construction des barrages rigides est constitué de gros éléments de dimensions inférieures à 250 mm. Le choix de gros éléments présente deux avantages : résistance à la rupture par compression et prix réduit des installations de concassage.

Les dosages types de béton de masse, de parement et ordinaire des autres parties (Supports de vannes des évacuateurs, galeries, bâtiments des usines hydroélectriques etc...) sont donnés dans le tableau suivant (Tableau 6):

**Tableau 6 : Les dosages types de béton**

Composants	Béton de masse (Kg/m <sup>3</sup> )	Béton de parement (Kg/m <sup>3</sup> )	Béton ordinaire (Kg/m <sup>3</sup> )
Ciment	250	300	300
Sable (0-2) mm	330	300	-
Sable (0-4) mm	170	150	800
Gravillon (12-25) mm	565	565	1800
Pierre (70-150) mm	1070	1070	-
Eau	150	155	160

La fabrication et la mise en place du béton au barrage comprennent les étapes suivantes :

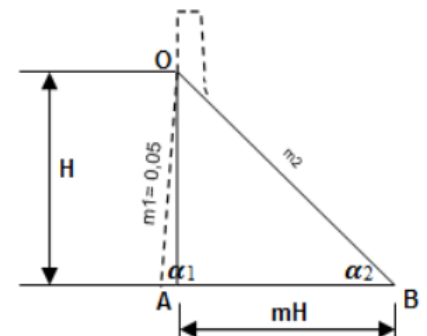
- Extraction des agrégats (carrières, cours d'eau, plages, ...)
  - Concassage, criblage et lavage des agrégats sur site.
  - Fabrication des bétons : usine à béton comprenant essentiellement (silos à agrégats, cuve à ciment, doseurs, trémie de remplissage, bétonnières et trémies à béton).
  - Mise en place du béton (blondins ou transporteurs à câbles, grues, et pompes de bétonnage).
- Le contrôle de la qualité des bétons est réalisé dans un laboratoire de chantier ; il comporte, en général, l'essai de rupture par compression d'échantillons en forme de cubes de 20x20 cm de coté, confectionnés spécialement ou de carottes cylindriques prélevées dans la masse de l'ouvrage.

## 2.4 Forme structurale (profil), stabilité et dimensionnement

### 2.4.1 Barrages poids :

C'est une solide structure en béton à profil triangulaire, épaissie à sa base et affinée vers le haut (Figure 5).

La stabilité du barrage-poids sous l'effet de la poussée de l'eau est assurée par le poids propre du matériau.



**Figure 5 : Forme et profil du barrage**

Ce type de barrage convient bien pour des vallées larges ayant une fondation rocheuse.

Les études effectuées suivant les règles de la résistance des matériaux pour les barrages poids ou théorie d'élasticité montrent que la forme la plus économique du profil en travers est celle d'un triangle-rectangle, dont le sommet **O** situé au dessus de l'angle droit **A**, **AO** est le parement amont et **O** est à la cote de la retenue normale NNR (Figure 6).

( $m_1 = \text{ctg } \alpha_1 = 0,05$ ) et la somme des deux fruits amont et aval est voisine de 0,75 ( $m_1 + m_2 = 0,75$ ).

D'autre part, le profil du barrage ne doit pas être un triangle parce que des fois il faut construire la route sur la crête du barrage.

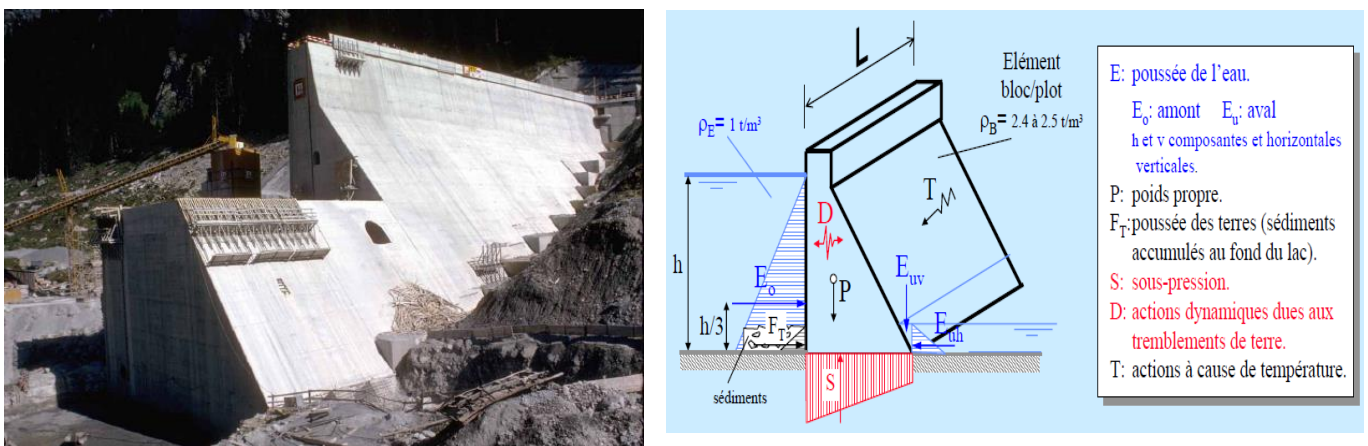


Figure 6 : Sollicitations – Forces et Actions

### 2.4.1.1 Calcul de la stabilité statique – Barrages poids :

Les calculs de stabilité de ce type de barrages sont effectués dans un problème à deux dimensions (2D). Les vérifications de stabilité doivent être faites en principe pour toutes les sections horizontales de l'ouvrage. Il ya trois cas de calculs :

- Cas de barrage déjà construit – réservoir vide-
- Cas d'exploitation –réservoir plein- (cas le plus défavorable).
- Cas d'exploitation particulière : - en cas de tremblement de terre, en cas du grand vent (pression des vagues).

Le calcul sera mené pour le cas d'exploitation de l'ouvrage (cas le plus défavorable)

- **Forces appliquées sur le corps du barrage**

Sur chaque partie de l'ouvrage sont appliquées les forces principales suivantes (Figure 7) :

- Le poids propre de l'ouvrage :  

$$P = \gamma_b \cdot S \quad (\gamma_b : \text{Poids spécifique du béton de } 2,4 \text{ à } 2,5 \text{ T/m}^3)$$
- Les forces de pression d'eau (les forces hydrostatiques) en amont et en aval ;  

$$R_1 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{\text{eau}} \cdot H_1^2 \quad (\gamma_{\text{eau}} = 1 \text{ T/m}^3)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{\text{eau}} \cdot H_2^2$$

$$R_3 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{\text{eau}} \cdot b_1 \cdot H_2$$
- La poussée de l'eau sous la base de l'ouvrage :  $R_4 = \gamma_{\text{eau}} \cdot b \cdot H_2$
- La pression de filtration.  

$$R_5 = \text{(suivant la forme de l'épure)}$$
- La poussée de la terre (Sol et envasement) :  

$$R_{S1} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_s \cdot H_s^2$$

$$(\gamma_s : \text{Poids spécifique du sol de } 2,2 \text{ à } 2,3 \text{ T/m}^3)$$

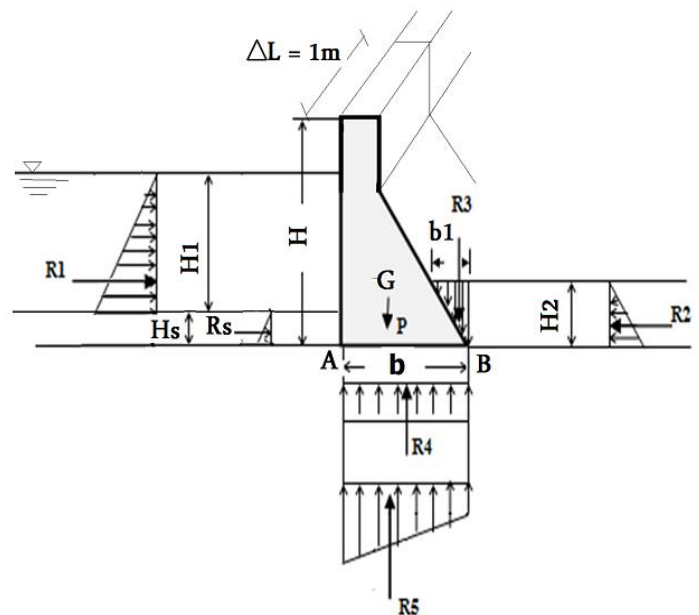


Figure 7 : Forces appliquées sur le corps du barrage

L'équilibre statique de l'ouvrage doit vérifier les deux conditions ; de non glissement et de non renversement.

**A)- Conditions de non glissement :**

Le coefficient de sécurité au glissement :  $kg = \frac{f \cdot \Sigma V}{\Sigma H} > 1$

$\Sigma V$ - la somme des forces verticales.

$\Sigma H$ - la somme des forces horizontales.

$\phi$  - Angle de frottement interne.

$f$ - coefficient de frottement interne :  $f = \text{tg}\phi$ , pris égale (Tableau 7) :

Tableau 7 : Valeur du coefficient de frottement interne selon le matériau de construction.

Type de sol	Gravier et galet	sable	Sable anguleux	Argile sableuse	Argile humide	Argile sèche	Argile faible
Coefficient $f$	0.5 à 0.6	0.4 à 0.5	0.3 à 0.4	0.25 à 0.35	0.2 à 0.3	0.4 à 0.5	0.3 à 0.5

**B)- Conditions de non renversement :**

La condition de stabilité au renversement est caractérisée par le coefficient  $K_r$ , qui exprime le rapport des moments des forces actives.

Le coefficient de stabilité au renversement :  $kr = \frac{\Sigma Ms}{\Sigma Mr} > 1$

$\Sigma Ms$  : la somme des moments de stabilisation (résistance).

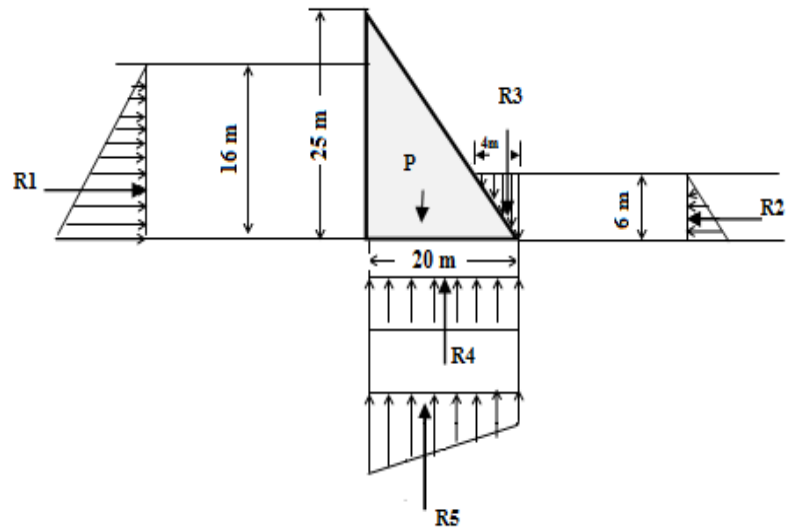
$\Sigma Mr$  : la somme des moments de renversement (basculement).

✓ **Application**

Un barrage poids en béton de section droite-triangular (ABC), retient l'eau à une hauteur de 16m, avec les données représentées sur la figure ci-contre. L'épure de la pression d'infiltration est un trapèze avec une grande base de :  $b_g = 12T/m^2$  et une petite base de :

$b_p = 3T/m^2$ ,  $\gamma_b = 2.5 T/m^3$ ,  $\phi = 30^\circ$  (angle de frottement interne).

- 1) Calculer les forces de pressions agissantes sur le corps du barrage.
- 2) Calculer la stabilité statique du barrage.



✓ **Solution :**

Données :

$H = 25$ ,  $h_1 = 16m$ ,  $h_2 = 6m$ ,

$b_1 = 4m$ ,  $b_g = 12T/m^2$ ,

$b_p = 3T/m^2$ ,  $\gamma_b = 2.5 T/m^3$   $\phi = 30^\circ$ .

1) Calcul des forces de pressions agissantes sur le corps du barrage :

a- Poids propre du barrage :

$P = \gamma_b \cdot S = 2.5 \times \frac{1}{2} \times 20 \times 25 = 625 T.$

$l_{cg} = l_{cp} = \frac{2}{3} \times 20 = 13.33m.$

b- Pressions hydrostatiques:

- En amont:  $R_1 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{eau} \cdot h_1^2 = \frac{1}{2} \times 1 \times 16^2 = 128 T.$

$l_{R1} = \frac{1}{3} \times 16 = 5.33 m.$

- En aval :  $R_2 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{eau} \cdot h_2^2 = \frac{1}{2} \times 1 \times 6^2 = 18 T.$

$l_{R2} = \frac{1}{3} \times 6 = 2 m.$

$R_3 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{eau} \cdot b_1 \cdot h_2 = \frac{1}{2} \times 1 \times 4 \times 6 = 12 T.$

$l_{R3} = \frac{1}{3} \times 4 = 1.33 m.$

c- Pression de la poussée de l'eau sous la base du barrage :

$R_4 = \gamma_{eau} \cdot b \cdot h_2 = 1 \times 20 \times 6 = 120 T.$

$l_{R4} = \frac{1}{2} \times 20 = 10 m.$

d- Pression d'infiltration :

$$R_5 = R'_5 + R''_5 = 150 \text{ T.}$$

$$R'_5 = 20 \times 30 = 60 \text{ T.}$$

$$R''_5 = \frac{1}{2} (12-3) \times 20 = 90 \text{ T.}$$

$$l_{R5} = (R'_5 \cdot l_{R'5} + R''_5 \cdot l_{R''5}) / R_5 = 11.998 \approx 12 \text{ m.}$$

2) Calcul de la stabilité statique :

a- Condition de non-glissement :

$$K_g = f \cdot \Sigma V / \Sigma H$$

$$f = \text{tg } \varphi = \text{tg } 30^\circ = 0.577.$$

$$\Sigma V = P + R_3 - R_4 - R_5 = 625 + 12 - 120 - 150 = 367 \text{ T.}$$

$$\Sigma H = R_1 - R_2 = 128 - 18 = 110 \text{ T.}$$

$$K_g = 0.577 \times 367 / 110 = \mathbf{1.93} > \mathbf{1} \quad \longrightarrow \quad \text{la condition est vérifiée.}$$

b- Condition de non-renversement :

$$K_r = \Sigma M_r / \Sigma M_b$$

$$\Sigma M_r = P \cdot l_p + R_2 \cdot l_{R2} + R_3 \cdot l_{R3} = 625 \times 13.33 + 18 \times 2 + 12 \times 1.33 = 8383.21 \text{ T m.}$$

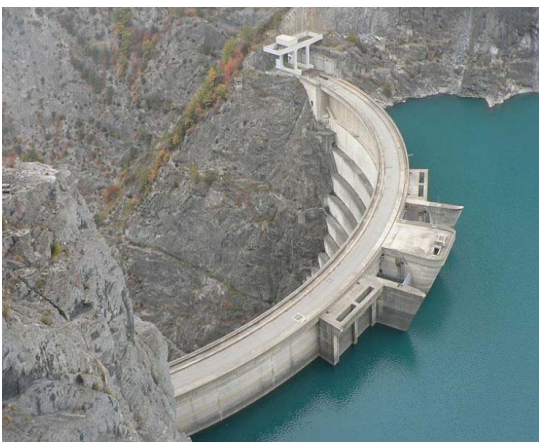
$$\Sigma M_b = R_1 \cdot l_{R1} + R_4 \cdot l_{R4} + R_5 \cdot l_{R5} = 128 \times 5.33 + 120 \times 10 + 150 \times 12 = 3682.24 \text{ T m.}$$

$$K_r = 8383.21 / 3682.24 = \mathbf{2.28} > \mathbf{1} \quad \longrightarrow \quad \text{la condition est vérifiée.}$$

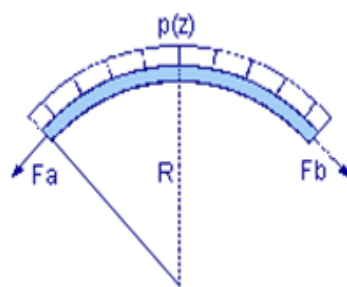
*Le barrage est stable au glissement et au renversement.*

### 2.4.2 Barrage-voûte

Il est généralement en béton armé dont la forme courbe permet un report des efforts de poussée de l'eau sur les rives rocheuses de la vallée (Figures 8 & 9).



**Figure 8** : Barrage à voûte épaisse  
-Monteynard -France, H =135m



*Fonctionnement en arc*



**Figure 9** : Barrage à multi-voûtes  
Grandval -France, H =76m

Quatre conditions sont nécessaires pour envisager la construction d'un barrage voûte :

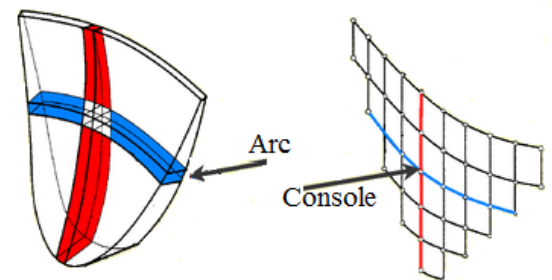
-Topographie : la vallée doit être étroite, la construction d'une voûte est intéressante si le rapport largeur de la vallée en crête sur la hauteur de l'ouvrage est inférieur à 5 ou 6 ; Si le rapport  $l_c / H_b$  dépasse cette valeur la solution des barrages à multi-voûtes ou à contreforts est plus adéquat et économique.

-La rigidité de la fondation : pour que le fonctionnement « en voûte » soit possible, il faut que la rigidité de la fondation (Appuis sur rives) soit suffisante, sinon les arcs ne trouvent pas leurs appuis et la structure tend à fonctionner en console (Figures 10).

-La résistance mécanique de la fondation : la voûte transmet des contraintes élevées à la fondation qui doit rester dans le domaine élastique pour ces niveaux de sollicitation;

-Tenue des dièdres de fondation sous l'effet des sous pressions et compte tenu de la compression apportée par la voûte qui peut empêcher leur dissipation.

La stabilité des voûtes dépend essentiellement de la capacité des appuis rocheux à supporter des efforts relativement concentrés, dus à la poussée des arcs et à l'encastrement de la structure. Le barrage voûte exige une vallée étroite et un rocher de très bonne qualité mécanique.



**Figure 10** : Fonctionnement en voûte

On distingue les types de barrage-voûte tels que : barrage à voûte mince, barrage à voûte épaisse, barrage à voûte-coupole, barrage à multi-voûtes...etc. (Figure 11).

- barrage à voûte mince, généralement c'est ouvrage à parement amont vertical et de forme cylindrique en aval et le rayon diminue du sommet à la base.

- Pour les barrages de type « voûte épaisse » ou « poids voûte », le parement amont peut être cylindrique à axe vertical ou incliné vers l'aval lorsque la largeur de base est supérieure à celle strictement nécessaire à l'équilibre d'une voûte pure (Figure 11 a).

- Pour le barrage à voûte-coupole, lorsque leur profil en travers présente une forme d'arc; cette double courbure permet de lui donner une épaisseur inférieure à celle d'un barrage voûte classique (Figure 11 b).



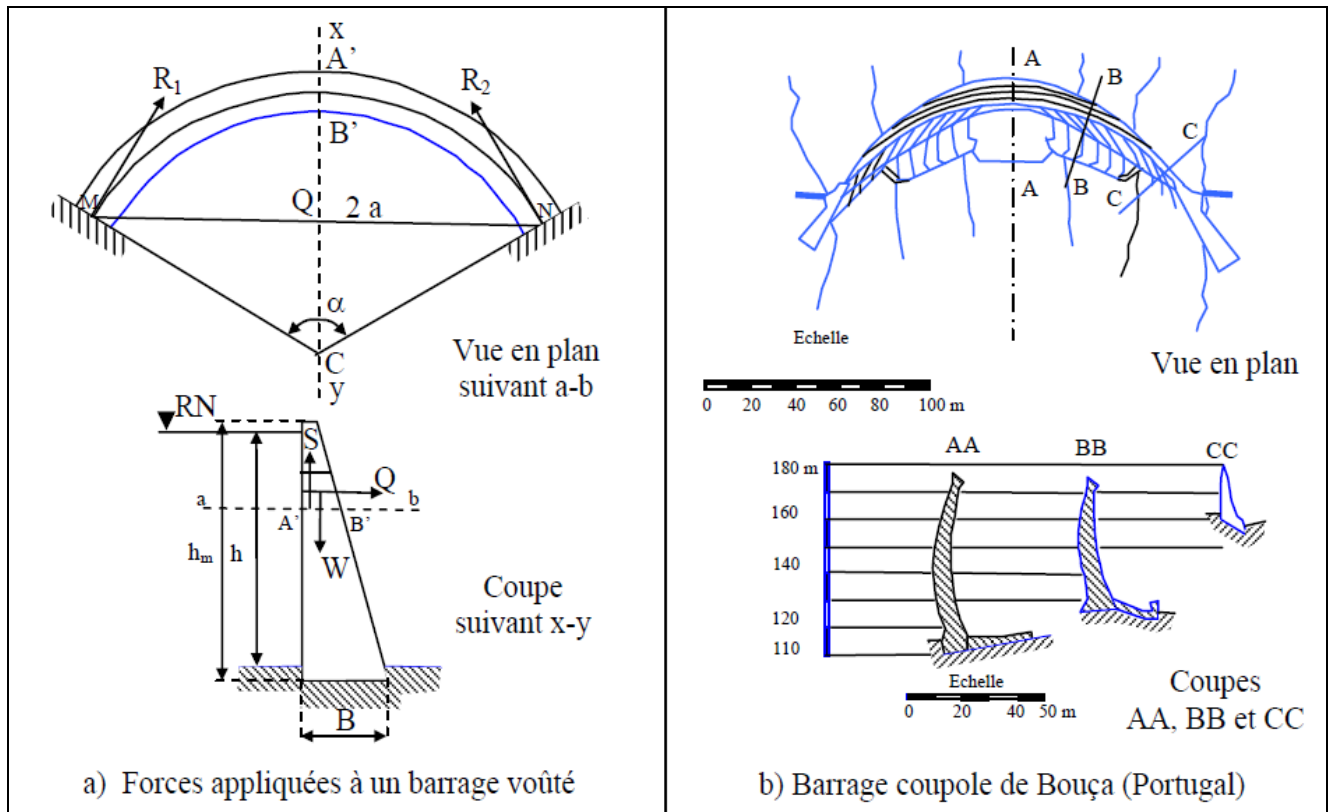


Figure 11 : Différents types de barrage voûte (Ginocchio, 1959)

2.4.2.1 Calcul de la stabilité du barrage-voûte :

- Stabilité statique :

$$\Sigma F = 0 \Rightarrow -Q + R_1 + R_2 = 0$$

Il n'existe pas de glissement parce que les surfaces d'appuis forment des cônes (Figure 12). En pratique on admet que le demi-angle au sommet des cônes est égal à 30°. Pour augmenter la résistance des appuis R1 et R2 il faut consolider les appuis par des injections de ciment.



Figure 12 : Surfaces d'appuis en cônes

2.4.2.2 Stabilité élastique :

Il y a plusieurs méthodes de calcul, mais on va traiter dans ce cours les méthodes expérimentales réalisées au laboratoire est la méthode la plus simple qui permet de trouver les résultats convenables :



c'est la formule de tuyau. Cette méthode donne des résultats d'autant plus exacts lorsque l'épaisseur de la voûte est faible par rapport à son diamètre.

Pour le calcul, on divise le barrage en arcs horizontaux unitaires ( $\Delta H = 1\text{m}$ ) supposés indépendants les un des autres.

- Forces appliquées à un arc unitaire :
  - La poussée de l'eau  $Q$ .
  - Les réactions  $R_1$ ,  $R_2$  des surfaces d'appui.

On néglige le poids propre et les sous pressions pour les raisons :

a)- Chacun des arcs horizontaux est calculé indépendamment des arcs voisins.

b)- Le parement amont travaille en compression, c'est pourquoi les fissures verticales ne présentent pas l'influence.

De plus, on supprime les sous pressions dans la fondation par drainage.

D'abord il faut déterminer la résultante des pressions d'eau, agissantes sur l'arc unitaire considéré (Figure 13).

On désigne :

$r$  : rayon de la fibre moyenne de l'arc unitaire considéré.

$P$  : pression de l'eau.

Sur une tranche  $ds$ , la force de pression est de  $pds$ , la projection de laquelle en direction de  $Q$  est :  $pds \cos\alpha = pr d\alpha \cos\alpha$ .

\* La force sur toute la partie à gauche est de :

$$\int_0^{\alpha_0} pr \cos\alpha d\alpha$$

\*La résultante de pression d'eau, agissante sur l'arc unitaire est :

$$Q = 2 \int_0^{\alpha_0} p ds \cos\alpha = 2 \int_0^{\alpha_0} pr \cos\alpha d\alpha = 2pr \int_0^{\alpha_0} \cos\alpha d\alpha = 2pr \sin\alpha_0$$

\*La résultante des réactions  $R_1$  et  $R_2$  est égale à  $Q$ , C'est pourquoi

$$\text{On a : } R_1 = R_2 = \frac{Q}{2 \cos(90^\circ - \alpha_0)} = \frac{Q}{2 \sin \alpha_0} = \frac{2pr \sin \alpha_0}{2 \sin \alpha_0} = pr$$

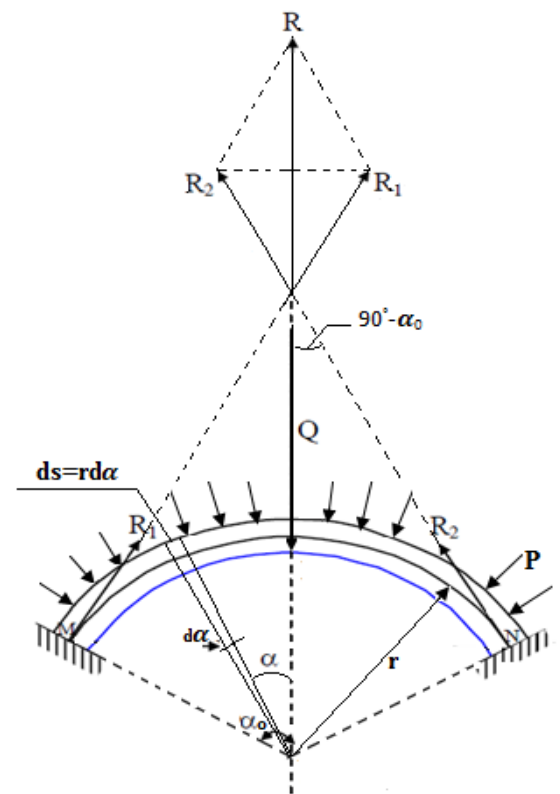


Figure 13 : Représentation graphique de la résultante des pressions d'eau

D'autre part, en désignant :

- b : épaisseur de l'arc unitaire considéré
- b x 1m : section de l'arc unitaire (surface d'appui)
- [σ] : Contrainte de compression admissible du béton

On a :  $R1 = R2 = b \times 1 \times [\sigma] = pr$

D'où :  $b = \frac{pr}{[\sigma]}$  (Formule de tuyau).

L'examen de cette formule conduit à deux conséquences suivantes :

- 1- Si le rayon de courbure est le même ( r = constant) pour tous les arcs unitaires, l'épaisseur de ceux- ci augmente linéairement en fonction de la profondeur depuis le sommet jusqu'à la base.
- 2- L'angle d'ouverture économique  $\theta_e$  (Figure 14). Pour un arc déterminé, si le rayon r diminué, l'épaisseur b diminué, mais la longueur l de l'arc augmente, c'est-à-dire il existe une valeur de l'angle d'ouverture  $\theta$  (angle sous lequel on voit depuis le centre O les deux extrémités de la fibre moyenne) pour laquelle le volume d'un arc unitaire est minimal.

Soit 2a la largeur MN de la vallée. La longueur de la fibre moyenne est :  $l = r \theta$ .

La surface de la tranche de l'arc considéré est :

$$S = bl = br\theta = \frac{p r^2 \theta}{[\sigma]} = \frac{p a^2 \theta}{[\sigma] \sin^2 \frac{\theta}{2}}$$

Pour trouver la valeur minimale de S on prend la dérivée de :

$$\frac{ds}{d\theta} = \frac{p a^2}{[\sigma]} = \left[ \frac{\sin^2 \frac{\theta}{2} - 2 \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \frac{\theta}{2}}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \right] = 0$$

Où :

$$\sin^2 \frac{\theta}{2} - \theta \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} = 0$$

Si  $\theta \neq 0$ , on a :  $\sin \frac{\theta}{2} - \theta \cos \frac{\theta}{2} = 0$  où  $\text{tg} \frac{\theta}{2} = \theta$ , d'où  $\theta_e = 133^\circ$  C'est la valeur de l'angle d'ouverture économique.

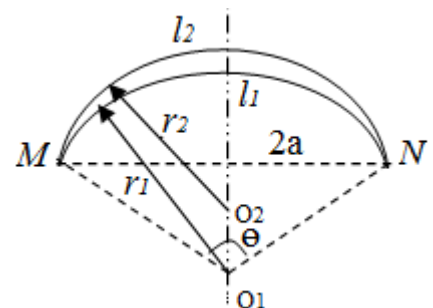


Figure 14 : Angle d'ouverture économique

Généralement ce type de barrages est construit sur la fondation rocheuse solide avec les rives rocheuses solides et la poussée de l'eau est transmise aux deux rives donc la contrainte de compression est :

$$\sigma = p r b < [\sigma]$$

2.4.2.3 Dimensionnement

Dans la pratique du dimensionnement d'une voûte, on commence par esquisser une première forme (Figure 15), sur la base de considérations de contraintes moyennes. On donne aux arcs supérieurs un angle d'ouverture voisin de  $110^\circ$  ; l'épaisseur minimale en crête est :  $e_{\min c} = 0,012 (Lc + H)$

Avec :

$e_{mc}$  (m) : épaisseur minimale en crête

$Lc$  (m) : largeur du site au niveau de la crête

$H$  (m) : hauteur du barrage.

Souvent dans la plupart des cas, on augmente l'épaisseur au sommet du barrage pour faire passer une route.

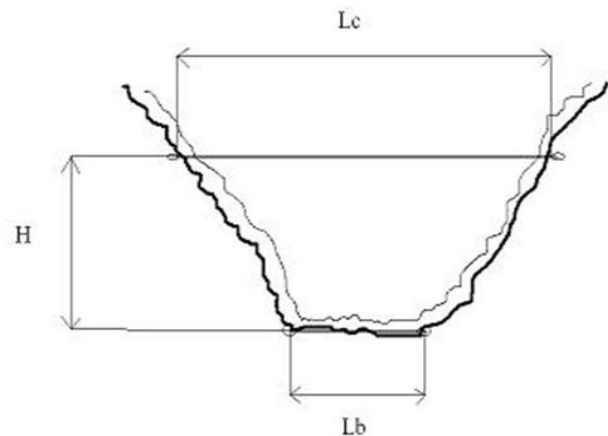


Figure 15 : Esquisse d'une voûte

En fonction de la hauteur  $H$  de la voûte et de deux largeurs de vallée,  $L_1$  au sommet et  $L_2$  proche de la base, les formules USBR (United States Bureau of Réclamation) donnent la forme de la console de clé de la voûte (Figure 16) :

$$e_c = 0,01.(H + 1,2.L_1)$$

$$e_b = \sqrt[3]{(0,0012.H.L_1.L_2.(0,008202.H)^{0,008202.H}}$$

$$e_m = 0,9.e_b$$

Où :

$e_c$  : épaisseur en crête

$e_b$  : épaisseur à la base

$e_m$  : épaisseur moyenne

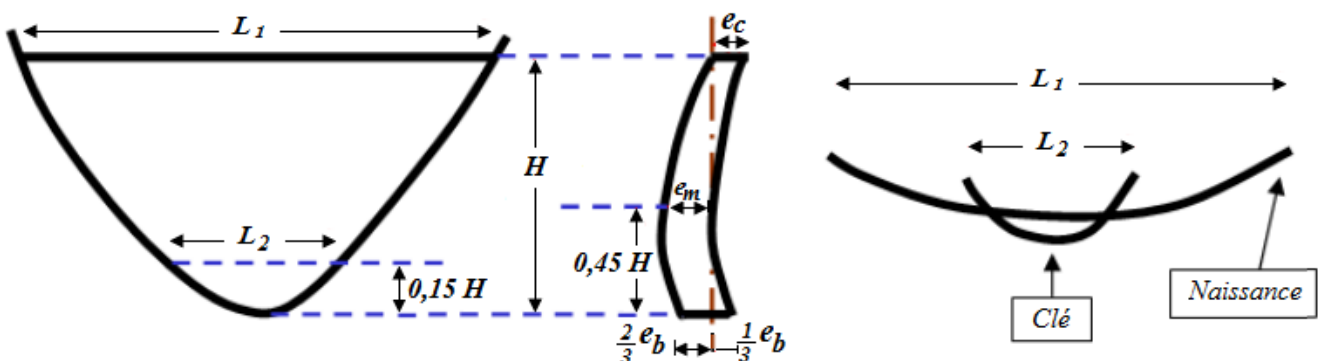


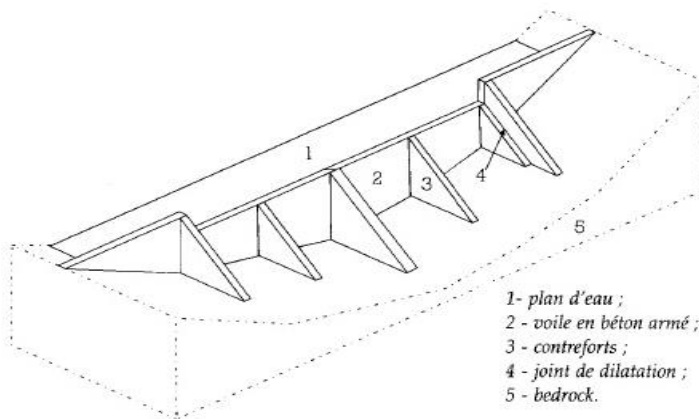
Figure 16 : Forme de la console de clé de la voûte

**2.4.3 Barrage à contreforts**

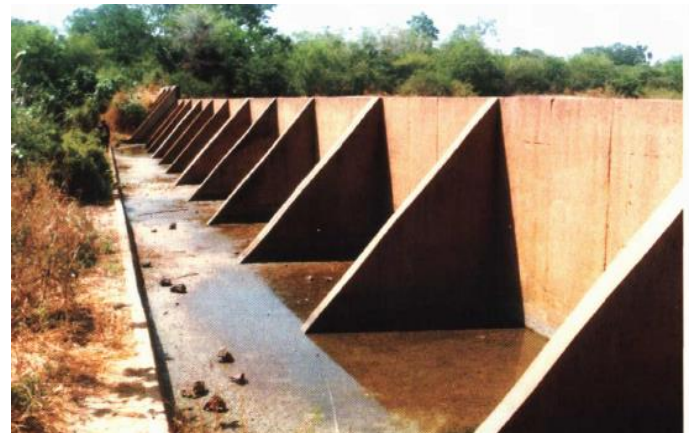
Les barrages à contreforts ou barrages poids évidés sont choisis pour économiser et réduire le volume de béton. Adaptés aux vallées larges sur une bonne fondation (Largeur de la crête dépasse 5 à 6 fois la hauteur), où la construction des barrages voûtes n'est pas possible. Ils sont composés d'un voile en béton armé (mur d'étanchéité qui supporte l'eau retenue), soutenues par des contreforts (série de renforts ou murs triangulaires verticaux plus ou moins épais appelés contreforts) perpendiculaires à l'axe du barrage, régulièrement espacés et construits pour supporter la poussée de l'eau et à la transmettre à la fondation.

D'après la forme de l'organe d'étanchéité on divise les barrages à contreforts en (Figure 17). :

- a- **Barrages à grandes têtes** : ce sont les barrages avec un élargissement de la partie amont, appelée tête (Figure 17a).
- b- **Barrages-planches planes (murs plats)** : ce sont des barrages avec dalles planes en béton armé, appuyées sur les contreforts (Figure 17b).
- c- **Barrages à voûtes multiples** : avec organe d'étanchéité de type voûtes minces inclinées en béton armé (Figure 17c).

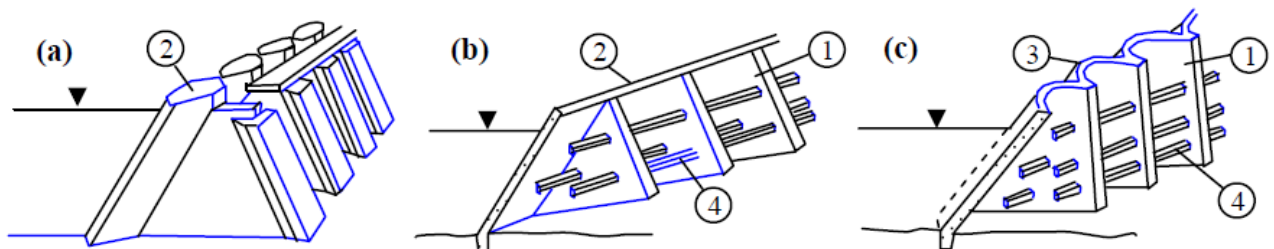


1- plan d'eau ;  
2 - voile en béton armé ;  
3 - contreforts ;  
4 - joint de dilatation ;  
5 - bedrock.



Barrage à contreforts de Balavé (Burkina Faso).

Barrage –voile en béton armé à contreforts



Légende :

- 1) contre fort; 2) recouvrement à dalle plane; 3) recouvrement à voûte; 4) poutre de rigidité

**Figure 17** : Barrage à contreforts

2.4.3.1 Barrages-planches planes :

• **Caractéristiques principales :**

- La hauteur du barrage ne doit pas dépasser 20 à 40 m.
- Possibilité de construire le barrage comme déversoir (Figure 18).
- Participation du poids d'eau sur les planches en amont à augmenter la stabilité du barrage.
- Adapté au tassement irrégulier causé par la faiblesse de la fondation.
- La construction est simple et demande la bonne qualité des matériaux.

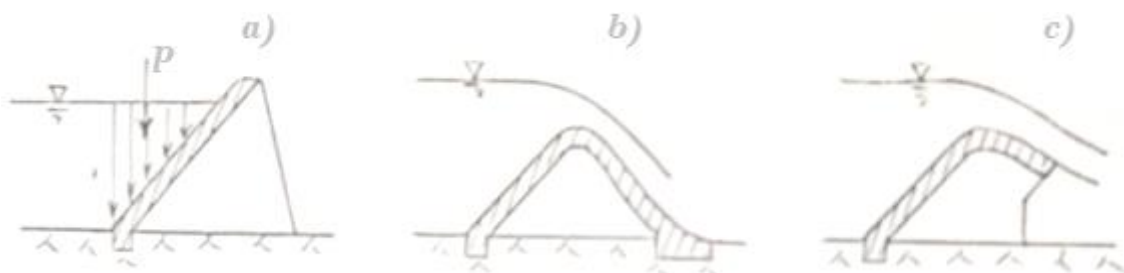


Figure 18 : Contreforts-déversoir

\***Planches planes** : Sont des dalles en béton armé s'appuient librement sur les contreforts, avec l'épaisseur variée de haut en bas, de 0,2 -0,3 m à la crête et de 0,6 – 1,5m à la base en fonction des charges supportées, l'angle d'inclinaison de la planche, contrainte admissible du béton et de l'acier et la distance entre les contreforts (Figure 19).

- d : épaisseur de la planche
- e = (0,5 à 1) d : largeur de la console
- l = (5 à 8m) : distance entre contreforts

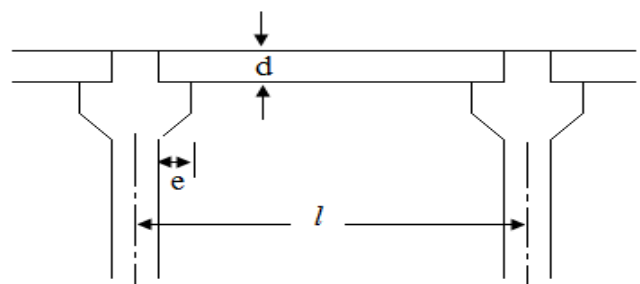


Figure 19: Dalle (planche)- contreforts

- Les forces agissantes sur la planche sont : Le poids propre de la planche P, La poussée de l'eau, poussée de sol et envasement, forces de séisme, force du vent,...
- Pour le calcul on divise la planche en bandes horizontales de largeur 1 m avec longueur de  $l$ , supposées indépendantes les unes des autres et chaque bande les forces appliquées sont :
  - La pression de l'eau :  $p = \gamma y$  et le poids propre de la bande  $q$  (Figure 19).

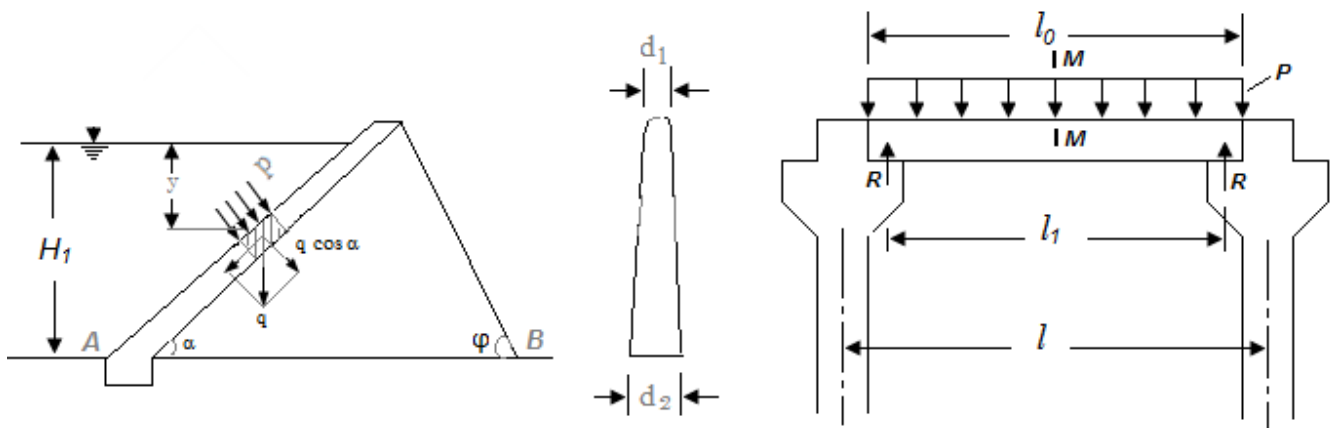


Figure 20 : Charges sur planche et contreforts

\***Contreforts** : Sont des murs verticaux avec l'épaisseur variée de haut en bas, de 0,16 -0,35 m à la crête et de 0,3 – 1,8m à la base. En général pour déterminer l'épaisseur des contreforts on utilise les formules empiriques suivantes :

$$d_1 = \frac{h}{200} + 0,2m,$$

$$d_2 = \frac{h}{36} + 0,2m,$$

$d_1$  et  $d_2$  : épaisseurs à la crête et à la base du contrefort.

$h$  : hauteur du barrage.

En amont des contreforts il y a des consoles pour servir de l'appui aux planches. Les contreforts sont de formes trapézoïdales avec  $\alpha = 45^\circ - 60^\circ$ ,  $\varphi = 60^\circ - 90^\circ$  (Voir figure 20).

Les contreforts sont construits en béton ou béton armé. Pour éviter la flexion des contreforts on construit des pontus (poutres) de renforcement distants de 4 -8m avec section (0,2- 0,3m) x(0,4-0,5) (Figure 21). La distance entre contreforts est de  $l = (5-8m)$ . Pour les barrages de grande hauteur  $l$  peut atteindre 12m.

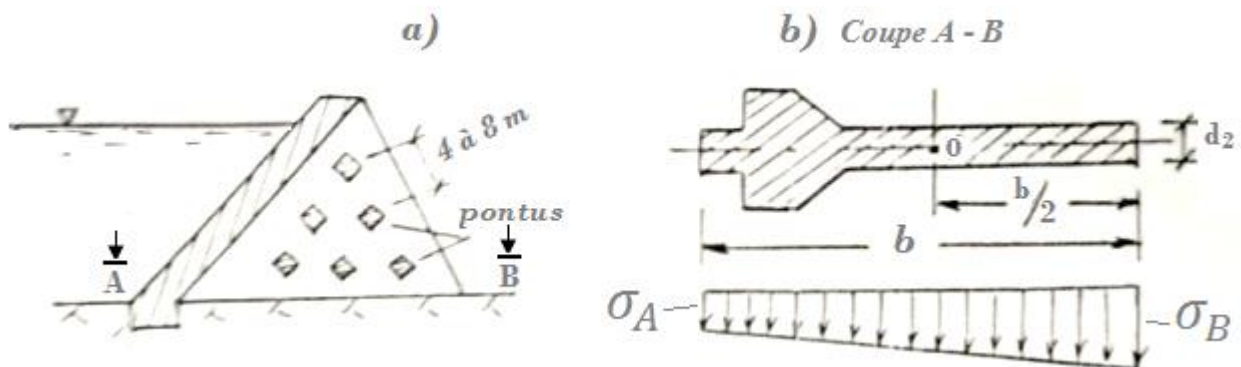


Figure 21 : Emplacement et renforcement des contreforts

### 2.4.3.1 Calcul de la stabilité

Les calculs de la stabilité statique et élastique des contreforts peuvent être effectués comme les calculs de la stabilité d'un barrage poids en béton.

- **Calcul de stabilité statique :**

Sur chaque partie (élément) de l'ouvrage sont appliquées les forces principales suivantes :

- ✓ **Les forces horizontales:** - Les pressions d'eau en amont et en aval.  
- La pression de la terre (Sol et envasement).
- ✓ **Les forces verticales :** - Le poids propre des planches planes et des contreforts.  
- Les composantes verticales des pressions d'eau.  
- Les sous pressions agissantes sur la base des contreforts.

- Condition de non- glissement (Suivant la section AB) :

$$K_g = \frac{f \sum F_V}{\sum F_H} > 1 \quad \text{Où : } f: \text{Coefficient de frottement interne sur la fondation}$$

$\sum F_V$  : La somme des forces verticales.  
 $\sum F_H$  : La somme des forces horizontales.

- Condition de non -renversement :

$$K_r = \frac{\sum M_r}{\sum M_b} > 1 \quad \text{Où } \sum M_r : \text{La somme des moments de retenue par rapport au point B.}$$

$\sum M_b$  : La somme des moments de basculement par rapport au point B.

- **Calcul de la stabilité élastique :**

Prenons la section (A-B) avec les dimensions  $b \times d_2$ . Les contraintes normales aux deux parements amont et aval du contrefort sont déterminées par la formule :

$$\sigma_{A,B} = \frac{\sum F_V}{bd_2} \mp \frac{6M}{d_2 b^2} \quad \text{Où : } M : \text{moments des forces par rapport au centre de la section.}$$

### 2.4.4 Barrages à voûtes multiples :

Un barrage à voûtes multiples comprend un écran d'étanchéité, constitué d'un certain nombre de voûtes de faible épaisseur, appuyant sur des contreforts. Réalisés en béton ou en béton armé.

#### Forme du barrage :

Les voûtes sont en général cylindriques avec l'inclinaison de  $m = 1$  à  $0,6$ . L'angle d'ouverture aussi grand que possible, se rapprochant de la valeur de  $133^\circ$ . Les contreforts sont aussi des murs verticaux avec l'épaisseur variée de haut en bas (Figure 22).



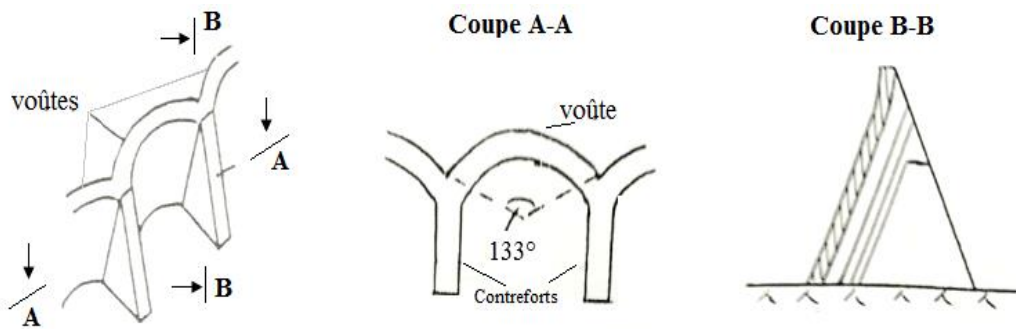


Figure 22 : Forme et angle d'ouverture des voûtes

Les barrages à voûtes multiples sont construits dans les vallées très larges par rapport à la hauteur où il est impossible de construire les barrages à voûte unique. La fondation doit être solide pour éviter le tassement. Ce type de barrage présente l'avantage d'économie des matériaux de construction (le volume de béton suivant la hauteur du barrage représente 20 à 50% de celui des barrages poids). Le seul inconvénient de ce barrage est la complexité de la structure.

2.4.4.1 Calcul de la stabilité

a)-Les forces appliquées (Figure 23) :

- La poussée de l'eau **Q** normale à la surface du parement amont appliquée à 1/3 de la hauteur à partir de la base.
- Le poids propre des voûtes **P**.
- La résultante des sous pressions **S**.

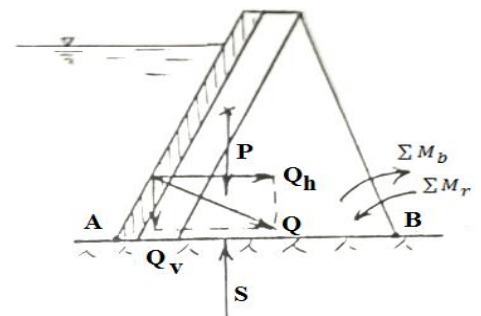


Figure 23 : Forces appliquées / Multi-voûtes

b)- Calcul de la stabilité :

• Stabilité statique

-Condition de non- glissement : 
$$K_g = \frac{f(Q_v + P - S)}{Q_h} > 1$$

Avec :  $Q_v$ ,  $Q_h$  : composantes verticale et horizontale de la poussée de l'eau.

- Condition de non -renversement :

$$K_r = \frac{\sum M_r}{\sum M_b} > 1$$
 où  $\sum M_r$  : La somme des moments de retenue par rapport au point B.  
 $\sum M_b$  : La somme des moments de basculement par rapport au point B.

• Stabilité élastique :

Pour les voûtes la méthode de calcul est la même que celle du barrage à voûte unique.  
 Pour les contreforts la méthode de calcul est la même que celle des barrages planches planes.

c)- Dispositions constructives :

Pour diminuer les sous pressions il faut construire l'écran d'étanchéité dans la fondation et établir des drains après l'écran comme pour les barrages poids en béton.