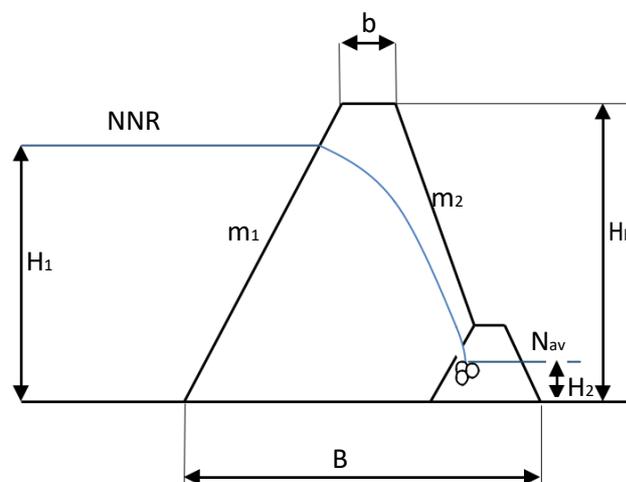


Chap. 3**LES BARRAGES EN TERRE.****1- Introduction.**

Les barrages en terre sont des remblais en forme de trapèze, ils sont classés dans la catégorie des barrages fixes et souples. Ces ouvrages de retenue ne permettent jamais le débordement au-dessus de leur crête.

**2- Avantages et inconvénients des barrages en terre.**

- **Les Avantages:**

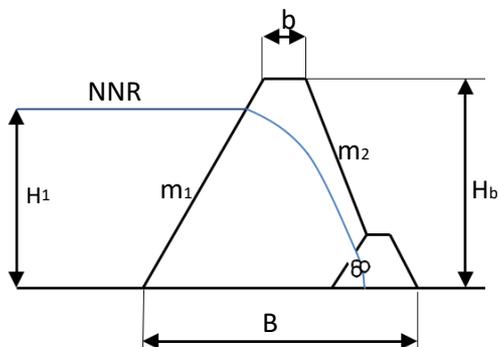
- Utilisation des matériaux locaux pour la construction du corps du barrage.
- Possibilité de réaliser ce type de barrage dans n'importe quelle région géographique.
- Possibilité d'utiliser n'importe quel type de matériaux.
- Possibilité de mécanisation à tous les niveaux et stades de la réalisation.
- La hauteur est théoriquement illimitée.
- Possibilité de réaliser ce type de barrage sur n'importe quelle fondation (rocheuse ou non).

- **Les inconvénients.**

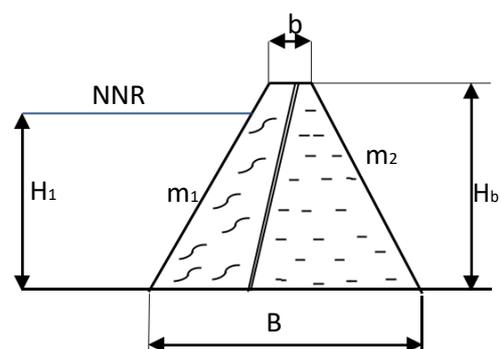
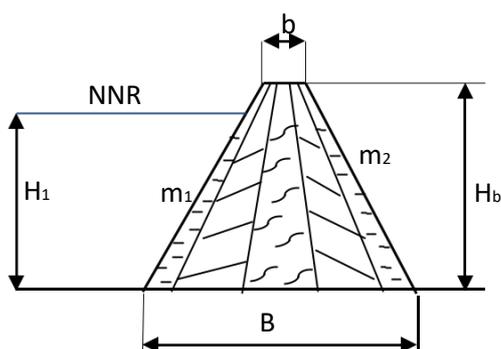
- Impossibilité de déverser le débit des crues au-dessus de la crête du barrage.
- Présence d'un écoulement d'eau dans le corps du barrage (possibilité de déformation).
- Grandes pertes d'eau à travers le barrage et ses fondations.

3- Classification des barrages.

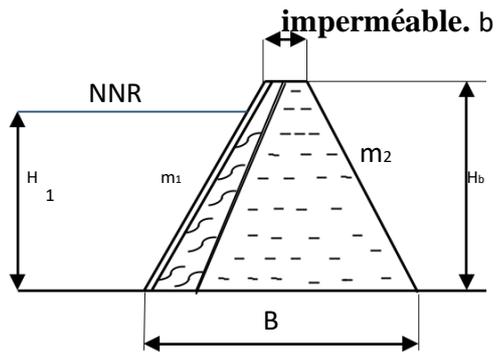
- **Selon le mode de leur construction.**
 - Barrage en remblai non compacté.
 - Barrage en terre compactée.
 - Barrage réalisé par explosion orientées
 - Barrage de remblayage hydraulique.
- **Selon la construction du corps de barrage.**
 - **Barrage en terre homogène.**



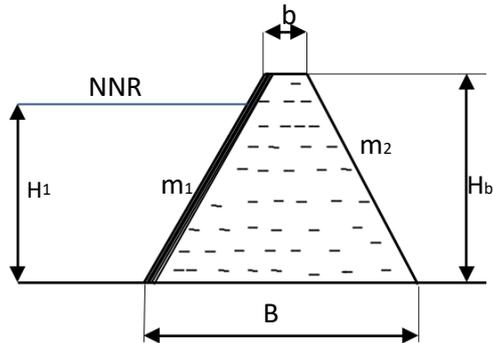
- **Barrage en terre hétérogène.**



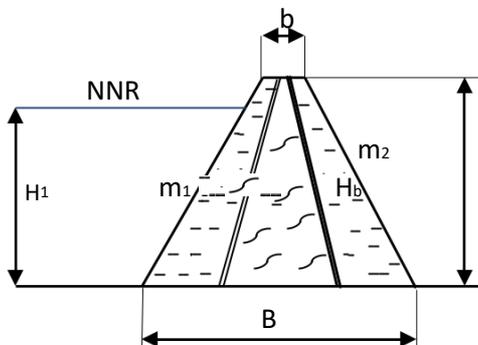
- Barrage en terre avec masque en matériaux



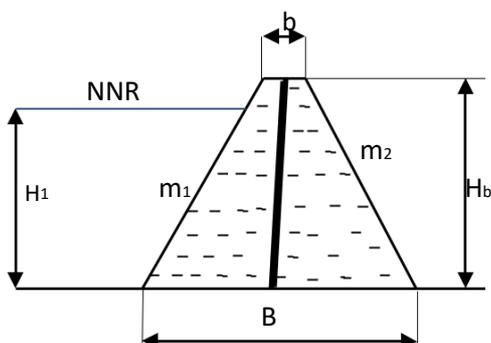
- Barrage en terre avec masque en matériaux artificiel.



- Barrage en terre à noyau.

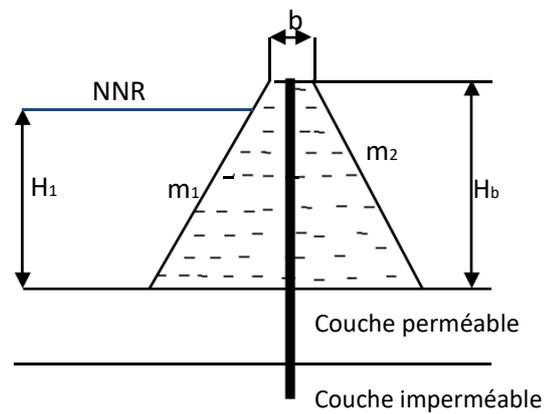
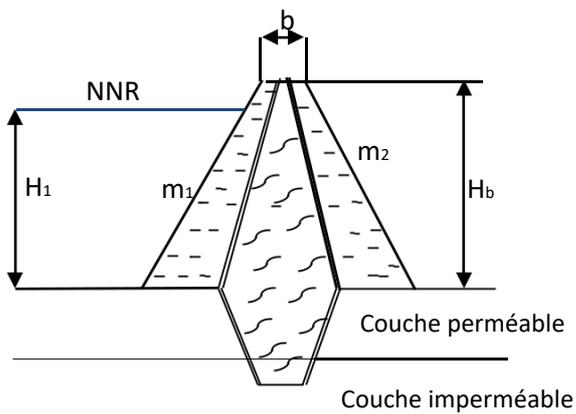
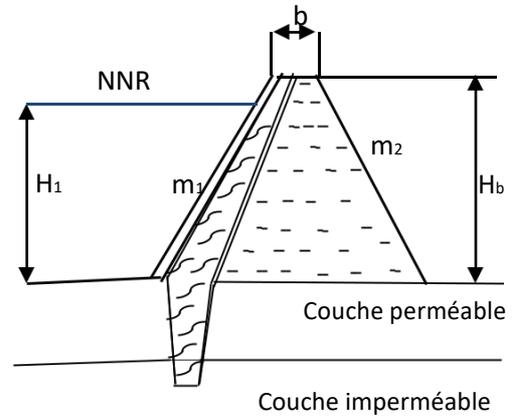
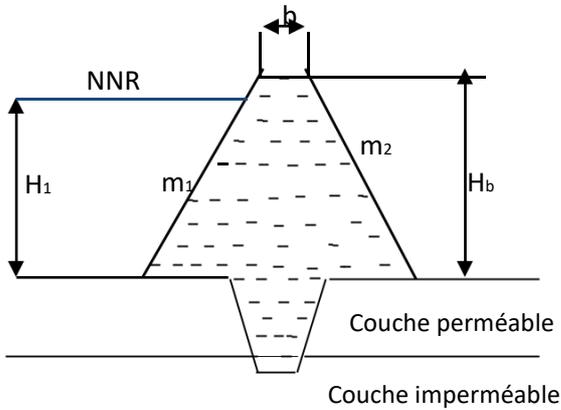


- Barrage en terre à diaphragme.

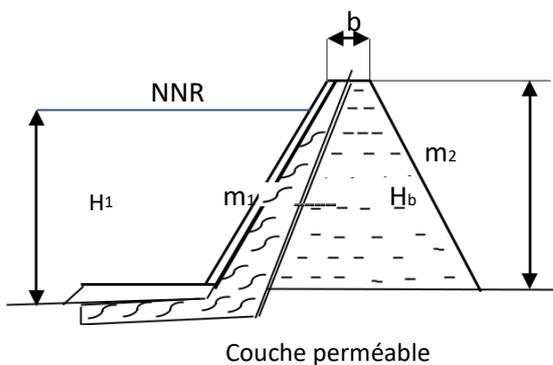


- Selon la réalisation du dispositif d'étanchéité sous l'ouvrage.

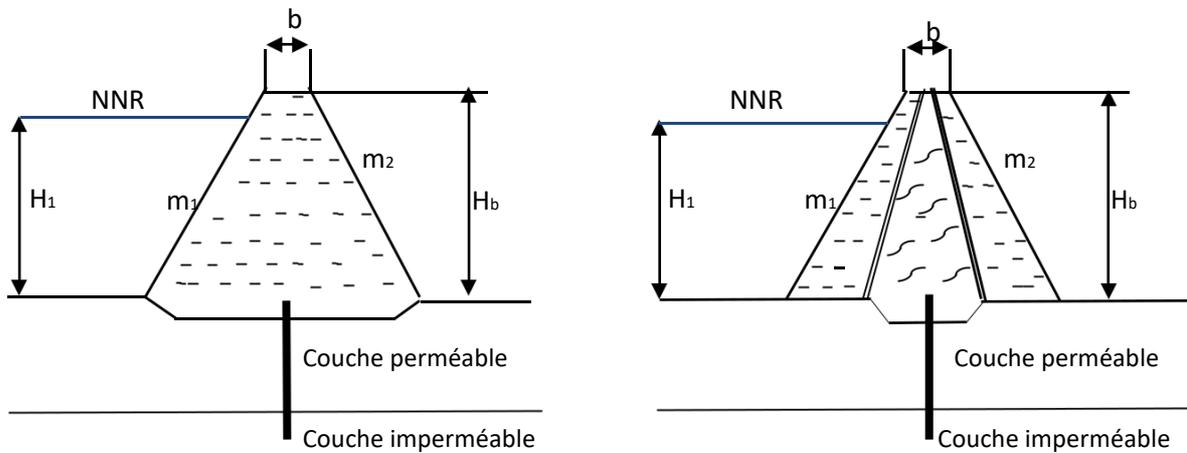
- Barrage en terre avec parafouille.



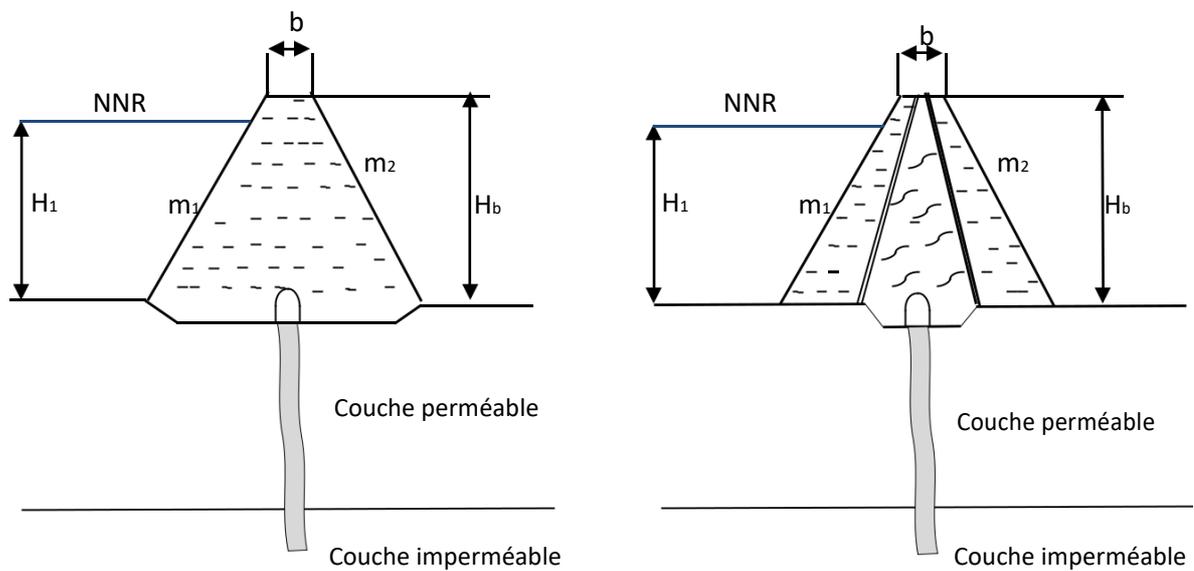
- barrage en terre à masque avec tapis étanche.



- Barrage en terre avec rideau de palplanches.



• Barrage en terre avec coupure par injections ou paroi moulée.



4- Dimensionnement du barrage.

4-1 Largeur en crête du barrage (épaisseur en crête).

La largeur en crête du barrage est toujours supérieure à 3.0 mètres Pour permettre l'achèvement du remblai et son entretien par des engins mécaniques. Mais dans le cas où on fait passer une route au dessus, cette largeur est fixée en fonction de l'importance de cette route.

L'estimation de cette largeur peut être faite par les formules empiriques suivantes :

- Formule de T.T. Knappen.

$$b = 1,65 \sqrt{H_b}$$

- Formule d'E.F. Preece

$$b = 1,10 \sqrt{H_b} + 1$$

Avec : b – largeur en crête du barrage (en m).

H_b - Hauteur totale du barrage (en m).

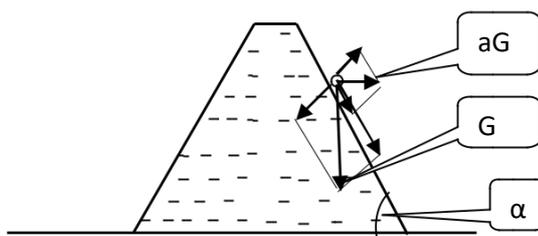
4-2 Pentés des talus.

Les pentes des talus d'un barrage en terre sont fixées par les conditions de stabilité mécanique du massif et ses fondations.

Plusieurs méthodes sont employées en premières approches.

- **Stabilité d'une pierre sur le talus amont.**

Pour fixer la pente des talus, on peut étudier la stabilité d'une pierre posée sur le talus amont du barrage.



La pierre posé sur le talus est soumise à deux forces, celle de la pesanteur et celle due au séisme. Pour que cette pierre soit stable, il faut que la somme des forces stabilisatrices soit supérieure à la somme des forces motrices, donc on peut écrire:

$$\sum \frac{\mathbf{F}_{\text{stabilisatrices}}}{\mathbf{F}_{\text{motrices}}} \geq F_{\text{stabilité}}$$

$$\frac{[G.\cos(\alpha) - a.G.\sin(\alpha)].\text{tg}(\varphi)}{G.\sin(\alpha) + a.G.\cos(\alpha)} \geq F_{\text{st}}$$

$$\frac{[\cos(\alpha) - a.\sin(\alpha)].\text{tg}(\varphi)}{\sin(\alpha) + a.\cos(\alpha)} \geq F_{\text{st}}$$

$$\frac{[\text{ctg}(\alpha) - a].\text{tg}(\varphi)}{1 + a.\text{ctg}(\alpha)} \geq F_{\text{st}}$$

$$[\text{ctg}(\alpha) - a].\text{tg}(\varphi) \geq F_{\text{st}} [1 + a.\text{ctg}(\alpha)]$$

$$\text{ctg}(\varphi) \geq \frac{a.\text{tg}(\varphi) + F_{\text{st}}}{\text{tg}(\varphi) - a.F_{\text{st}}}$$

Avec : $F_{\text{st}}=1,05$ coefficient de stabilité au glissement du talus amont en cas de séisme.

$\varphi=35^\circ$ angle de frottement interne de la pierre contre le talus.

$a=0.12$ coefficient du séisme.

Donc on aura :

$$m_2 = \text{ctg}(\alpha) = 2,0 \quad \text{et} \quad m_1 = 1,2. m_2 = 2,5$$

- **D'après tarzaghi K.**

Ce spécialiste propose de prendre les pentes des talus en fonction de la nature du massif constituant le barrage.

Matériaux du barrage	Pente amont	Pente aval
	m1	m2
1- Massif homogène.		
Matériaux à granulométrie continue	5/2	2/1
Limon grossier	3/1	5/2
Argile limoneuse ou argile $H_b \leq 15$ m.	5/2	2/1
Argile limoneuse ou argile $H_b > 15$ m.	3/1	5/2
2- Barrage à noyau.		
Sable ou sable et graviers avec noyau en argile.	3/1	5/2
Sable ou sable et graviers avec noyau en béton.	5/2	2/1

- **Pratique de l'ex. URSS.**

Dans ce cas, seule la hauteur du barrage est prise en considération dans le choix des pentes.

Hauteur du barrage (en m)	Pentes des talus.	
	m1	m2
< 5	2/1 à 5/2	3/2 à 3,5/2
5 à 10	4,5/2 à 5,5/2	3,5/2 à 4,5/2
10 à 15	5/2 à 3/1	2/1 à 5/2
15 à 50	3/1 à 4/1	5/2 à 4/1
>50	4/1 à 5/1	4/1 à 4,5/1

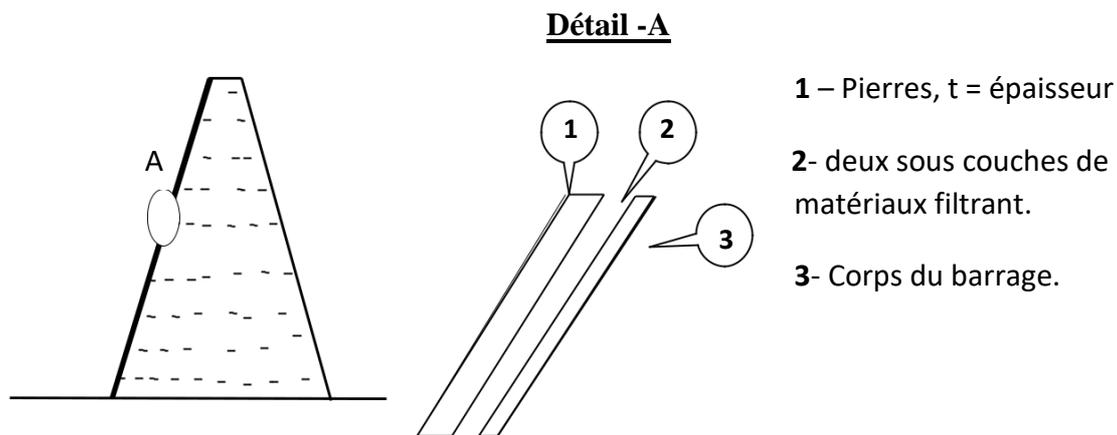
Il est à noter que les pentes choisies initialement ne peuvent être effectives qu'une fois la stabilité au glissement vérifiée. Souvent on procède à un changement de pentes pour les barrages dont la hauteur excède les 50 mètres.

4-3 Protection des talus.

4-3-1 Talus amont.

■ Revêtement de pierres.

- Enrochement de protection.



L'épaisseur du revêtement (t) peut être fixée par divers méthodes.

- Formule de Grichine.

$$t \geq 3 D_P \quad \text{Ou} \quad t \geq 2,5 \sqrt[3]{\frac{P}{\gamma_P}}$$

$$D_P = \sqrt[3]{\frac{P}{0,524 \gamma_P}} \quad D_P \text{ – Diamètre de la pierre assimilée à une sphère.}$$

$$P = n \cdot (\gamma_P - \gamma_w) \sqrt{1 + m^2} \cdot \frac{0,025 \cdot \gamma_P \cdot \gamma_w \cdot h^2 \cdot \lambda}{\gamma_P} \quad P \text{ - poids d'une pierre qui peut résister l'action d'une vague.}$$

$n = 1,25$ (pierres classées) à $2,0$ (pierres non classées) - coefficient de sécurité de la pierre.

$\gamma_P = 2,0$ à $2,2 \text{ tf/m}^3$ poids volumique de la pierre.

$\gamma_w = 1,0 \text{ tf/m}^3$ poids volumique de l'eau.

m_1 – pente du talus amont.

λ - longueur de la vague.

h - hauteur de la vague.

La hauteur(h) et la longueur(λ) de la vague peuvent être calculés par les formules de Labzovsky.

$$h = \beta \cdot h_0$$

$$\lambda = \alpha \cdot \lambda_0$$

h_0 et λ_0 sont la hauteur et la longueur des vagues dans le cas de grandes étendues d'eau avec des profondeurs importantes. leurs valeurs sont données par des formules empiriques.

$$h_0 = 0,073 \cdot k \cdot W_{10} \sqrt{F \cdot \varepsilon}$$

$$\lambda_0 = 0,073 \cdot W_{10} \sqrt[3]{\frac{F}{\varepsilon}}$$

Avec :

W_{10} –vitesse du vent mesurée à 10 mètres au-dessus du plan d'eau.

Généralement cette vitesse est calculée par l'expression.

$$W_{10} = 1,25 \cdot W$$

W - Vitesse du vent calculée.

$$k = 1 + e^{-0,4F/W_{10}} \quad \text{Coefficient correcteur.}$$

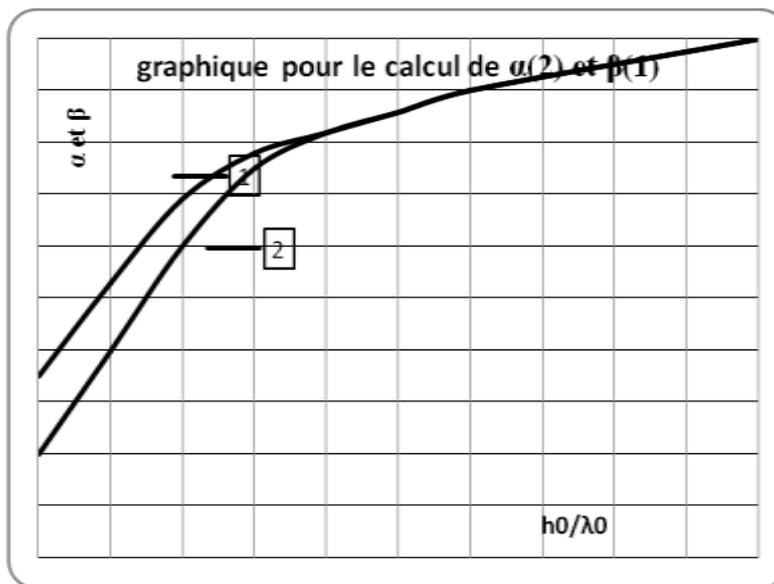
F - Longueur du fetch.

$$\varepsilon = \frac{1}{9 + 19 e^{-14/W_{10}}} \quad \text{Coefficient correcteur.}$$

Les valeurs de α et β peuvent être déterminées du graphique suivant:

$$\beta = f\left(\frac{h_0}{\lambda_0}\right) \quad \text{Et} \quad \alpha = f\left(\frac{h_0}{\lambda_0}\right)$$

$\left(\frac{h_0}{\lambda_0}\right)$	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	1,0
α	0,53	0,69	0,78	0,82	0,86	0,90	1,0
β	0,40	0,60	0,75	0,82	0,86	0,90	1,0



- L'épaisseur (t) de la protection en enrochement aussi calculée par l'expression suivante :

$$t = c \cdot V_v$$

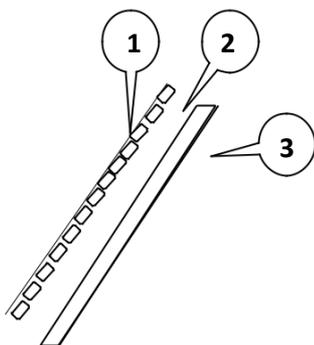
Avec : t - épaisseur de la couche d'enrochement (en m).

V_v - vitesse des vagues (en m/s).

c - coefficient en fonction de la pente du talus amont et du poids volumique de l'enrochement, il est donné sur le tableau suivant:

Pente du talus amont (m ₁)	Poids volumique des enrochements(en tf/m ³)		
	2,5	2,45	2,80
4/1	0,027	0,024	0,022
3/1	0,028	0,025	0,023
2/1	0,031	0,028	0,026
1,5/1	0,036	0,032	0,030
1/1	0,047	0,041	0,038

■ **Revêtement en pavage irrégulier.**



1 – Pierres de pavage, t = épaisseur

2- deux sous couches de matériaux filtrant.

3 - Corps du barrage.

Le pavage irrégulier peut être à une couche ou deux parfois il est placé dans des cages en béton armé. Son épaisseur (t) peut être déterminée par la formule de Chankine.

$$t = 1,7.h. \frac{\gamma_w}{\gamma_p - \gamma_w} \cdot \frac{\sqrt{1 + m_1}}{m_1 (m_1 + 2)} \quad \text{Ou} \quad t = n. \frac{P_0}{\gamma_p - \gamma_w} \sqrt{\frac{1 + m_1^2}{m_1^2}}$$

Avec : t- épaisseur du pavage (en m).

n= 1,2 à 1,5 (coefficient des pierres classées ou non).

P₀=0,178.h poids de la pierre qui résiste à l'action des vagues.

h- hauteur de vague.

γ_p, γ_w – poids volumique des pierres et de l'eau.

m₁- pente du talus amont.

Remarque :

Pavage à une couche: $t \leq 0,25$ m.

Pavage à deux couches : $t > 0,25$ m.

Le pavage doit être placé dans des cages en béton armé si $t > 0,50$ m.

■

Revêtement en dalles de béton armé.

Le revêtement du talus amont d'un barrage en terre peut se faire en dalles de béton armé préfabriquées ou coulées sur site.

Les dimensions des dalles en béton sont :

20 m sur 20 m avec une épaisseur de 0,12 à 0,50 m pour le béton coulé sur place.

1,5 m sur 1,5 m avec une épaisseur de 0,10 à 0,20 m pour le béton préfabriqué.

Il est aussi possible de calculer cette épaisseur par la formule empirique de Chankine.

$$t = 0,07 \cdot n \cdot h \cdot \frac{\gamma_w}{\sqrt[3]{\lambda \cdot \sqrt{m_1^2 + 1}}}$$

Avec : b- largeur des dalles carrés (en m).

n- coefficient (n=1,0 pour le béton coulé sur place et n=1,1 pour le béton préfabriqué).

h et λ hauteur et longueur de la vague (en m).

γ_b et γ_w – poids volumique du béton et de l'eau.

m_1 – pente du talus amont.

Les dalles préfabriquées peuvent être assemblées entre elles par des joints en béton et soudure des armatures, jusqu'à obtenir des dalles de 20m par 20 m.

4-3-2 Revêtement du talus aval.

Pour lutter contre les effets des agents érosifs (vent, ruissèlement d'eau de pluie et neige, etc...), on réalise un revêtement du talus aval en sol végétal avec une couche herbeuse qu'on arrose durant les saisons sèches. Parfois ce revêtement est réalisé en pierres surtout en

présence de l'eau à l'aval et dans les régions à climat rude où il est impossible de faire pousser de l'herbe.

5- Dispositifs de protection contre les effets de l'eau d'infiltration.

5-1 Introduction.

Le choix du site d'emplacement du barrage, la sélection des matériaux de construction et leur disposition se fait de sorte à limiter les infiltrations, mais la présence de la charge hydraulique à l'amont du remblai entraîne une infiltration d'eau à travers le barrage et ses fondations. Ces infiltrations peuvent nuire à la stabilité de l'ouvrage si des dispositifs de protection ne sont pas prévus. Ces dispositifs sont représentés par des filtres de transition, des drains et des organes d'étanchéité.

5-2 les drains.

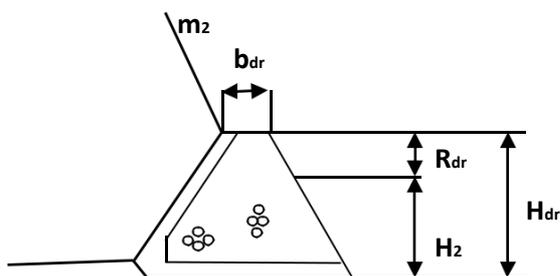
■ Définition.

Les drains sont constitués de pierres ou graviers perméables, parfois ils sont constitués par des tuyaux poreux en béton ou en plastique entourés de graviers.

■ Types de drains.

■ Prisme de drainage ou drain prisme.

Ce type de drainage est utilisé dans les cas de présence de l'eau à l'aval du barrage avec un niveau variable.



$H_{dr} = (0,15 \text{ à } 0,18) \cdot H_b$ – hauteur du drain prisme.

$b_{dr} = (0,5 \text{ m à } 3,0 \text{ m})$ - épaisseur en crête du drain prisme.

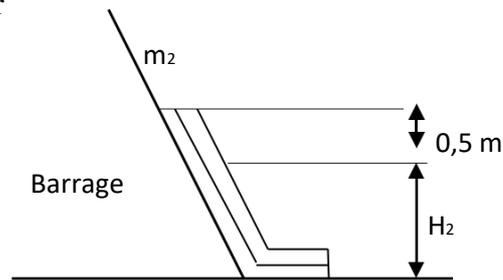
Pente aval du prisme = $(1,0 \text{ à } 1,5) \cdot m_2$

Pente amont du prisme = $(0,5 \text{ à } 2,0) \cdot m_2$

$R_{dr} = (0,5 \text{ m à } 1,0 \text{ m})$ au-dessus du niveau aval.

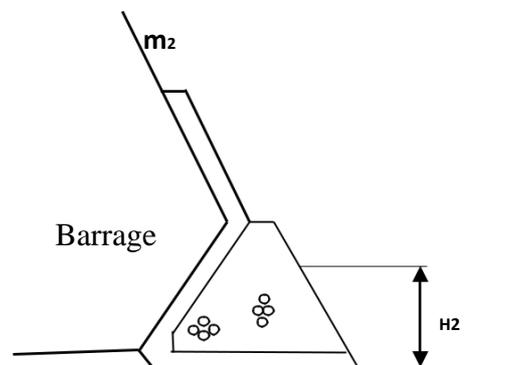
- **Drainage de surface.**

Ce type de drainage est constitué par des couches de filtres recouvertes par du gros gravier ou des enrochements placées sur la partie inférieure du talus amont. Ce dispositif protège le talus contre les infiltrations mais ne rabaisse pas la ligne de saturation.



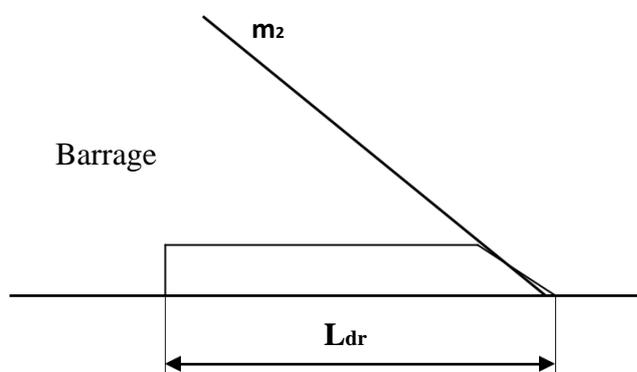
- **Prisme de drainage avec drainage de surface.**

Ce type de drainage est employé dans le cas où le niveau d'eau à l'aval n'est pas connu avec précision et il risque de monter pour une courte durée.



- **Tapis drainant ou drain prisme interne.**

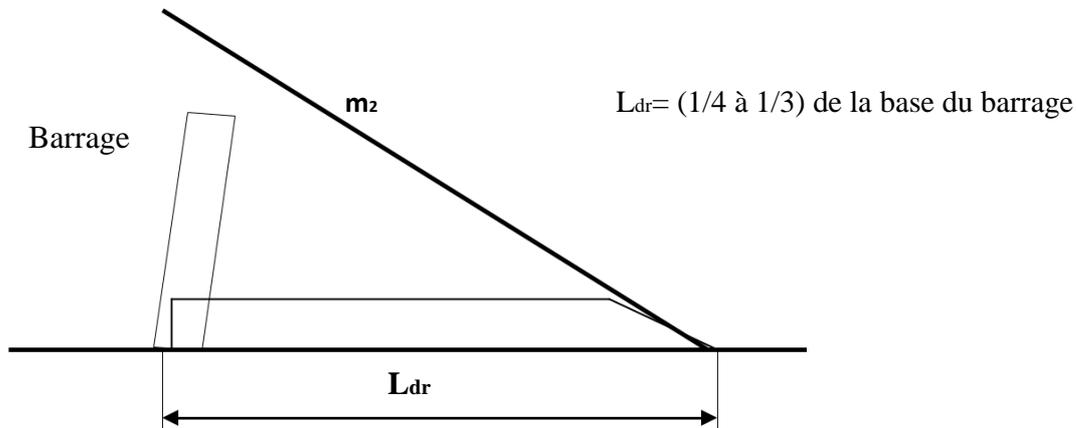
Ce type de drainage est employé dans le cas de l'absence de l'eau à l'aval du barrage, il rabaisse la ligne de saturation.



$$L_{dr} = (1/4 \text{ à } 1/3) \text{ de la base du barrage}$$

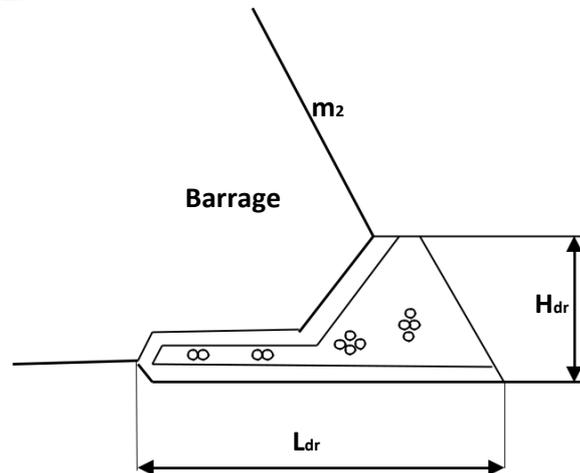
■ Drain incliné avec tapis drainant.

Ce type de drainage est employé lorsqu'il y a un risque d'apparition des eaux d'infiltration sur le talus aval.



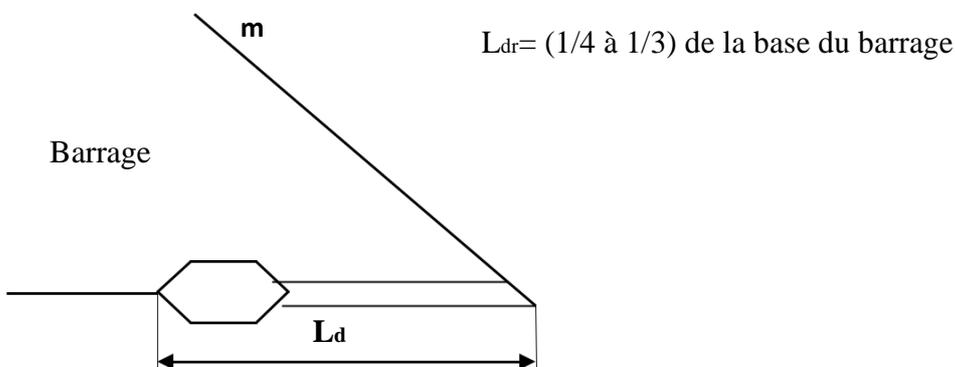
■ Prisme de drainage avec tapis drainant.

Ce dispositif est employé en présence de l'eau à l'aval du barrage et quand il est nécessaire d'abaisser la ligne de saturation et de drainer les fondations.



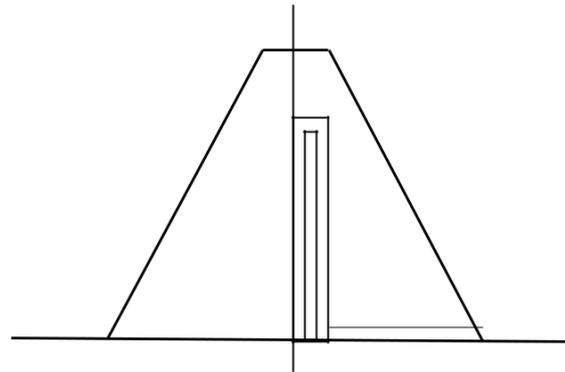
■ Drainage à bandes.

Ce type de drainage est dérivé du tapis drainant, où sa partie aval est remplacée par des bandes discontinues ou par des tuyaux d'évacuation, il est employé quand la quantité des enrochements est insuffisante.



■ Drain vertical ou cheminée.

Le drain vertical est employé lorsque le matériau du barrage est fortement argileux et que la perméabilité horizontale est plus importante que celle verticale est donc il y a un risque d'apparitions des eaux d'infiltration sur le talus aval. Il est placé à l'aval de l'axe passant par le milieu de la crête du barrage, sa largeur doit être dimensionnée pour évacuer le débit d'infiltration.



5-3 Les filtres.

• Définition.

Les filtres sont constitués de couches de matériaux perméables de granulométrie de plus en plus fine pour assurer la transition entre des matériaux à granulométries différentes.

• Choix des matériaux des filtres.

Un filtre doit répondre aux conditions de non altération par l'action de l'eau, en outre, il doit être constitué par un matériau insoluble dans l'eau et ne doit pas se dégrader par entraînement de ses éléments par le courant de l'eau ni se colmater.

Pour cela il est conseillé d'utiliser du sable dont le coefficient d'uniformité vérifie la condition suivante :

$$\frac{D_{60}}{D_{10}} < 2$$

De même que d'après Terzaghi qui a fait des essais sur le sujet conseille de respecter les conditions suivantes.

Granulométrie étroite.

$$5 < \frac{D_{50(\text{Filtre})}}{D_{50(\text{Matériau à protéger})}} < 10$$

Granulométrie étendue.

$$\frac{D_{15(\text{Filtre})}}{D_{85(\text{Matériau à protéger})}} < 5 \text{ et } \frac{D_{15(\text{Filtre})}}{D_{15(\text{Matériau à protéger})}} > 5$$

- **Epaisseur du Filtre.**

L'épaisseur de chaque couche de filtre doit être d'au moins 20 cm, mais elle doit être dans tous les cas supérieure à 50 fois le diamètre D_{15} .

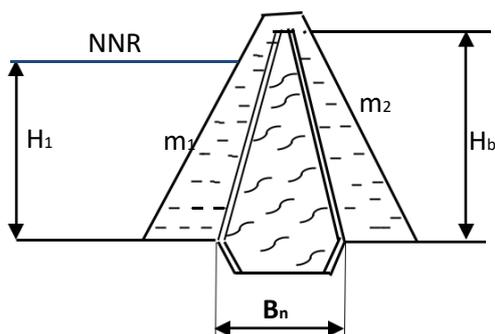
Lorsqu'une couche de filtre sert de drain, elle doit être vérifiée pour évacuer un débit d'une fois et demi celui des fuites.

5-4 Organes d'étanchéité.

- **Introduction.**

Généralement le matériau utilisé pour la réalisation du barrage n'assure pas l'étanchéité requise pour empêcher de grandes pertes d'eau par infiltrations, aussi il est indispensable de prévoir des organes d'étanchéité spéciaux.

- **Noyau en argile compacté.**

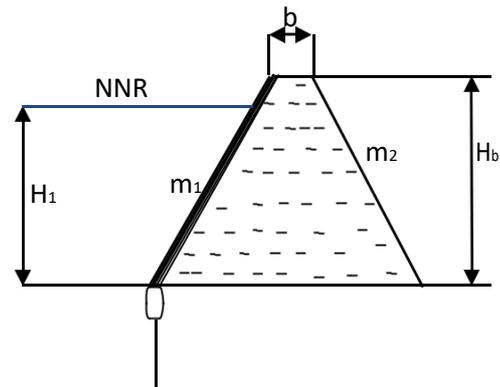


- Le noyau doit avoir une épaisseur minimale.
 $E_{p_{\min}} = 1/6 \cdot H_b \geq 2,0 \text{ m}$.
- $B_n = 6 + c \cdot H_b$ (c- coefficient en fonction de la qualité du matériau).
- On doit également vérifier l'inégalité.
 $0,8 \cdot H_b \leq B_n \leq 1,2 \cdot H_b$
- on doit toujours vérifier que le gradient hydraulique dans le noyau est admissible.

Un noyau en argile compactée peut être vertical ou incliné à l'amont du barrage, pour la protection de ce noyau d'argile, on doit disposer de chaque côté des filtres de transition.

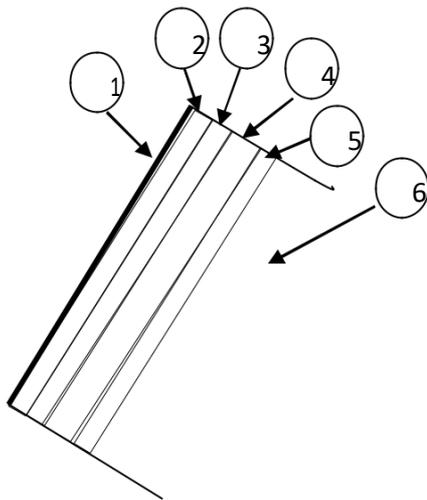
- **Masque amont en béton de ciment.**

C'est le type de masque le plus ancien, il peut être armé ou non. Il présente l'inconvénient d'être rigide et suit très mal la souplesse du matériau en terre, aussi il n'est pratiquement plus utilisé pour le barrage en terre. Il est plus adapté au barrage en enrochements.



- **Masque amont en béton bitumineux.**

Ce type de masque s'adapte très bien comme organe d'étanchéité des barrages en terre grâce à sa souplesse et sa plasticité, il peut ainsi suivre les déformations du corps du barrage sans se fissurer ni s'altérer. Néanmoins ce type de masque nécessite une protection contre les agents agressifs externes qui accélèrent son vieillissement.



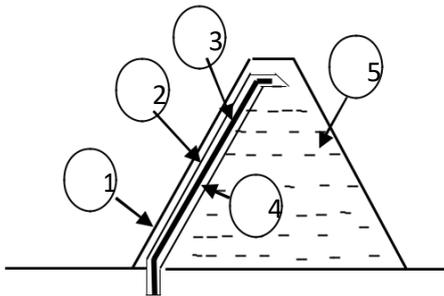
- 1- peinture de protection.
- 2- Béton bitumineux.
- 3- Béton bitumineux.
- 4- Couche drainante.
- 5- Couche de filtre.
- 6- Corps du barrage.

- **Masque amont en membranes souple.**

Ce type de masque présente l'avantage de s'accommoder des déformations du massif mais il présente l'inconvénient d'être sensible aux chocs, poinçonnements et aux poussées des racines de plantes qui peuvent facilement le déchirer. En pratique nous avons deux types de ce masque.

- **Masque en butyle caoutchouc:**

C'est un caoutchouc synthétique qui se présente sous forme de feuilles avec des épaisseurs variables (1,0mm, 1,5mm et 2,0 mm) et en rouleaux (largeur= 1,8 m et longueur= 20 à 50 m).



- 1- Enrochements.
- 2- Sable de protection.
- 3- Etanchéité butyle.
- 4- Filtre de transition.
- 5- Corps du barrage.

- **Masque en Membrane de bitume enterrée.**

Le bitume est répandu à chaud sur le talus en plusieurs couches, renforcé par des armatures de tissus en verre ou feutre synthétique et la membrane ainsi formée est protégée par des matériaux terreux ou de sable.

5-5 Etanchéité des fondations.

Lorsque les fondations du barrage sont imperméables, il suffit d'assurer une bonne liaison entre le massif et sa fondation par une tranchée d'ancrage (en argile, béton etc.....).

Si les fondations sont perméables, leur étanchéité se fait de deux manières:

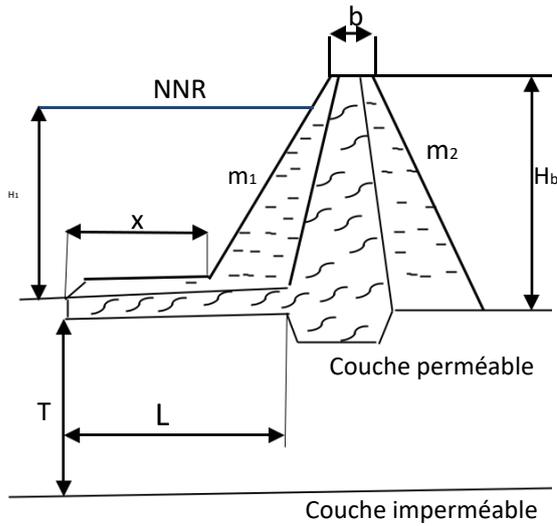
- **Un écran vertical**

Il est en fonction de la profondeur du substratum imperméable et il peut être réalisé sous forme de tranchée en matériau argileux compacté, exécution d'une paroi moulée, d'un rideau de palplanches ou de coupure par injection.

- **Tapis étanche.**

Il est prévu dans le cas où le substratum imperméable se trouve à une grande profondeur

Il est constitué d'une couche en argile compacté avec une épaisseur (ép.) minimale de 0,6 mètres.



$$\text{ép.}_{\text{Tapis}} = x \cdot \frac{L}{T} \cdot \frac{K_{\text{Tapis}}}{K_{\text{fondations}}}$$

Avec : K_{Tapis} et $K_{\text{Fondations}}$

– perméabilité du tapis et des fondations.