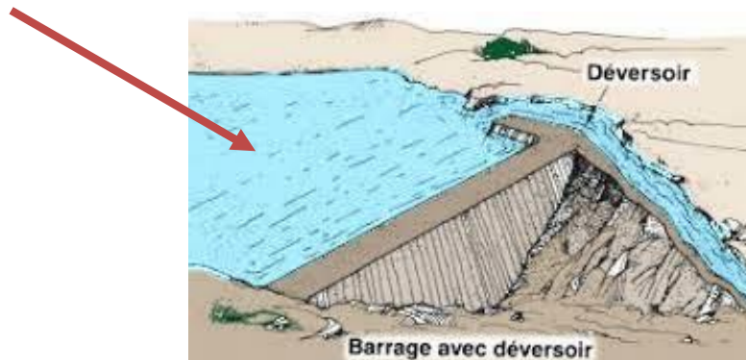


Partie II : Calcul de la capacité de la retenue (p11 -22)

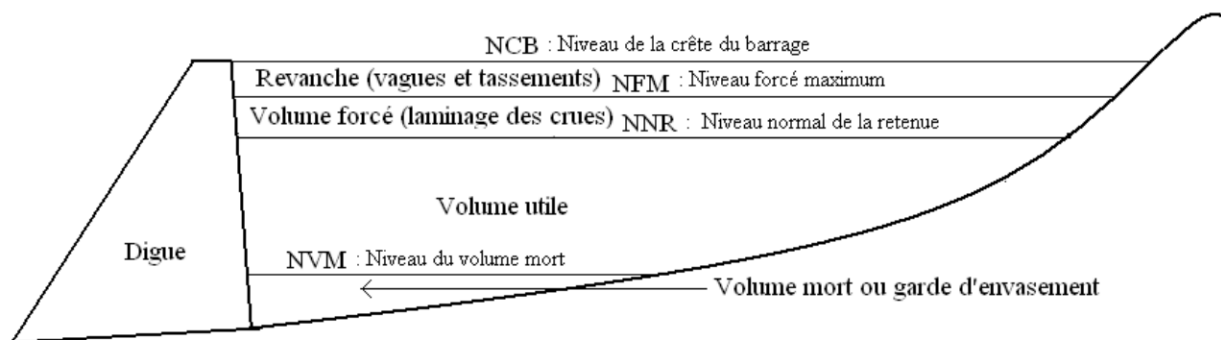
DEUXIEME PARTIE :

CALCUL DE LA CAPACITE DE LA RETENUE DU BARRAGE



I. Répartition des volumes dans le réservoir

Le volume d'un barrage se décompose en quatre parties, qui jouent chacune un rôle spécifique et permettent ainsi le fonctionnement optimal de l'infrastructure.



Décomposition du volume d'un barrage

Le volume mort dont le rôle est d'emmagasinier les sédiments charriés par l'oued tout au long de la durée de vie du barrage. On a appris à calculer ce volume précédemment.

Le volume utile qui sert à stocker les eaux pour les restituer lorsque la demande en eau se manifeste. On a appris à calculer ce volume précédemment en élaborant une étude de régularisation.

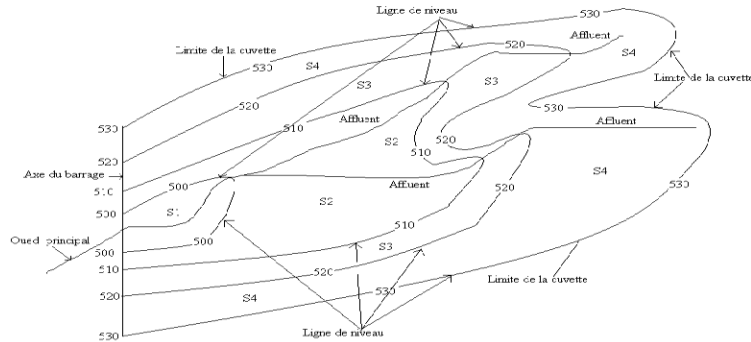
Le volume forcé qui permet de laminier les crues en diminuant leur débit de pointe à une valeur acceptable par l'évacuateur de crues et éviter ainsi la submersion de la digue, ce qui entraînerait sa destruction avec de graves conséquences sur la digue et les personnes et les biens situés à l'aval du barrage. On a appris à calculer ce volume précédemment grâce à l'étude de laminage des crues.

La revanche dont le rôle est d'éviter que des vagues éventuelles dans la cuvette n'entraînent au débordement par-dessus la digue. Cette revanche permet aussi de tenir compte des tassements éventuels de la fondation du barrage qui entraîneraient à une

Partie II : Calcul de la capacité de la retenue (p11 -22)

élévation du niveau de l'eau au-dessus de la crête du barrage.

II. Les courbes caractéristiques de la retenue : sur plan topographique



Un plan topographique de la **cuvette** (retenue) au 1/5.000^{ème} (parfois le 1/10.000^{ème}) est suffisant. Il permettra d'établir la courbe hauteur surface capacité de la retenue qui sera nécessaire à l'établissement de **l'étude de régularisation du barrage**.

A l'aide d'un **planimètre** on mesure les **surfaces planes S₁, S₂, S₃, S₄** de chaque ligne de niveau et l'on porte sur un graphe en abscisses les surfaces et en ordonnées les hauteurs ou altitudes correspondantes, et ainsi l'on obtient **la courbe Hauteur-Surface**.

Pour tracer la courbe **Hauteur-Volume**, on commence par calculer les volumes partiels ΔV_i compris entre les lignes de niveau H_{i-1} et H_i , il est donné par l'expression suivante :

$$\Delta V_i = \frac{(S_{i-1} + S_i)}{2} \times (H_i - H_{i-1})$$

où S_i = surface par la ligne de niveau H_i .

Le volume initial V_1 compris entre le fond de l'oued et la ligne de niveau H_1 est considéré comme étant égal à $V_1 = \frac{2 \times S_1}{3} \times H_1$. La courbe Hauteur-Volume est obtenue en portant en abscisses les volumes et en ordonnées les hauteurs.

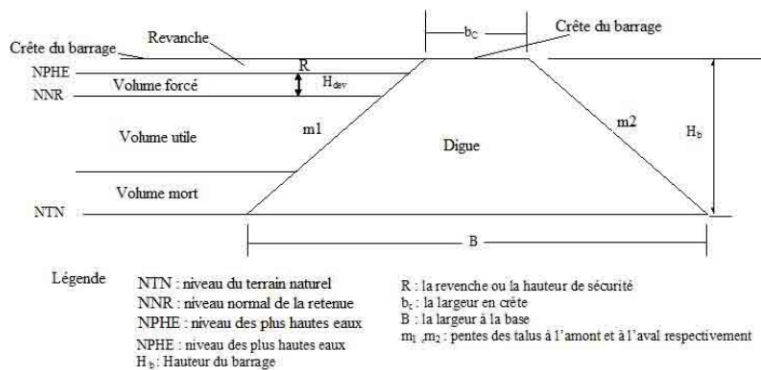


Schéma simplifié d'une digue de barrage

III. Calcul du volume mort ou garde d'envasement :

Partie II : Calcul de la capacité de la retenue (p11 -22)

Les infrastructures hydrauliques perdent chaque année une partie de leur volume en raison de leur envasement. Cet envasement est dû à l'érosion des bassins versants et constitue la source principale de la réduction de la capacité des réservoirs. La connaissance des transports solides permet de déterminer la garde d'envasement (volume mort).

Le volume de la garde d'envasement est aussi fonction de la durée de vie du barrage, qui, elle, est déterminée sur les bases de données économiques.

Le taux d'abrasion est défini comme la quantité de terre arrachée au sol par les pluies et exprimée en t/km²/an

Il dépend de :

Nature du relief, Végétation, Géologie des sols, activités agricoles sur des terrains fragiles et érodables, Hydrologie du BV.....

Les formules empiriques suivantes sont souvent utilisées pour calculer le taux d'abrasion :

1. Formule de Tixeront

Cette formule est applicable à des bassins versants de 90 à 22 300 km². Elle donne l'apport solide en fonction de la lame ruisselée et de la perméabilité du bassin

$$T_a = \alpha \times L_r^{0,15}$$

Ta : taux d'abrasion (t/km²/an) qui représente l'apport solide spécifique moyen annuel des matières solides en suspension

L_r : Lame d'eau ruisselée moyenne en (mm),

α : Caractéristique de la perméabilité moyenne du bassin versant dont les valeurs sont indiquées dans le tableau ci-dessous

| Perméabilité | α |
|--------------------|----------|
| Elevée | 8,5 |
| Moyennement élevée | 75 |
| Faible à moyenne | 350 |
| Très faible | 1400 |
| imperméable | 3200 |

Valeurs du coefficient α pour différentes valeurs de perméabilité.

2. Formule de Fournier :

Cette formule a été développée sous un climat tempéré et ne donne en général pas de résultats satisfaisants pour notre climat.

$$T_a = \frac{1}{36} \times \left\{ \frac{\bar{P}_{\max - \text{mens}}}{\bar{P}_{\text{ann}}} \right\}^{2,65} \times \left\{ \frac{n^2}{S} \right\}^{0,46}$$

Avec : - $\bar{P}_{\max - \text{mens}}$: précipitation mensuelle du mois le plus pluvieux,

Partie II : Calcul de la capacité de la retenue (p11 -22)

\bar{P}_{ann} : Précipitation moyenne annuelle,

n : 45% de la différence entre les altitudes maximale et minimale du bassin versant en m.

Le volume mort :

Le volume mort ou garde d'envasement est destiné à stocker les matériaux en suspension et charrié qui se déposent au fond de la cuvette. Il peut être calculé :

$$V_m = \frac{T_a \cdot T \cdot S}{\gamma_s}$$

T_a : Taux d'abrasion en (t/km²/an)

T : période d'envasement en (an) (durée d'amortissement)

S : superficie du bassin versant en (km²)

γ_s : Poids spécifique moyen des sédiments en (t/m³)

Rem Ici B=100%

IV. Calcul du volume utile

Le volume utile est le résultat d'une étude de régularisation. La régularisation comme son nom l'indique permet de rendre régulier le débit d'un oued qui, à l'origine, est irrégulier.

Le volume utile est le volume nécessaire pour réguler les débits, c'est à dire pour stocker les excédents et satisfaire au mieux les besoins avec une défaillance acceptable. La régularisation est une opération d'optimisation du volume utile .Cette optimisation s'opère en fonction de plusieurs variables qui sont :

les apports, la demande, les pertes (évaporation et infiltration), la pluie sur le réservoir, et la configuration géométrique du réservoir.

Il existe deux **types de régularisation** :

- **La régularisation saisonnière** : la retenue est destinée uniquement à l'utilisation des eaux de l'année en cours
- **La régularisation historique.**

Régularisation saisonnière : calcul du volume Vutil

- **Principe de calcul :**

Le calcul de la régularisation saisonnière se fait sur une année moyenne, comme suite :

- **1^{er} mois :**

Ap^1 : apport du 1^{er} mois

$$V^1_{evap} = h^1_{evap} \cdot S^1_{plan \text{ d'eau}}$$

$$V^1_{inf} = V^1_{evap} \cdot 1 \%$$

$$V^1_{besoin} = M^1\% * V_{régularisé} \quad V_{régularisé} = \frac{\tau}{100} \sum Ap \quad \frac{\tau}{100} \text{ est un T de régularisation}$$

$$V^1_{résiduel} = V_{mort} + V^1_{rest}$$

$$V^1_{rest} = Ap^1 - V^1_c \quad V^1_c = (V_{inf} + V_{evp} + V_b)^1$$

Partie II : Calcul de la capacité de la retenue (p11 -22)

- **2^{er} mois :**

Ap^2 : apport du 2^{er} mois

$$V_{evp} = h_{2evp} \cdot S_2$$

$$V_{inf} = V_{evp} \cdot 1 \%$$

$$V_{resid}^2 = V_{resid}^1 + V_{rest}^2$$

$$V_{rest}^2 = Ap^2 - (V_{inf} + V_{evp} + V_b)^2$$

.....généralisation

Ap_i : apport du i^{me} mois

$$V_{evp} = h_{ievp} \cdot S_i$$

$$V_{inf} = V_{evp} \cdot 1 \%$$

$$V_{resid} = V_m + V_{rest}$$

$$V_{rest} = Ap_i - (V_{inf} + V_{evp} + V_b)$$

$$V_b = M/100 \cdot V_{reg}$$

$$V_{reg} = \frac{\tau}{100} \sum_{i=1}^{12} Ap_i$$

Le calcul avec des différents τ .

$$V_{tot} = \text{Max } V_{resid}$$

$$V_{util} = V_{tot} - V_m$$

Tableau de régularisation : **Pour $\tau = \%$**

| mois | App (hm ³) | App cum (hm ³) | surfaces (m ²) | h Eva(m) | vol Eva (hm ³) | vol inf. (hm ³) | Modulation (%) | vol reg (hm ³) | vol besoin (hm ³) | vol conso (hm ³) | vol reste (hm ³) | vol résidu (hm ³) |
|------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | |

Le dimensionnement de la retenue à partir de l'étude de régularisation saisonnière optimale, doit donner les résultats suivants :

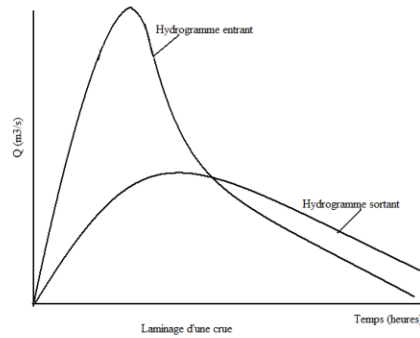
- Volume régularisé = hm³
- Volume mort = hm³
- Volume total = maximum volume résiduel = hm³
- Volume utile = volume total – volume mort = hm³
- Le niveau du terrain naturel NTN = m
- Le niveau du volume mort NVM = m
- Le niveau normal de la retenue NNR= m

V. Calcul du volume forcé par le laminage des crues (et dimensionnement économique du déversoir) :

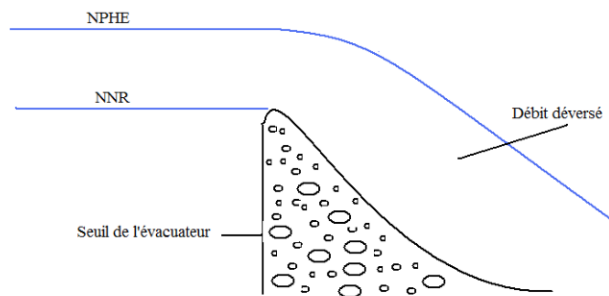
Les évacuateurs de crues sont des organes essentiels d'un barrage de stockage. Ils sont destinés à laisser passer les eaux excédentaires d'une crue qui ne peuvent être stockées dans la retenue.

Les eaux excédentaires sont déversées à partir de la surface du réservoir et amenées à travers un ouvrage d'évacuation vers l'oued en aval du barrage.

Partie II : Calcul de la capacité de la retenue (p11 -22)

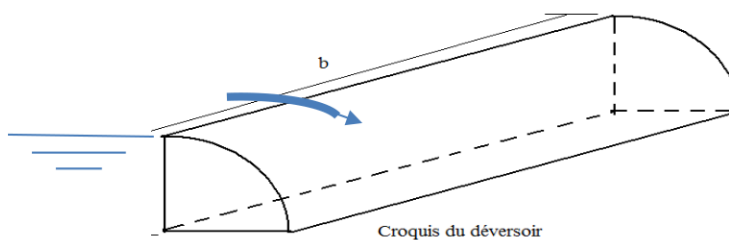


Le laminage permet de déterminer l'hydrogramme de sortie (laminé). Il permet de connaître aussi le niveau le plus haut atteint par les eaux (NPHE) dans la retenue lors de la crue : ce niveau sera la hauteur d'eau maximale au-dessus du seuil de l'évacuateur (NNR).



Le laminage d'une crue est fonction de la forme de l'hydrogramme de crue entrant dans le réservoir, de la capacité d'évacuation du déversoir de crue et de la forme de la retenue.

L'étude de laminage de crue consiste à déterminer la côte maximale atteinte par le plan d'eau pendant la crue pour des dimensions **économiques** de l'évacuateur de crues et de la digue afin d'aboutir à une sécurité optimale (pas de débordement par-dessus la digue).



Étude du laminage de crue :

Parmi tous les risques d'accidents qui menacent l'existence des barrages en matériaux locaux, la submersion de la digue est la plus dangereuse. Ce phénomène cause une rupture rapide du barrage qui due aux crues dépassent la capacité d'évacuateur des crue. On appelle laminage d'une crue, la diminution du débit de pointe de son

Partie II : Calcul de la capacité de la retenue (p11 -22)

hydrogramme par des moyens naturels ou artificiels. Le mécanisme du laminage se traduit par l'équation suivante : $\frac{\Delta S}{\Delta t} = I_{moy} - Q_{moy}$

I_{moy} : Inflow (débit de crue entrant dans la retenue).

Q_{moy} : Outflow (débit de crue sortant déverser).

ΔS : Stockage (volume stocké dans la retenue pendant un intervalle de temps Δt).

Pendant le temps Δt , et selon l'équation précédente, le volume de la crue entrant peut s'écrire sous la forme :

$$V_{aff\ moy} + \left[V(H) - \frac{V_{dev}}{2} \right] = \left[V(H) + \frac{V_{dev}}{2} \right]$$

$V(H)$: courbe caractéristique capacité –hauteur au-dessus du NNR.

V_{dev} : Volume déversé par le déversoir.

$V_{aff\ moy}$: Volume de la crue entrant dans la retenue.

Cette étude permet de déterminer, la cote maximale du plan d'eau, ainsi que le dimensionnement optimum de l'évacuateur de crue

Calcul du volume déversé : $Q_{deversé} = mb\sqrt{2g} \times h^{3/2}$

où m = coefficient de Creager = 0,495

b = longueur du déversoir,

g = accélération de la pesanteur = 9,81,

h = hauteur d'eau déversée au-dessus du seuil du déversoir.

Calcul Hydrogramme de crue entrant :

Hydrogramme de Sokolovsky (crue théorique)

La méthode de Sokolovsky divise l'hydrogramme en deux parties non symétriques, dont l'une est calculée à partir du temps de montée et l'autre à partir du temps de la décrue.

la crue (montée) : $Q_m = Q_{max} \cdot \left(\frac{t}{t_m} \right)^2 \quad 0 \leq t \leq t_m$

la décrue (descente) : $Q_d = Q_{max} \cdot \left(\frac{t_d - t}{t_d} \right)^3 \quad 0 \leq t \leq t_d$

Les débits de crues doivent être transformés en volume de crue.

Il existe plusieurs méthodes pour le calcul de laminage, nous citons :

- ✓ Méthode de KOTCHERINE.
- ✓ Méthode graphique.
- ✓ Méthode de HINDENBLAT.

Méthode graphique : Principe de la méthode

Le laminage des crues consiste à déterminer :

- Débit déverser, « Q_{dev} ».
- Hauteur d'eau observée « H_{dev} » pour la crue de projet (mille ans)
- Pour cela, la méthode de calcul est subdivisée en deux étapes, représentées sous forme de deux organigrammes.

Partie II : Calcul de la capacité de la retenue (p11 -22)

$$\left[V(H) - \frac{V_{dev}}{2} \right], \left[V(H) + \frac{V_{dev}}{2} \right]$$

b : Largeur du déversoir proposé H : hauteur déversant au-dessus de NNR

m : coefficient de débit, m=

Q_{dev} : Débit déversé (m³/s).

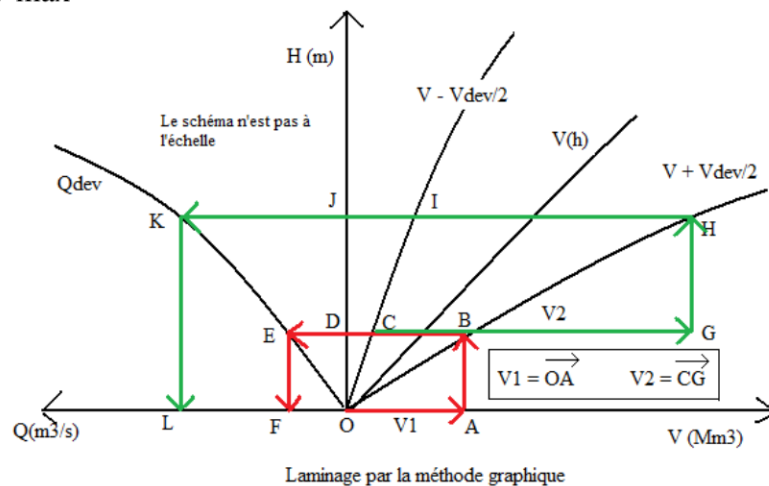
V_{dev} : Volume déversé, (Hm³)

Le débit déversé est calculé sur (Δt)

Méthode de calcul de laminage de crue : méthode graphique :

Tableaux de calcul à préparer pour une largeur du déversoir : b

- Courbe caractéristique V(H) à partir du NNR
- V_{crue} moyen à partir de l'hydrogramme de crue de projet (crue entrant)
 $V_{crue\ moy} = (Q_1 + Q_2)/2 * \Delta t$
- Débit déversé par l'évacuateur de crue : on propose une largeur du déversoir $b = b_1$
- Tracer les graphes
- Calculer $h_{dev\ max}$



Résultats de l'étude de laminage :

| | | | | | | | | | |
|--|----|----|----|--|--|--|--|--|--|
| Largeur du déversoir (m) b | b1 | b2 | b3 | | | | | | |
| Hauteur d'eau max déversée (m) | | | | | | | | | |
| Q déversé max (m ³ /s) déversée (laminée) | | | | | | | | | |

ETUDE D'OPTIMISATION : Le but de l'étude d'optimisation est de déterminer la largeur optimale de l'évacuateur de crue correspondante à la hauteur optimale de la digue, afin d'obtenir le devis le plus économique de l'aménagement.

Le calcul économique consiste à déterminer le cout de l'évacuateur de crues et celui de la digue pour différentes longueur déversant au-dessus du déversoir b.

Partie II : Calcul de la capacité de la retenue (p11 -22)

- I. **Calcul du cout de la digue** : Dimensionnement de la digue
- II. **Calcul du cout de l'évacuateur** : Dimensionnement de l'évacuateur de crues

A. Dimensionnement de la digue (calcul du **volume de terre**)

1) Calcul de la hauteur : $H_b = H_{mort} + H_{util} + H_{dev} + \text{Revanche} + \text{Tassement}$

- Calcul de la revanche : R

C'est la hauteur comprise entre la côte des plus hautes eaux et la côte de couronnement du barrage.

En effet, c'est **une hauteur de sécurité** qui protège l'ouvrage contre les élévations du niveau d'eau dues aux vagues qui pourraient causer des submersions.

De nombreuses formules empiriques sont proposées pour le calcul de la revanche, en tenant compte du danger que représente le déferlement des vagues soulevées par le vent soufflant en tempête ;

a) Formule simplifiée : $R = 1 + 0.3\sqrt{F}$

Où F (Fetch) est la distance entre le barrage et le point le plus éloignée dans la cuvette du barrage dans la direction du vent.

b) Formule de DAVIS: $R = 0.75h_v + \frac{v^2}{2g}$

h_v : la hauteur des vagues estimée à l'aide de formule empirique en (m)

V : étant la vitesse des vagues (m/s)

g : accélération de la pesanteur (m/s^2)

Pour le calcul de la hauteur et de la vitesse des vagues on utilise les formules empiriques suivantes :

Hauteur des vagues :

- **Formule de Stevenson :**

$$h_v = 0.75 + 0.34\sqrt{F} - 0.26\sqrt[4]{F} \quad (F < 18km \quad \text{et} \quad u < 100km/h)$$

- **Formule de Mallet et Pacquant:** $h_v = 0.5 + \frac{1}{3}\sqrt{F}$

Vitesse des vagues : Formule de Gaillard : $V = 1.5 + 2h_v$

Largeur à la crête du barrage :

Partie II : Calcul de la capacité de la retenue (p11 -22)

Calcul par Formules empiriques

Formule de Knappen : $b_c = 1,65 \cdot \sqrt{H_b}$

Formule de Preece: $b_c = 1,1 \sqrt{H_b} + 1$

Formule simplifiée: $b_c = 3,6 \sqrt[3]{H_b} - 3$

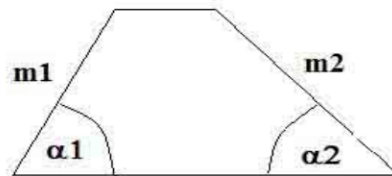
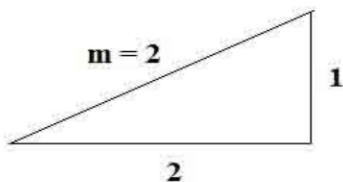
Formule de recherche: $b_c = \frac{1}{5} H_b + 3$



Il est recommandé d'utiliser la formule de Knappen qui donne des résultats plus conservateurs que la formule de Preece dans les régions à forte sismicité.

Pentes de talus :

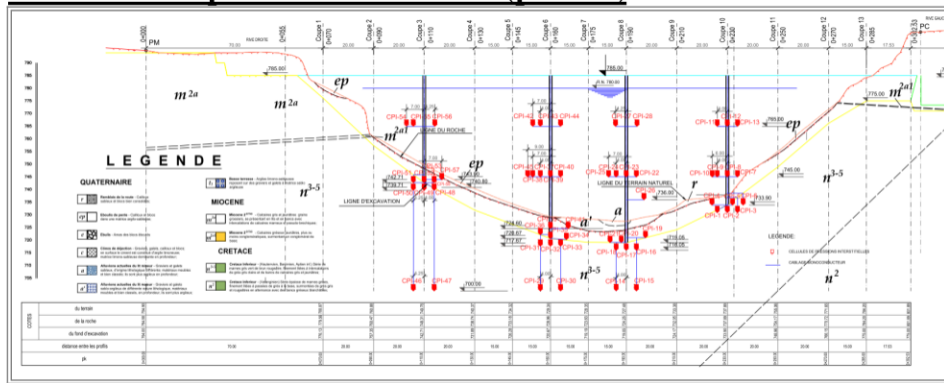
| Hauteur de digue | Type de digue | Pentes des talus | |
|------------------|--------------------------------------|------------------|---------|
| | | Amont m1 | Aval m2 |
| 3 à 5 m | homogène | 2,5 / 1 | 2 / 1 |
| | zonée | 2 / 1 | 2 / 1 |
| 5 à 10 m | Homogène à granulométrie étendue | 2 / 1 | 2 / 1 |
| | Homogène à fort pourcentage d'argile | 2,5 / 1 | 2 / 1 |
| | zonée | 2 / 1 | 2 / 1 |
| 10 à 20 | Homogène à granulométrie étendue | 2,5 / 1 | 2 / 1 |
| | Homogène à fort pourcentage d'argile | 3 / 1 | 2,5 / 1 |
| | zonée | 2,5 / 1 | 2,5 / 1 |
| > 20 m | Homogène à granulométrie étendue | 3 / 1 | 2,5 / 1 |
| | Homogène à fort pourcentage d'argile | 3,5 / 1 | 2,5 / 1 |
| | zonée | 3 / 1 | 3 / 1 |



$m1 = \cotg \alpha1$ et $m2 = \cotg \alpha2$

Calcul du volume de remblais : volume de terre

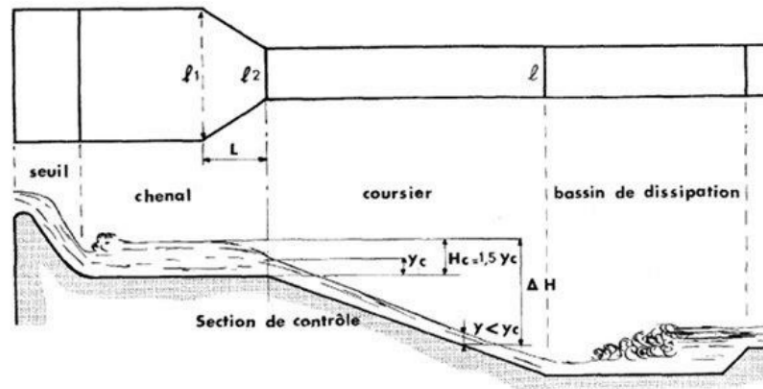
Partie II : Calcul de la capacité de la retenue (p11 -22)



Coupe longitudinale dans l'axe du barrage (exemple)

B. Dimensionnement de l'évacuateur de crues (calcul du volume de béton)

Volume de béton : Exemple d'une coupe en long pour le calcul du **Volume de béton** pour l'évacuateur de crue (dont le déversoir est $b=...$)



Calcul d'optimisation : choix de la largeur optimale du déversoir : tableau récapitulatif (digue et évacuateur de crues)

[illegible]

Le but de l'étude d'optimisation est de déterminer **la largeur optimale** de l'évacuateur de crue correspondante à la hauteur optimale de la digue, afin d'obtenir le devis le plus

Partie II : Calcul de la capacité de la retenue (p11 -22)

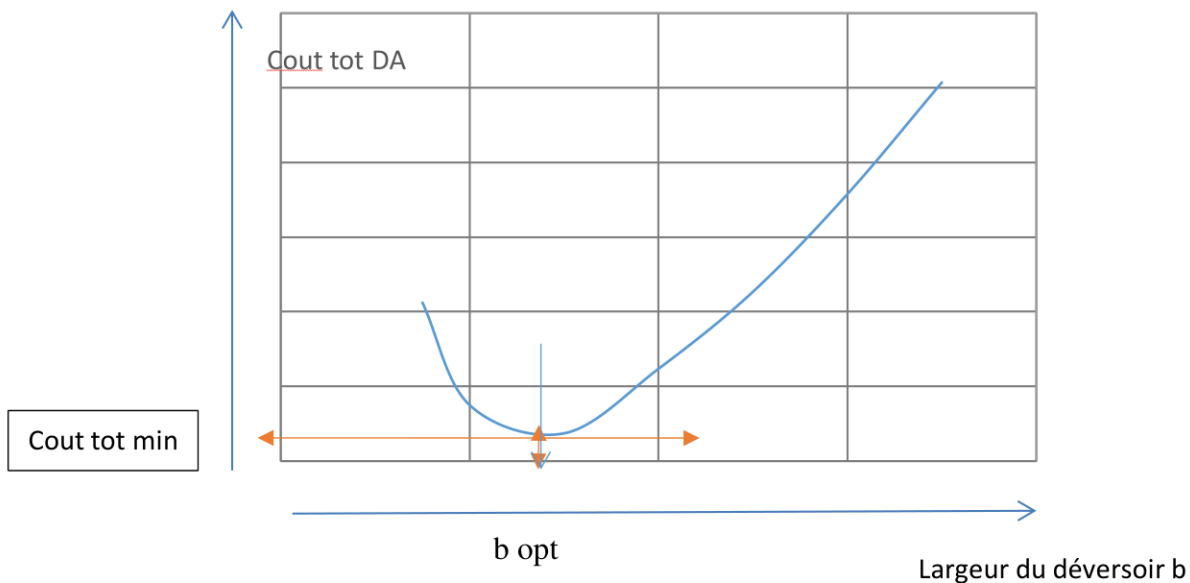
ECONOMIQUE et le plus SECURITAIRE de l'aménagement.

Le calcul **économique** consiste à déterminer le cout de l'évacuateur de crues et celui de la digue pour différentes longueurs déversant au-dessus du déversoir.

La largeur optimale du déversoir est celle qui permet le coût de l'aménagement (barrage + évacuateur) le plus bas

Tracé la courbe en cloche.

COUT (BARRAGE + EVACUATEUR DE CRUES) = $f(b)$ b EST LA LARGEUR DU DÉVERSOIR



Pour cette valeur de b_{opt} il est nécessaire de déterminer la hauteur max déversé et l'hydrogramme de crue laminée.