

## **Module N°5 : Aménagements hydrauliques**

### **Chapitres :**

- 1) Généralités sur les barrages**
- 2) Généralités sur les ouvrages annexes des barrages**
- 3) Les centrales hydroélectriques**

## **Généralités sur les barrages**

### **I) Introduction :**

Un Barrage est un ouvrage qu'on construit sur un fleuve au droit d'un site favorable et présentant les conditions et critères requis. Les rôles à jouer par un barrage sont multiples :

- ❖ Stockage de l'eau pour utilisation dans l'agriculture ou l'alimentation en eau potable.
- ❖ Production de l'énergie électrique (centrales hydroélectriques).
- ❖ Régularisation du débit du fleuve et protection contre les crues et inondations dévastatrices.

Le volume retenu par un grand barrage peut aller jusqu'à des centaines de Millions de  $m^3$ , pour un petit barrage type- barrage collinaire- la capacité de rétention peut aller jusqu'à un million de mètre cube.

### **II) Choix du site d'un barrage :**

Le choix d'un site de barrage doit tenir compte de plusieurs facteurs :

#### **II.1) les apports d'eau en amont :**

Le volume de la retenue est un facteur prépondérant puisqu'il va conditionner les usages et besoins en eau. Dans une première phase, il faut inventorier plusieurs sites et calculer le volume de la cuvette en adoptant une échelle appropriée (1/25 000 par exemple).

#### **II.2) la morphologie de la vallée :**

Il faut que la topographie au niveau du site et à sa partie amont permettent l'emmagasinement de l'eau tout en permettant aux appuis du barrage d'être solides et résistants vis à vis des glissements ou éboulements de terrains.

#### **II.3) la géologie du site :**

La nature des roches de couverture et de fondations est déterminante, notamment en ce qui concerne la perméabilité, la fracturation, le pendage ainsi que l'épaisseur. En effet, l'étanchéité doit être quasi parfaite aussi bien à l'état naturel ou artificiel (injections pour colmatage de fissures, diaclases..). il y a lieu de s'intéresser également à la lithologie du bassin versant amont et notamment vis-à-vis des problèmes d'envasement. (Remplissage de la retenue par des sédiments provenant du lessivage des eaux de crues).

#### **II.4) disponibilité de matériaux :**

La nature ainsi que la quantité des matériaux au droit ou aux alentours du site (alluvions, agrégats, limons, argiles) conditionne le type de barrage à concevoir ainsi que le coût de

l'ouvrage. Si on arrive par exemple à extraire les matériaux au droit même de la retenue, ceci augmenterait la capacité de stockage et minimise la remise en état des zones d'emprunt.

#### II.5) le régime hydrologique :

Il s'agit principalement des crues fortes et dévastatrices qu'il y a lieu de détourner lors de la réalisation des travaux.

#### II.6) critères économiques :

Une fois que la ou les conceptions techniques du barrage sont arrêtées, il faut procéder à une évaluation économique afin de comparer les coûts aux besoins et buts recherchés à travers la construction de l'ouvrage.

#### II.7) impact de l'ouvrage sur l'environnement :

De telles études sont de plus en plus nécessaires et afin de permettre au barrage de s'intégrer dans son environnement aussi bien naturel que social.

### III) Classification générale des barrages :

On peut distinguer deux grandes classes de barrages en fonction de la nature des matériaux :

- 1) les barrages rigides : ouvrages en maçonnerie ou en béton.
- 2) Les barrages souples : ouvrages réalisés en matériaux meubles, terre et enrochements.

En prenant comme critère la taille du barrage (hauteur sur fondation et capacité de la retenue), on distingue trois types de barrages :

- 1) grands barrages :  $H > 15$  m.
- 2) barrages collinaires  $H < 15$  m et  $100000 < V < 1 \text{Mm}^3$
- 3) lacs collinaires :  $5 \text{m} < H < 8 \text{m}$

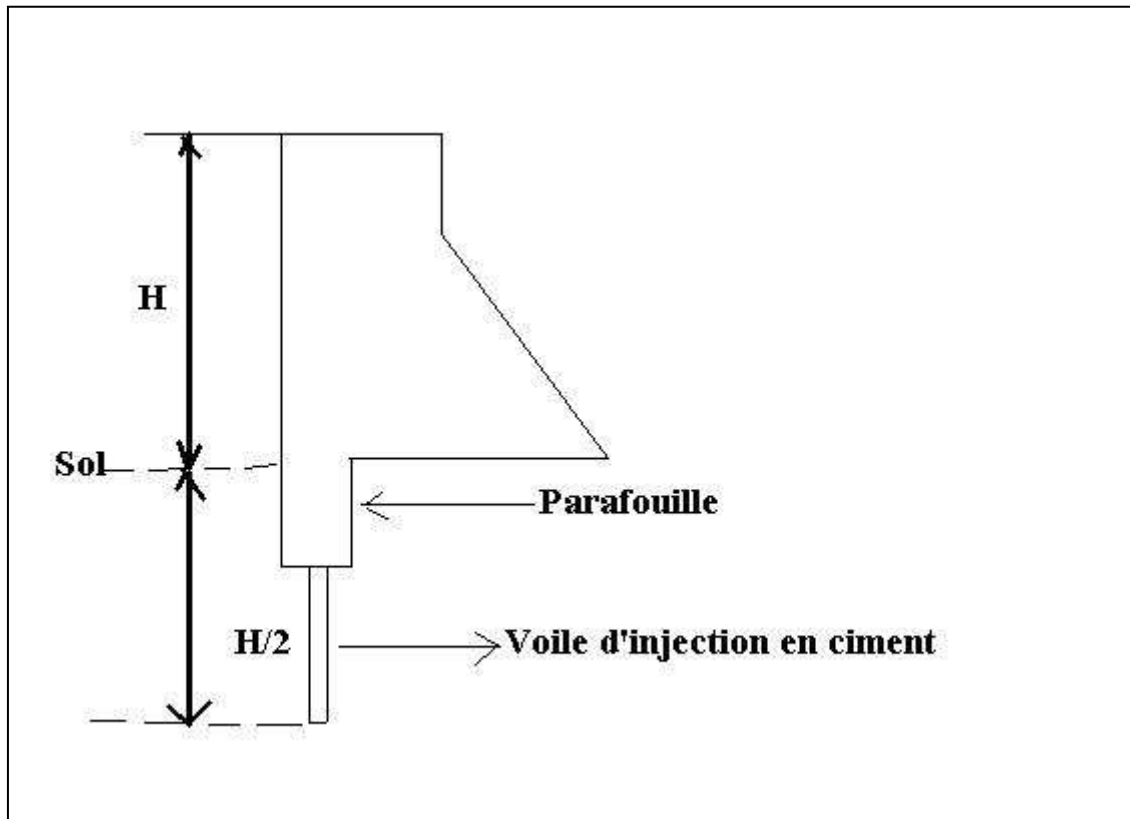
Les barrages en béton peuvent appartenir à plusieurs catégories :

#### A) Les barrage-poids :

Ce sont des ouvrages massifs s'opposant par leur poids à la poussée de l'eau du lac. Les barrages-poids modernes ont pratiquement tous la même coupe transversale triangulaire, le sommet du triangle placé au niveau le plus haut que pourra atteindre le plan d'eau.

Le poids doit être suffisant pour empêcher le massif de glisser sur sa fondation ou de basculer autour de l'arête aval de son pied. Mais ce poids doit être diminué des forces ascendantes de sous-pression dues aux écoulements inévitables de l'eau au contact du béton et du rocher ou dans les diaclases du rocher. Pour en réduire l'intensité, on encastre le barrage un peu plus profondément à l'amont (parafouille), on obture dans toute la mesure du possible les passages d'eau en sous sol par des injections de ciment jusqu'à une profondeur qui peut être par exemple, la moitié de la hauteur du barrage, enfin en aval de cet écrou, on décharge les pressions d'eau résiduelles dans le rocher par des bous de drainage également profonds.

L'expérience montre que d'une manière générale, pour tous les ouvrages fondés sur un rocher de bonne qualité, on obtient une marge de sécurité confortable vis à vis du glissement si le rapport  $F/V$  des forces horizontales aux forces verticales est inférieur à 0,75.

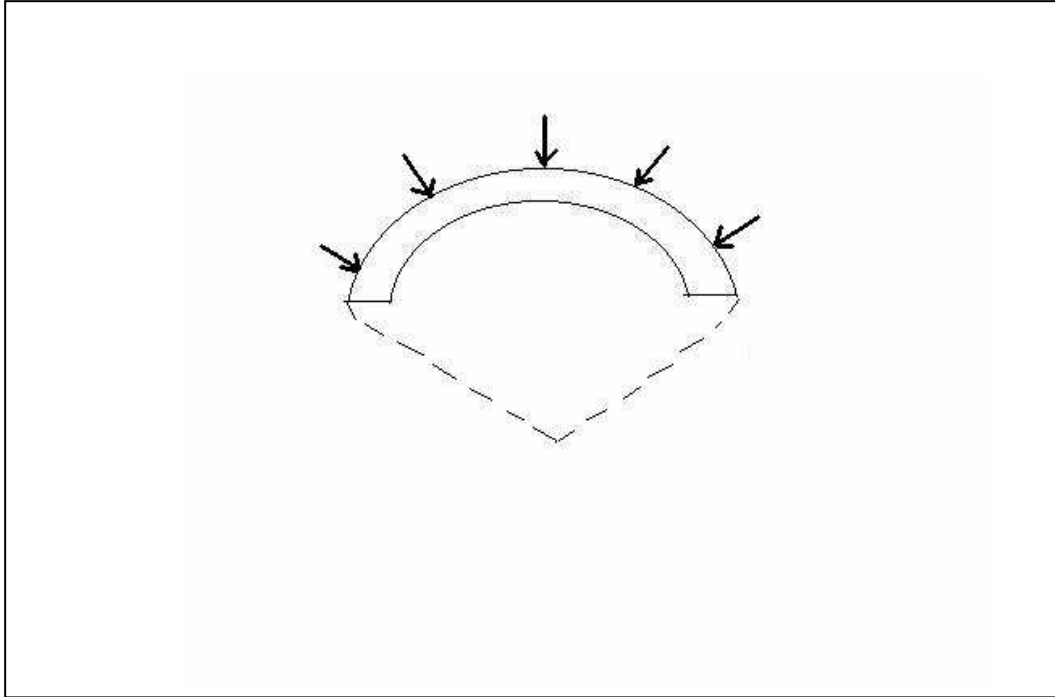


### **B) Les barrages-voûtes :**

Un barrage-voûte s'arc-boute sur les flancs de la vallée pour leur transmettre les efforts provenant de la poussée de l'eau, son mode de résistance est essentiellement différent de celui d'un barrage-poids et son degré de sécurité relève d'un tout autre critère (le degré de sécurité d'un ouvrage s'apprécie en fonction de l'événement qui a le plus de chance de provoquer sa sirène).

**Timinoutine : barrage compensateur de Moulay Youssef**

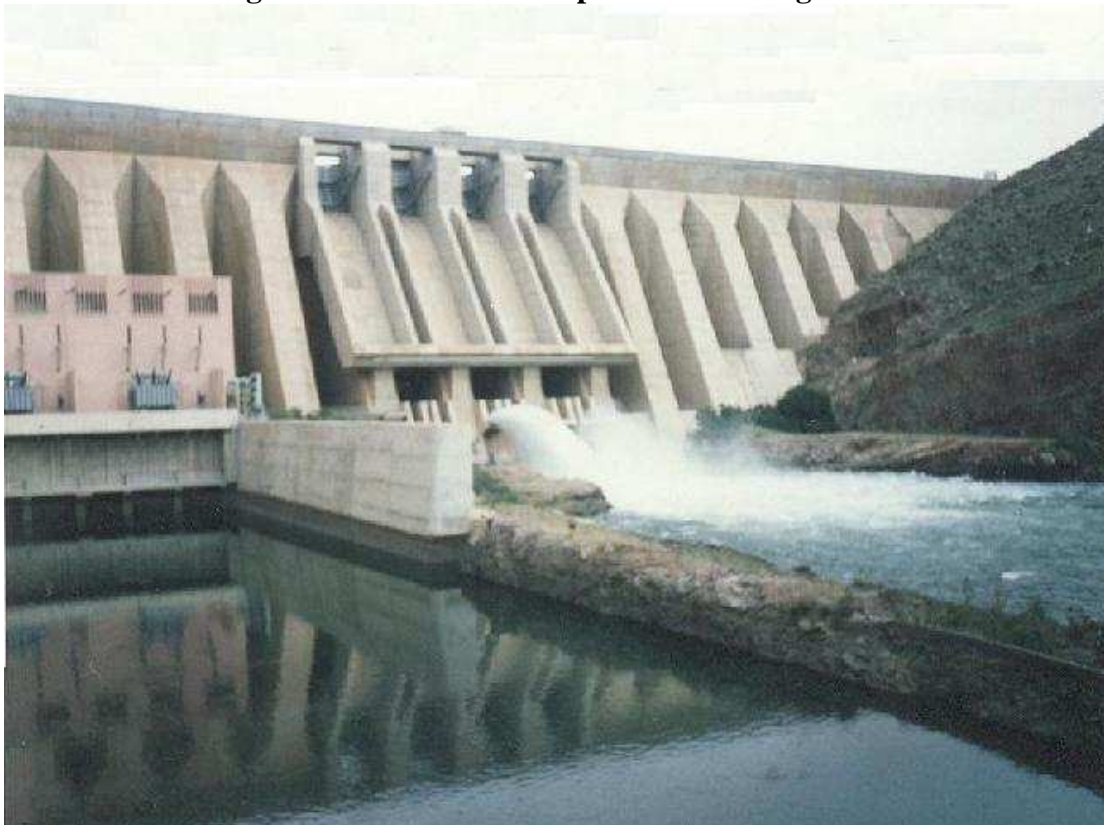


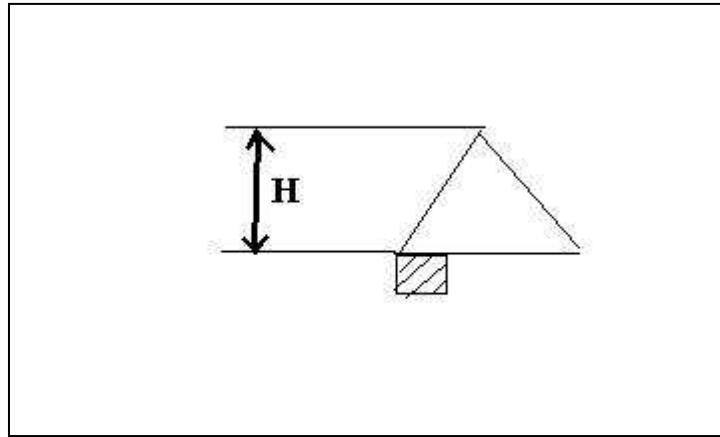


**B) Barrages à contre forts :**

Les barrages à contre forts sont constitués par une série de grands murs triangulaires parallèles au lit du cours d'eau et liés entre eux à l'amont par une paroi assurant la bouchure. Du fait de leur constitution répétitive, ces ouvrages sont applicables comme les barrage-poids, à toute vallée quelle qu'en soit la largeur.

**Barrage El Massira : lâcher à partir des vidanges de fond**





#### **IV) rocher de fondation :**

Les barrages en béton requièrent une fondation rocheuse de bonne qualité, mais cette affirmation de principe demande à être précisée, l'appréciation de la qualité des rochers de fondation a été très souvent, dans le passé, le résultat d'un examen visuel et il peut encore en être ainsi lorsqu'on se trouve en présence d'appuis incontestables. Mais avec l'augmentation du nombre des ouvrages à construire, l'ingénieur se trouve devant des terrains plus complexes. Dans tous les cas, il doit faire appel à un géologue, étant bien précisés que le métier de géologue de barrage ne s'improvise pas et nécessite une longue et étroite collaboration avec les ingénieurs spécialisés, indispensables pour bien connaître le sens exact des investigations à réaliser et les risques courus.

En première analyse, le rôle du géologue consiste, après avoir relié le site du barrage à la structure géologique de toute la région environnante, à tracer la géométrie de toutes les discontinuités, failles et diaclases, aidé en cette tâche par les décapages sondages avec extraction de carottes, tranchées, puits et galeries implantés en collaboration avec l'ingénieur, les trous de sondages sont utilisés pour effectuer des essais d'eau sous pression afin de déterminer la perméabilité du sous-sol aux diverses profondeurs. L'intervention du géologue est donc nécessaire jusqu'à la fin des travaux et du remplissage du réservoir.

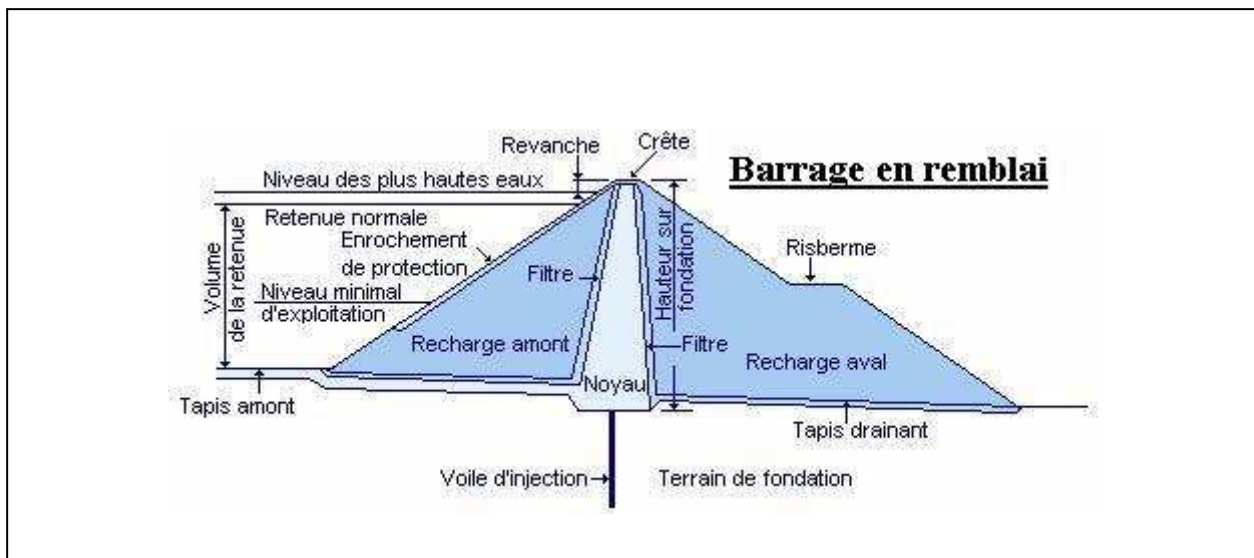
#### **v) les barrages en matériaux meubles:**

Les barrages en remblais sont constitués de matériaux meubles, soit très fins (argiles et limons), soit très grossier (enrochements).

L'édification d'un barrage en matériaux meubles consiste à arrêter et emmagasiner l'eau écoulée d'une rivière en mettant en place un massif de matériaux meubles avec ou sans enrochements.

Ces types d'ouvrages utilisent les matériaux naturels que l'on peut rencontrer dans un rayon raisonnable. C'est seulement après avoir prospecté des matériaux qui lui sont offerts que le





Projeteur détermine les caractéristiques et le profil à donner à l'ouvrage pour assurer sa stabilité et son étanchéité. Le compactage des terres a pour objet de réduire leur volume apparent au détriment des interstices entre les grains solides. Cette opération diminue le tassement ultérieur du massif et améliore les caractéristiques mécaniques et notamment la résistance au cisaillement, elle augmente aussi l'imperméabilité générale du barrage.

#### **VI) ouvrages annexes :**

Un barrage est toujours accompagné d'ouvrages annexes :

- Les ouvrages d'évacuation des crues,
- Les dispositifs de vidange,
- Les ouvrages de prise d'eau.

#### **A) Les ouvrages d'évacuation des crues :**

Le rôle de ces ouvrages est d'évacuer en aval les débits ne pouvant pas être stockés dans le barrage réservoir. Le débit sur lequel sera dimensionné l'évacuateur de crues est déterminé par une étude hydrologique et ce par traitement statistique des crues survenues au niveau du bassin versant.

Au Maroc, on dimensionne les évacuateurs des barrages en béton pour des crues millénaires (qui peuvent survenir une fois tous les mille ans), alors que les évacuateurs des barrages en terre sont dimensionnés pour des crues déca millénaires.

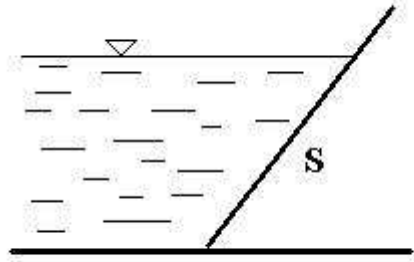
#### **B) Les ouvrages de prise d'eau et de vidange :**

Les ouvrages de vidange (vannes) ont pour objet de permettre les visites périodiques du parement amont du barrage, ces opérations ne peuvent d'ailleurs être effectuées que dans des saisons de basses eaux, car il serait généralement trop coûteux de les dimensionner pour de très gros débits.

Les ouvrages de prise d'eau alimentent la centrale hydroélectrique (prise usinière) qui produit de l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique dégagé par la chute de l'eau, ou alimentent les réseaux d'irrigation ou d'eau potable suivant l'utilisation préconisée du barrage.

Lorsque ces divers exutoires sont incorporés au barrage, celui-ci est donc traversé par des conduites métalliques d'un diamètre approprié. A leur extrémité aval sont placées des vannes de réglage de débit, et lorsqu'il s'agit d'un ouvrage à but énergétique, les turbines de la centrale hydroélectrique. A titre d'exemple, la vanne de vidange de fond du barrage El Massira est dimensionnée pour un débit de  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### **VI) Éléments de calcul :**



Les forces auxquelles est soumis un barrage sont principalement :

- La poussée hydrostatique au niveau des parois du barrage. ( $F = \rho h_G S$ )
- Les sous-pressions dues à l'eau percolant dans le corps du barrage ou les fondations.
- Les forces résultantes d'une éventuelle secousse sismique.

Pour ces considérations, le barrage doit être conçu pour résister par son propre poids (exemple : barrage poids en béton) ou transmettre ces forces vers les rives ou une fondation (exemple barrage voûte).

#### **VII) Découpage du volume d'une retenue :**

La conception d'une retenue doit obligatoirement prévoir :

##### **1) la tranche morte :**

C'est la partie la plus basse réservée pour la décantation des dépôts solides charriés lors des crues. Le volume de cette tranche est calculé à partir du débit moyen annuel en matière de transport solide (dégradation spécifique).

##### **2) la retenue normale :**

C'est la partie correspondant au remplissage normal, tout surplus sera évacué par l'évacuateur de crue.

##### **3) le niveau des plus hautes eaux :**

Elle correspond à la tranche située au dessus de la retenue normale pour laminer la crue de projet.

##### **4) la revanche :**



Elle est située entre la côte des plus hautes eaux et la crête du barrage. Pour la déterminer, il faut tenir compte des vagues qui se forment sur le plan d'eau.

### **VIII) exemple de fiches techniques :**

#### **1) Barrage Bin el Ouidane :**

- Année de mise en service : 1953
- Cours d'eau : Oued El Abid
- Ville la plus proche : Azilal
- Fonction : énergie, irrigation
- Type : Béton voûte
- Hauteur sur fondation : 133 m
- Longueur en crête : 290 m
- Côte de la retenue normale : 810 NGM
- Capacité utile de la retenue : 1.384 Mm<sup>3</sup>
- Surface du bassin versant : 6400 Km<sup>2</sup>



## **Généralités sur les ouvrages annexes des barrages**

### **I) Introduction :**

Pour exploiter la retenue d'un barrage, il est nécessaire de mettre en place, à titre provisoire ou définitif des ouvrages annexes. On distingue quatre catégories d'ouvrages annexes.

- Les dérivations provisoires
- Les évacuateurs de crue.
- Les dispositifs de vidange.
- Les ouvrages de prise d'eau.

### **1) Les dérivations provisoires :**

On procède souvent à l'aménagement d'un batardeau (petite digue au bord d'eau) afin de permettre la réalisation d'affouillements, terrassements...

### **2) Ouvrages d'évacuation des crues :**

On nomme évacuateur de crue (ou déversoirs) les ouvrages complémentaires aux ouvrages de retenue qui permettent la restitution des débits de crues excédentaires non stockables dans les réservoirs à l'aval du barrage. D'une importance capitale pour la sécurité du barrage, les évacuateurs de crues doivent être en mesure d'empêcher le débordement de l'eau par dessus la digue et l'apparition du phénomène d'érosion à l'aval de l'ouvrage dans la zone du rejet.

#### **1.1) Différents types d'évacuateurs :**

Les déversoirs d'évacuateurs de crue peuvent être groupés en deux principaux types :

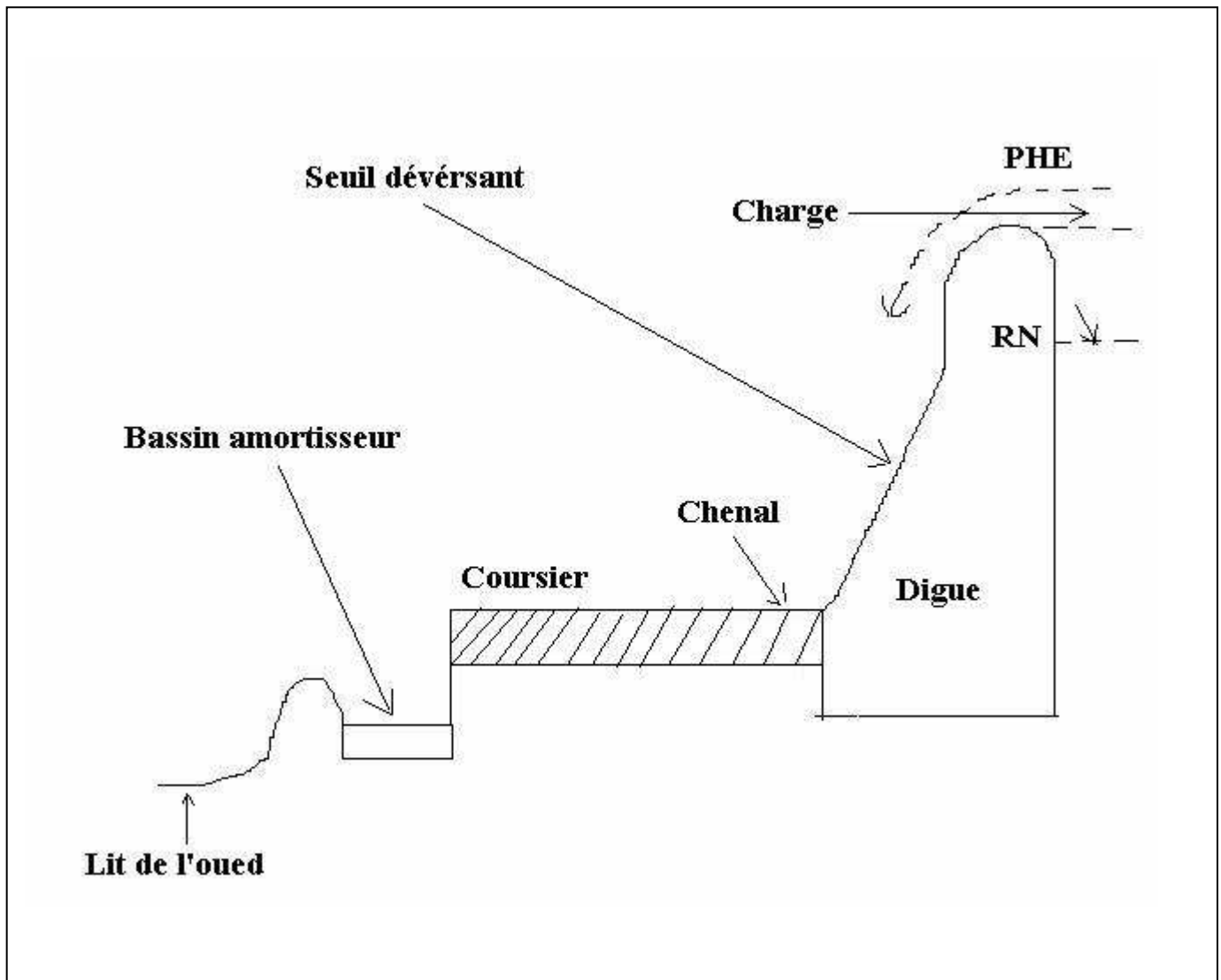
- a)- Les déversoirs de surface.
- b)- Les déversoirs en charge.

Ils peuvent être incorporées au barrage ou indépendants de celui-ci. Le choix entre les deux types de déversoirs dépend :

- 1) De l'importance des débits à évacuer.
- 2) De la dénivellation entre la côte des PHE et celle du lit de l'oued dans la zone de rejet des eaux à l'aval.
- 3) De la nature des terrains traversés par l'ouvrage en particulier le canal (rendent le revêtement nécessaire ou pas).

#### **a)- Les déversoirs de surface :**

Il s'agit du type le plus communément utilisé et aussi le plus fiable. Il débite par un seuil déversant, ce seuil débite dans un chenal à faible pente qui amène l'eau à l'aval de la digue. L'eau empreinte ensuite le coursier, ce coursier débite soit directement dans l'oued à l'aval du barrage soit dans un bassin amortisseur (cas de forte pente).



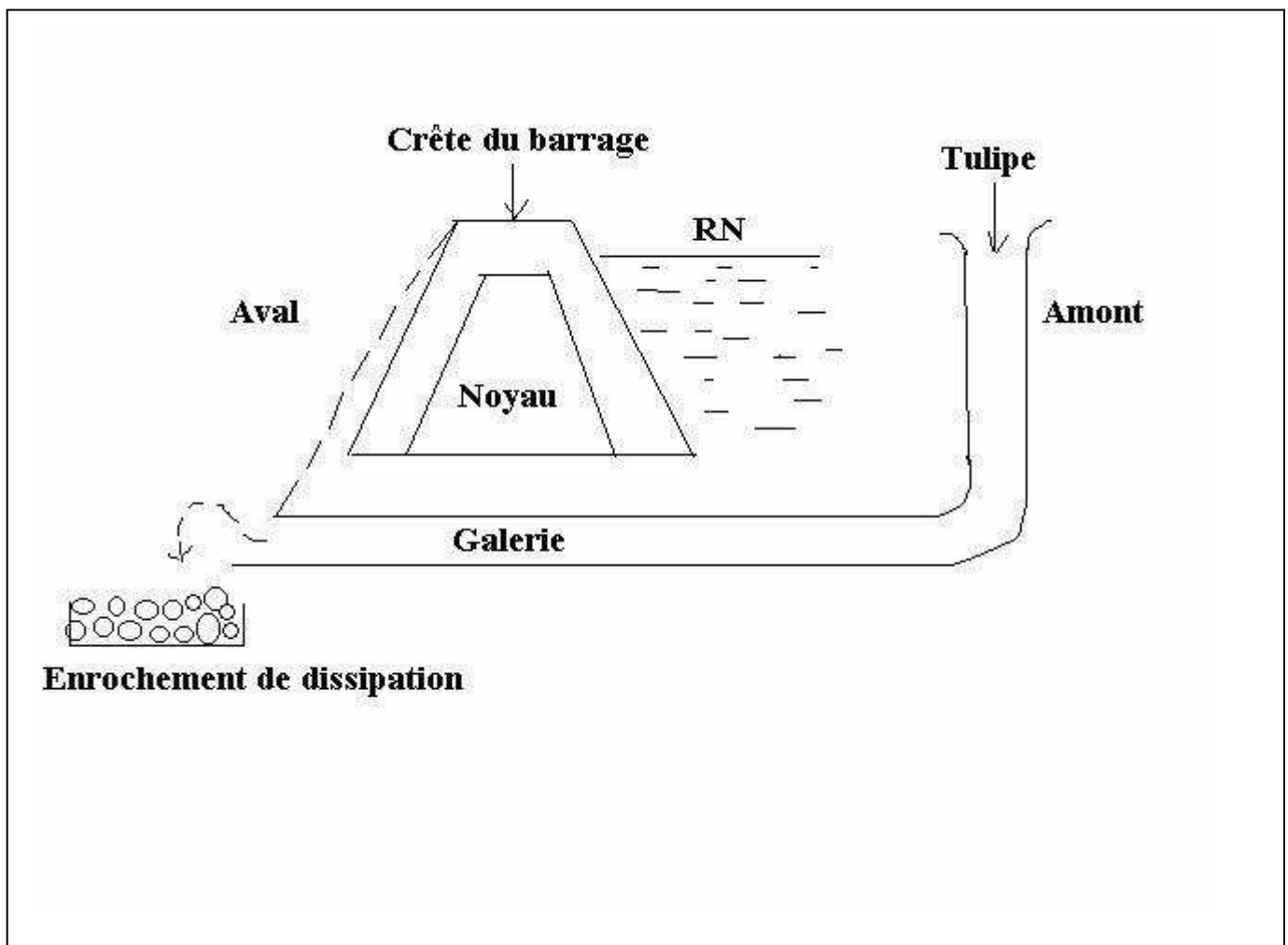
Le déversoir de surface est placé selon le cas :

- Soit latéralement au barrage sur la rive (déversoir latéral).
  - Soit dans la partie médiane du barrage (déversoir frontal).
- ◆ Le choix est fonction du type du barrage. Si l'ouvrage peut être surmonté sans danger de rupture, on pourra être moins sévère que si un déversement généralisé présente un risque majeur.
  - ◆ La conception dépend du débit à évacuer, de la topographie et de la nature des terrains qui avoisinent l'ouvrage.
  - ◆ Pour les barrages en béton, l'évacuateur est souvent incorporé, on profite de la pente du parement du barrage poids pour installer un seuil déversant. Il peut être à écoulement libre ou muni de vannes que l'on ouvre plus ou moins en période de crue.

- ◆ Les évacuateurs de crue des barrages en terre sont implantés généralement en rives sous forme de canaux munis de dissipateurs d'énergie ou sous forme de tulipes loin du corps du barrage.
- ◆ Du fait tassement des remblais, les coursiers de déversoirs trop rigides ne peuvent être construits sur ces ouvrages.

D'autres part, il est dangereux de faire traverser la digue en terre par des conduites sous pression : les flexions subies par les tuyaux pourraient engendrer des contraintes exagérées et difficiles à déterminer à l'avance. En outre, des infiltrations génératrices de renard pourraient se produire entre les conduites et la terre.

Une solution a été appliquée au barrage Moulay Youssef consistant à faire évacuer les crues par trois galeries traversant le flanc de la vallée.



Dans le cas des barrages voûtes ayant des parements avals verticaux on effectue des déversoirs en chute libre. Mais cette dernière solution pose le problème de l'érosion du lit au point de chute du fait de la grande énergie à dissiper.

Des combinaisons diverses pour protéger le pied aval du barrage peuvent être obtenues avec : soit des tapis en béton armé soigneusement étudiés, soit une fosse créant un matelas d'eau et

des déflecteurs continus ou discontinus. Ceux-ci en forme de dents étudiés de manière à créer un ressaut et des rouleaux.

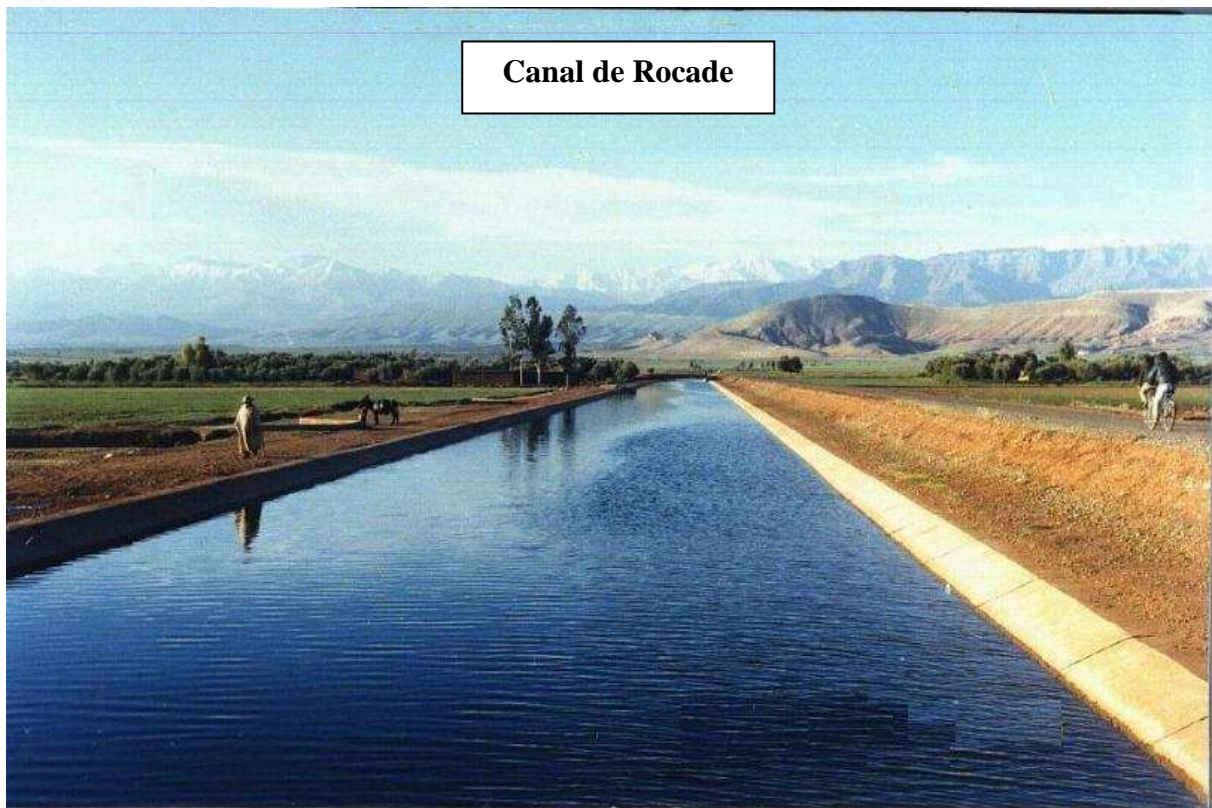
### **3) Les Dispositifs de vidange :**

#### **Vidange de fond :**

- Elle a pour objet de permettre les visites périodiques du parement amont du barrage, ces opérations ne peuvent d'ailleurs être effectuées que dans des saisons de basses eaux car il serait généralement trop coûteux de les dimensionner pour de très gros débits.
- La vidange de fond sert également à évacuer une partie des eaux de crue, effectuer des chasses périodiques et lutter partiellement contre l'envasement des retenues.
- La vidange de fond peut également remplacer la prise d'eau en cas de défaillance de celle-ci.

### **4) Les ouvrages de prise d'eau :**

Ce sont les conduites permettant d'alimenter l'usine hydroélectrique (conduite forcée) ainsi que les prises d'eau potables et d'irrigation. Pour le barrage sidi Driss par exemple, le canal de Rocade et sur une distance d'environ 110 Kms, permet de véhiculer l'eau jusqu'au Haouz central ( $300 \text{ Mm}^3 / \text{an}$ ) pour l'irrigation ( $260 \text{ Mm}^3 / \text{an}$ ) et le renforcement de l'alimentation en eau potable de la ville de Marrakech ( $40 \text{ Mm}^3 / \text{an}$ ).



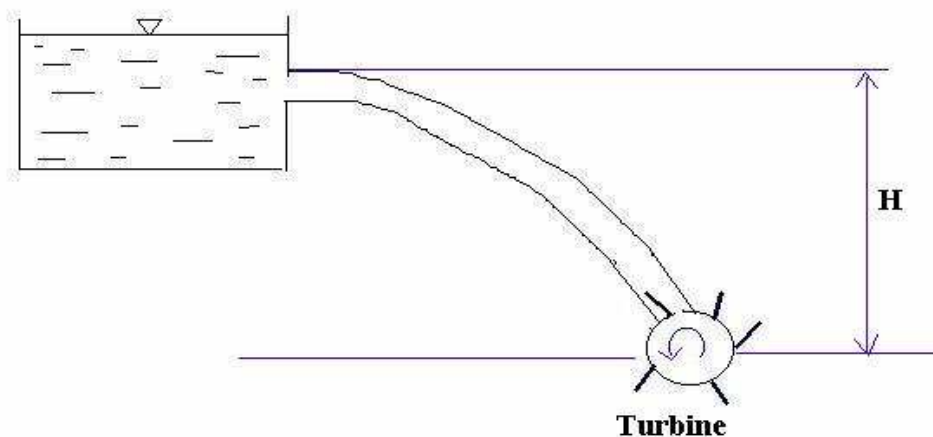
## Les centrales hydro-électriques

### **I) Définition :**

Une centrale hydro-électrique est un atelier de production d'électricité à partir de l'énergie cinétique accompagnant la chute d'une masse d'eau. Cette usine se trouve toujours dans les grands barrages et permet la production d'électricité à partir de l'eau du barrage.

### **II) Principe :**

Une certaine masse d'eau tombe d'une certaine hauteur, l'eau est amenée jusqu'aux turbines situées en bas via une conduite forcée, celles-ci transforment l'énergie potentielle de l'eau en énergie cinétique et entraînent les alternateurs qui produisent finalement de l'énergie électrique. L'eau qui sort des turbines passe généralement dans un diffuseur et est amenée dans un canal d'évacuation par lequel s'effectue la restitution de l'eau à la rivière.



### **III) Puissance d'une centrale :**

La puissance théorique obtenue d'un débit d'eau  $Q$ , tombant en chute libre d'une hauteur  $H$  est  $P \text{ (Kw)} = 9,8 \times H(m) \times Q \text{ (m}^3/\text{s)}$ , celle qui est disponible aux bornes des alternateurs est inférieure, différents organes qui ont chacun leur propre rendement étant interposés : vannes, conduites, turbines, alternateurs. En définitive on peut admettre un rendement moyen de l'ensemble variant entre 0,8 et 0,85 (80% à 85%).

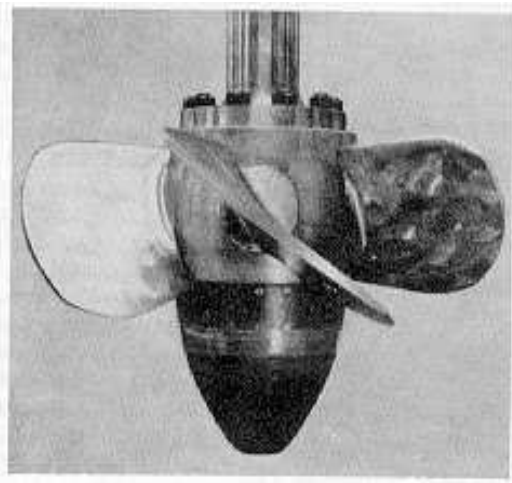


La puissance disponible est alors

$$P(Kw) = 9,8 \times H(m) \times Q (m^3/s) \times \rho$$

Il existe aussi des microcentrales hydroélectriques et notamment en zone de montagne, celles-ci peuvent développer des puissances électriques de quelques Kilowatts à plusieurs mégawatts (10 MW au maximum). Les chutes d'eau exploitées varient de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Au Maroc, ce genre de centrales est souvent utilisé pour l'électrification en milieu rural. Trois types de turbines sont utilisés :

- Kaplan pour des chutes de 5 à 10m.
- Francis pour des chutes de 10 à 100m.
- Francis et Pelton pour les grandes chutes de 50 à 400m.



**Turbine Kaplan**



**Turbine Francis**

**Usine ONE au barrage Sidi Said Maachou**



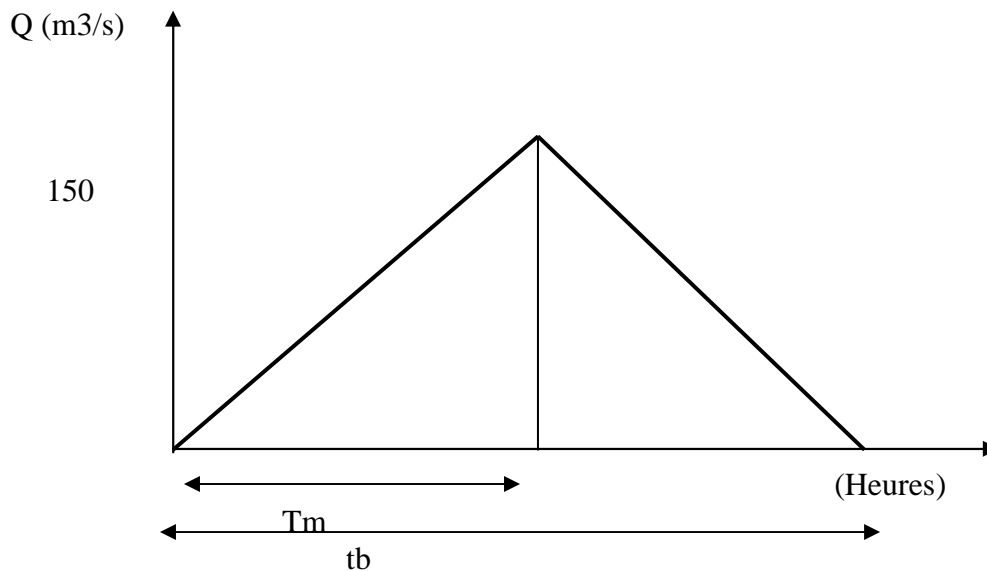


## **Problèmes**

### **A- Hydrologie :**

Les caractéristiques du bassin versant d'un barrage collinaire sont comme suit :

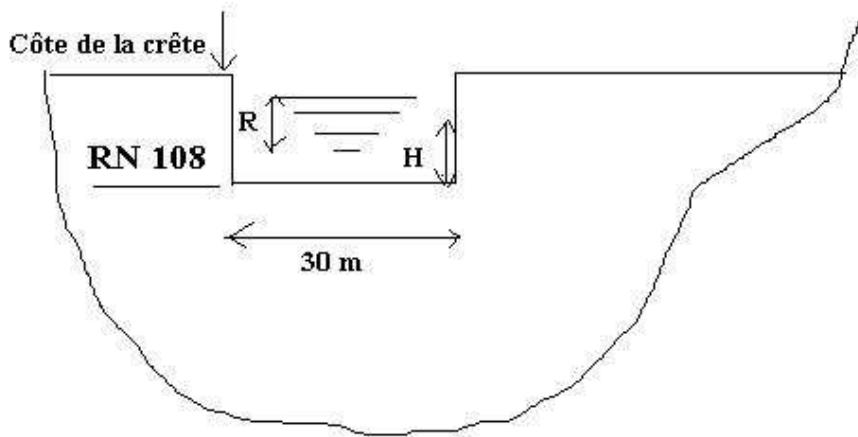
- Superficie du bassin versant : 100 Km<sup>2</sup>
- Coefficient de ruissellement : 8 %
- Volume de la crue millénale ( $Q_{1000} = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ ) est de 1.000.000 de m<sup>3</sup>
- Volume de la tranche morte : 500.000 m<sup>3</sup>
- Volume de l'envasement annuel : 20.000 m<sup>3</sup>
- Débit spécifique du bassin versant : 1,015 l/s/ K m<sup>2</sup>



- e) Calculer les apports moyens annuels
- f) Calculer le temps de base  $t_b$  de la crue millénale en heure
- g) Calculer la pluviométrie du bassin versant en mm
- h) Calculer la durée de vie du barrage

### **B/- Conception du barrage collinaire :**

- a- Pour le dimensionnement de quelle partie de l'ouvrage interviennent les données hydrologiques suivantes :
  - ☐ Volume des apports moyens annuels
  - ☐ Volume d'envasement annuel
  - ☐ Crue de projet millénale  $Q = 1000$
- b- Pour calculer la cote de la crête du barrage on dispose du profil en travers suivant :



$$Q = C.I.H^{3/2}$$

$$R = 0.76 + 0.032(V.F)^{0.5} - 0.26(F)^{0.25} + 0.5$$

V = Vitesse du vent (80 Km/h)

F = Fetch (2 Km)

Q = Le débit à évacuer 150 m<sup>3</sup>/s

C = 2.14

I = longueur déversante en m = 30 m

- Calculer la côte de la crête du barrage collinaire

c – Vidange de fond :

Le barrage collinaire est muni d'une vidange de fond sous forme d'une conduite circulaire de diamètre 800 mm.

- D'après le théorème de Bernoulli, le débit à la sortie de la vidange de fond est donné par la formule suivante :

$$Q = 2.01 \times (Z - Z_v.F)^{0.5} \times S.$$

- ❖ Q : débit à la sortie
- ❖ Z : Côte du plan d'eau
- ❖ ZV.F: Côte de la vidange de fond

- Calculer la côte de la vidange de fond sachant que le débit sortant à la côte de la retenue normale est de  $5.68 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Calculer la vitesse de la sortie de la vidange de fond.

**Réponses :**

**A/- Hydrologie :**

b) Le débit spécifique est de  $1.015 \text{ l/s/Km}^2$ ; la superficie du bassin versant est de  $100 \text{ Km}^2$ ; soit un débit moyen d'apports qui est de  $101,5 \text{ l/s}$ . Ceci correspond à un volume annuel

$$V = 3,2 \text{ Mm}^3$$

b- Le volume de la crue millénale est de  $1.10^6 \text{ m}^3$ . D'après l'hydrogramme de crue le volume est  $V = \frac{tb \times Qp}{2}$  d'où

$$Tb (s) \cong 13333 \text{ s}$$

$$Tb (\text{heures}) = 3,7 \text{ heures ; (3 heures 42 minutes)}$$

b -Le coefficient de ruissellement est  $R = \frac{\text{débit ruisselle}}{\text{Débit tombé}} = \frac{\text{volume ruisselle}}{\text{volume tombé}}$

$R = 8\%$  ; volume ruisselle =  $3,2 \text{ Mm}^3$   
 Volume tombé =  $P \times S$  avec  $P$  = pluviomètre ET  $S$  = surface du B.V.  
 Volume tombé en  $\text{Mm}^3 = P (\text{mm}) \times 10^{-3} \times 100 \times 10^6 \times 10^{-6} \Rightarrow$   
 Volume tombé en  $\text{Mm}^3 = P (\text{mm}) \times 10^{-1}$  donc  $\frac{3,2}{P \times 0,1} = 0,08$

$$P = 400 \text{ mm}$$

c) Le volume de la tranche morte étant de  $500.000 \text{ m}^3$  et compte tenu de l'envasement annuel qui est de  $20.000 \text{ m}^3$ , la tranche morte sera complètement comblée au bout de 25 ans (durée de vie du barrage).

**B/- Conception du barrage collinaire :**

b) Le volume des apports moyens annuel, le volume d'envasement annuel, la crue de projet millénale sont 3 données intervenant dans le dimensionnement de la retenue du barrage.

c)  $Q = C.I. H^{3/2}$  avec  $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $C=2,14$  et  $I = 30 \text{ m}$

Donc  $H^{3/2} = 150 / 2,14 \times 30 \Rightarrow$

**$H = 1,75 \text{ m}$**

La revanche  $R = 0,76 + 0,032 (v.f)^{0,5} - 0,26 (f)^{0,25} + 0,5$  soit,

**$R = 1,35$**

Donc la côte de la crête du barrage est  $C=108 + 1,35$  soit

d)  $Q = 2,01 \times (Z - Z_{v.f})^{0,5} \times S$

$Z = 108 \text{ m}$ ;  $Q = 5,68 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $S = \Pi d^{2/4} = \Pi \times (800 \times 10^{-3})^2 / 4$

**$C = 111,1 \text{ m}$**

Soit  $S = 0,5 \text{ m}^2$

Donc  $5,68 = 2,01 (108 - Z_{v.f})^{0,5} \times 0,5 \Rightarrow$

$(108 - Z_{v.f}) = \left( \frac{5,68}{2,01 \times 0,5} \right)^2 \Rightarrow Z_{v.f} = 108 - \left( \frac{5,68}{2,01 \times 0,5} \right)^2$

Soit

**$Z_{v.f} = 76,05 \text{ m}$**

$Q = v.s \Rightarrow V = \frac{Q}{S} = \frac{5,68}{0,5} \Rightarrow$

**$V = 11,4 \text{ m/s}$**

### Problème

L'étude de régularisation du Barrage Ait Hammou a permis au Stade du projet de déterminer la capacité du barrage. Pour une année donnée.

- ◆ La variation de la réserve est de  $+25 \text{ millions de m}^3$
- ◆ Le volume fourni à l'eau potable et à l'irrigation est de  $55 \text{ Millions de m}^3$
- ◆ L'évaporation annuelle est de  $5 \text{ Millions de m}^3$

1) Calculer le débit moyen annuel entrant au barrage (en  $\text{m}^3/\text{s}$ )

Les caractéristiques de la retenue du barrage Aït Hammou retenues dans le projet sont les suivantes :

- ◆ Capacité à la retenue normale :  $110 \text{ millions de m}^3$
- ◆ Tranche morte :  $7.5 \text{ millions de m}^3$
- ◆ La prise de la vidange de fond du barrage est calée à la côte 30 correspondant au volume de la retenue morte.

2) Calculer le débit d'équipement de la vidange de fond pour pouvoir vidanger la retenue pleine dans une durée maximale de 7 jours.

### Réponses

1/ -  $\Delta V$  (annuelle) =  $25 \text{ Mm}^3$

- AEP (alimentation en eau potable) + irrigation =  $55 \text{ Mm}^3$

- Evaporation =  $5 \text{ Mm}^3$

Soit  $V$  ( $\text{Mm}^3$ ) le volume des apports annuels, on a  $V - 55 - 5 = 25$  d'où

$$V = 85 \text{ Mm}^3/\text{an}$$

En fictif continu, ce débit est de

$$2,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

2/- Lorsque la retenue sera pleine, le volume total à vidanger est de

$$V = 110 - 7,5 \text{ soit}$$

$$V = 102,5 \text{ Mm}^3$$

Ce volume doit être vidangé pendant + 7 jours au maximum, il faut donc un débit d'équipement minimal qui soit de

$$Q = 169,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

### Problème

L'alimentation en eau potable de la ville de Taza est assurée principalement à partir des ressources en eau souterraines. Compte tenu de la saturation des ressources mobilisées actuellement, il est nécessaire de faire appel aux ressources superficielles pour couvrir les besoins de la ville à moyen et à long terme. Le barrage Bab Louta en cours de construction sur l'Oued Bouhlou qui fait partie du programme des barrages prévus à cet effet, permettra de couvrir les besoins de la ville à moyen terme. Il contrôle un bassin versant de  $127 \text{ Km}^2$  ayant une pluviométrie moyenne annuelle de  $900 \text{ mm}$ .

1) Considérant que le bassin a un coefficient de ruissellement de 20% évaluer le volume des apports et le module moyen annuel de l'Oued Bouhlou au niveau du site du barrage.

2) Calculer le volume des apports solides moyen annuel en  $\text{m}^3$  au niveau du site sachant que la dégradation spécifique moyenne du bassin est de  $1110 \text{ t/Km}^2/\text{an}$ . La densité des sédiments est estimée à  $1.5 \text{ t/m}^3$ .

3) Le tableau suivant indique la surface planimétrée de la retenue en fonction de la cote. Compléter ce tableau en calculant le volume de la retenue en fonction de la cote et tracer la courbe cote - volume. Le lit de l'Oued au niveau du site est calé à la cote 515 NGM.

Côte (NGM)	515	520	530	540	550	560	570
Surface (ha)		7,44	25,96	80,73	155,61	245,93	388,62
Volume (Mm <sup>3</sup> )							

4) Les résultats de l'étude de régularisation établie ont montré que pour régulariser un volume d'eau de 8,3 Mm<sup>3</sup>/an au pied du barrage, le volume de la retenue normale doit être de 1,58 fois le volume des apports moyens annuels.

a) Déterminer la cote de retenue normale.

b) Le barrage est du type poids en Béton Compacté au Rouleau (BCR) avec un évacuateur de crues à seuil libre en partie centrale de 30 m de longueur déversante. Cet évacuateur est dimensionné pour laminier la crue de projet millénale de 700 m<sup>3</sup>/s (débit sortant).

$$Q = C \cdot L \cdot H^{3/2} \quad (C: \text{coefficient du débit}=2,18)$$

Calculer la cote des plus Hautes Eaux (PHE).

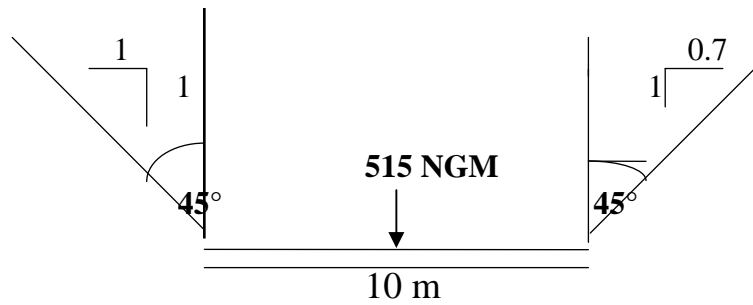
c) Considérant que la revanche est de 1m, déterminer la cote en crête du barrage et sa hauteur sur terrain naturel.

5/ Il est retenu de caler la galerie d'accès (à la galerie d'injection) à la cote des plus hautes eaux aval (niveau d'eau aval correspondant au débit sortant de l'évacuateur de crues au passage de la crue de projet.)

Calculer le débit de l'Oued au niveau de la section de contrôle (fig1) pour différentes côtes, sachant que le coefficient de Strickler  $K = 35$  et la pente de l'Oued de 1% et tracer la courbe de tarage  $Q = f(h)$ ; en déduire la cote de calage de cette galerie  $Q = K \cdot S \cdot I^{1/2} \cdot R_H^{2/3}$ .

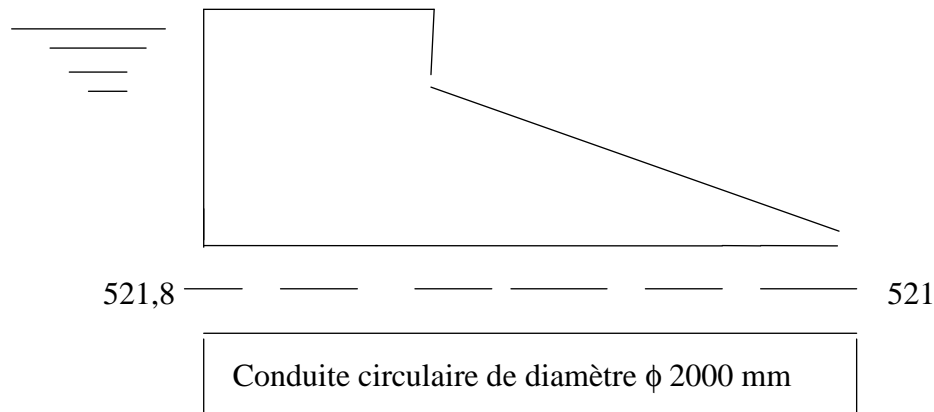
$S$  : Section mouillée       $R_H = S/P$        $P$  : Périmètre mouillé

$I$  : Pente de l'oued au droit du site.



**Fig1 : Section de contrôle**

6/ Calculer le débit évacué par la vidange de fond ainsi que la vitesse à la sortie pour un plan d'eau à la cote de retenue normale en tenant compte des pertes de charge totale estimées à  $(0.8 V^2/2g)$ . Les caractéristiques de la vidange de fond sont indiquées sur la figure suivante.



**fig 2: Coupe au droit de la vidange de fond**

**Corrigé :**

1) Le volume d'eau tombé est  $V (m^3) = 127 \times 10^6 \times 900 \times 10^{-3}$  soit

$$V = 114,3 \text{ Mm}^3$$

Le volume d'eau ruisselé est  $V_r = 0,2 \times 114,3$  soit

$$V_r = 22,86 \text{ Mm}^3$$

Les apports sont donc de  $22,86 \text{ Mm}^3/\text{an}$  ou  $700 \text{ l/s}$  en fictif continu.

La surface du bassin étant de  $127 \text{ km}^2$ , le débit spécifique est de  $5,5 \text{ l/s/km}^2$

2) Les apports solides sont de  $1110 \times 127 = 140970 \text{ tonnes/an}$ .

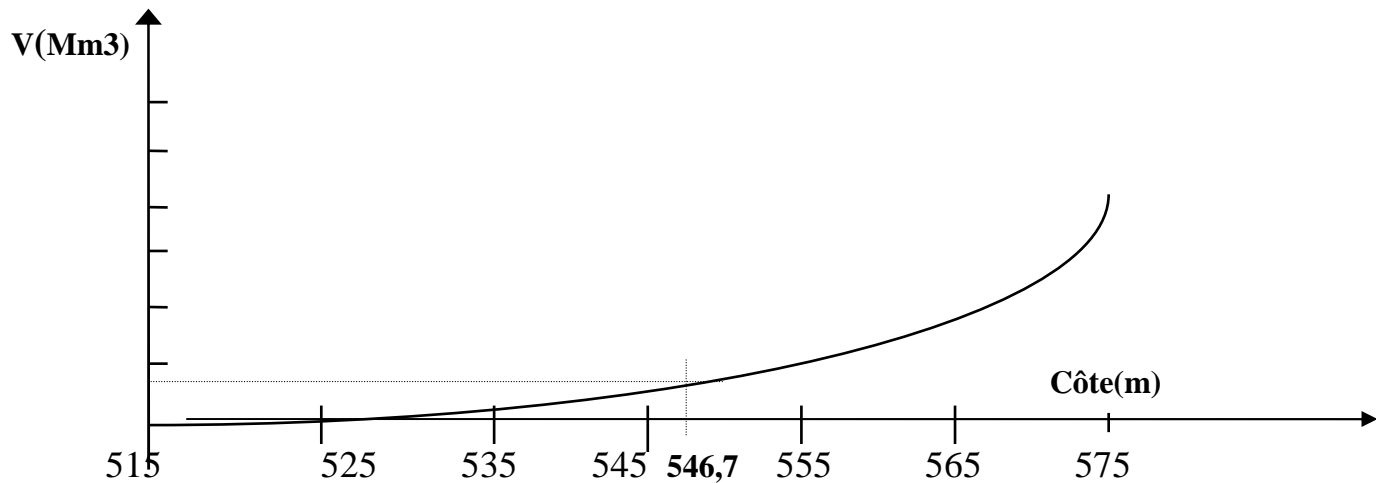


La densité des sédiments étant de  $1,5 \text{ t/m}^3$ , les apports solides seront de  $93980 \text{ m}^3/\text{an}$ .

3) Pour avoir les volumes d'eau, il suffit de multiplier la surface du plan d'eau par la hauteur d'eau. Le tableau suivant récapitule les valeurs trouvées.

Côte (NGM)	515	520	530	540	550	560	570
Surface (ha)	0	7,44	25,96	80,73	155,61	245,93	388,62
Volume (Mm <sup>3</sup> )	0	0,37	3,89	20,18	54,46	110,66	213,74

La courbe côte - volume se présente comme suit:



4) Le volume des apports moyens est de  $22,86 \text{ Mm}^3$ . Pour régulariser un volume d'eau de  $8,3 \text{ Mm}^3/\text{an}$ , le volume de la retenue normale doit être de  $1,58 \times 22,86 = 36,1 \text{ Mm}^3$ . D'après la courbe tracée précédemment,

a) la côte normale de la retenue serait de  $546,7 \text{ m}$

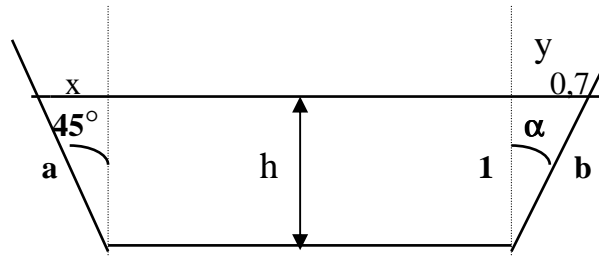
$$b) Q = C.L.H^{3/2} \Rightarrow H^{3/2} = \frac{Q}{C.L}^{2/3}$$

A.N  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  ;  $C = 2,18$  ;  $L = 30 \text{ m}$  soit  $H = 2,73 \text{ m}$

On a donc  $\text{PHE} = 546,7 + 2,73$  soit  $\text{PHE} = 549,4 \text{ m}$

c) côte en crête =  $549,4 + \text{revanche} = 549,4 + 1 = \underline{\underline{550,4 \text{ m}}}$   
 Hauteur sur terrain naturel =  $550,4 - 515 = \underline{\underline{35,4 \text{ m}}}$

5)



$$\tan \frac{\pi}{4} = \frac{x}{h} = 1 \Rightarrow x = h \text{ donc } S_1 = \frac{h^2}{2}$$

$$\tan \alpha = \frac{0,7}{1} = \frac{y}{h} \Rightarrow \frac{y}{h} = 0,7 \Rightarrow y = 0,7h \text{ d'où } S_2 = \frac{0,7h^2}{2}$$

$$S \text{ (totale)} = 10h + \frac{h^2}{2} + \frac{0,7h^2}{2} = 10h + \frac{1,7h^2}{2} \text{ (c'est la surface mouillée)}$$

$$\cos 45^\circ = \frac{h}{a} = 0,7 \text{ d'où } a = \frac{h}{0,7}$$

$$\tan \alpha = \frac{0,7}{1} \Rightarrow \alpha = 35^\circ$$

$$\cos 35^\circ = \frac{h}{b} = 0,82 \Rightarrow b = \frac{h}{0,82}$$

$$\text{Le périmètre mouillé sera donc } P = 10 + \frac{h}{0,7} + \frac{h}{0,82}$$

D'après la formule de Manning Strikler on a

$$Q = 35 \left( 10h + \frac{1,7h^2}{2} \right) \times 0,1 \times \frac{S}{P}^{0,66}$$

\* pour la côte 520m, on a  $h = 5\text{m}$  d'où  $S = 71,25\text{m}^2$  et  $P = 23,23\text{m}$

$$\text{Soit } Q_1 = 522,5\text{m}^3/\text{s}$$

\* pour la côte 530m, on a  $h = 15\text{m}$  d'où  $S = 262,5\text{m}^2$  et  $P = 49,7\text{m}$

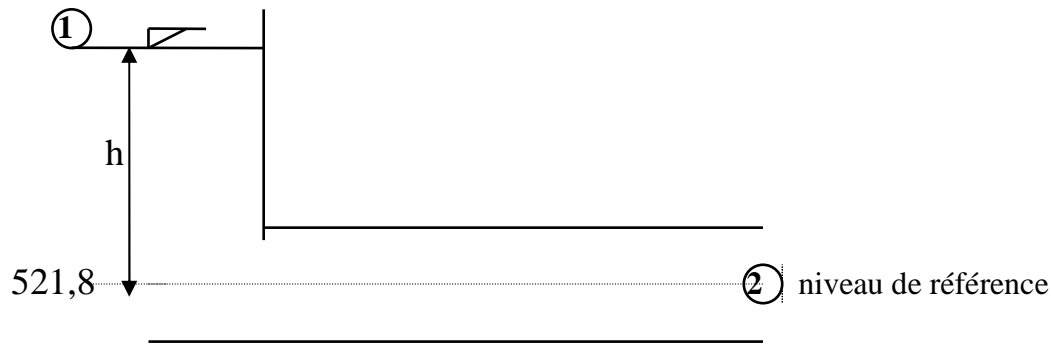
$$\text{Soit } Q_2 = 2755,7\text{ m}^3/\text{s}$$

\* Pour la côte 540 on a  $h = 25\text{m}$  d'où  $S = 781,2\text{m}^2$  et  $p = 76,2\text{m}$

$$\text{Soit } Q_3 = 12704\text{m}^3/\text{s}$$

6) Côte de la retenue normale = 546,7m

Côte vidange de fond = 521,8m d'où  $h = 24,9\text{m}$



Appliquons le théorème de Bernoulli entre 1 et 2

$$h = \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H \text{ or } \Delta H = 0,8 \times \frac{V_2^2}{2g} \Rightarrow h = 1,8 \times \frac{V_2^2}{2g} \text{ d'où}$$

$$V = \sqrt{\frac{2gh}{1,8}} \Rightarrow V = 16,5 \text{ m/s}$$

$$Q = V.S = V \cdot \frac{\pi d^2}{4} \Rightarrow Q = 51,8 \text{ m}^3/\text{s}$$

### Exercice :

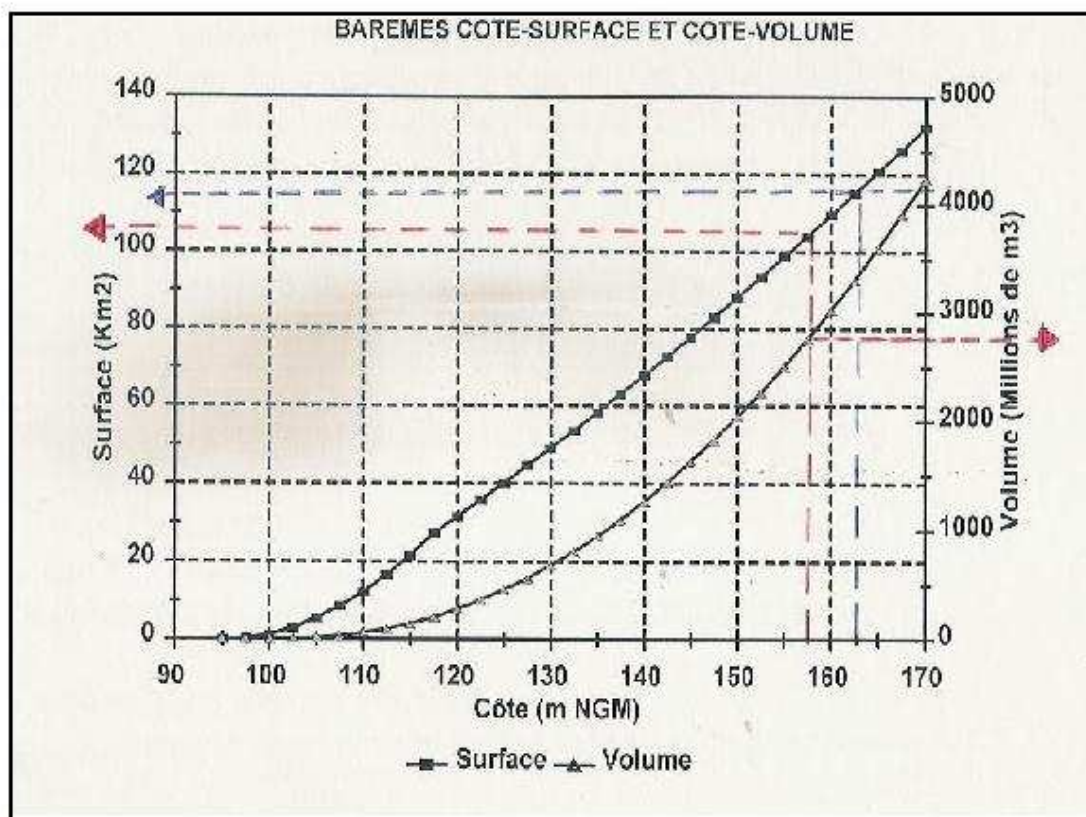
Les informations relatives à la gestion du barrage Al Wahda au cours du mois de Janvier 1998 sont les suivantes :

- côte au 1<sup>er</sup> janvier 1998 : 158,50 m NGM
- côte au 1<sup>er</sup> février 1998 : 163,50m NGM
- hauteur nette évaporée : 85 mm

Le débit turbiné au cours du mois de Janvier a été comme suit :

Période	Du 1 au 7 janvier 1998	Du 8 au 19 janvier 1998	Du 20 au 31 janvier 1998
Débit turbiné	150 m <sup>3</sup> /s	450 m <sup>3</sup> /s	300 m <sup>3</sup> /s

- 1) calculer le volume total turbiné au cours du mois de Janvier 1998.
- 2) En utilisant les courbes côtes-surfaces et côtes-volumes ci-joint, calculer les volumes et les surfaces de la retenue du barrage Al Wahda aux 1<sup>er</sup> des mois de janvier et février 1998.
- 3) Calculer le volume évaporé (en Mm<sup>3</sup>) au niveau du barrage Al Wahda.



### Réponses :

1/- Volume turbiné pendant le mois de Janvier :

\* du 1 au 7 Janvier : 7 jours au débit de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  donc  
 $V1 = 150 \times 7 \times 24 \times 3600$

$$V1 = 91 \text{ Mm}^3$$

\* Du 8 au 19 Janvier : 12 jours au débit de  $450 \text{ m}^3/\text{s}$  donc  $V2 = 450 \times 12 \times 24 \times 3600$

$$V2 = 466 \text{ Mm}^3$$

\* Du 20 au 31 Janvier : 12 jours au débit de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  donc  $V3 = 300 \times 12 \times 24 \times 3600$

$$V3 = 311 \text{ Mm}^3$$

$$V (\text{total turbiné}) = 868 \text{ Mm}^3$$

2/- Il suffit de reporter en abscisses les côtes 158,50 m et 163,50 m

- Pour le 1<sup>er</sup> Janvier ;  $S = 105 \text{ Km}^2$  et  $V = 2750 \text{ Mm}^3$
- Pour le 1<sup>er</sup> Janvier ;  $S = 115 \text{ Km}^2$  et  $V = 4200 \text{ Mm}^3$

3/- Au début du mois de Janvier et Février ;  $S = 105 \text{ Km}^2$ , la lame d'eau évaporé est de 85 mm donc  $V = (\text{évaporé}) = 105 \times 10^6 \times 85 \times 10^{-3}$  Soit

$$V = 9 \text{ Mm}^3$$

4/- La variation de réserve entre Janvier et Février est  $\Delta V = 4200 - 2750$  soit  $\Delta V = 1450 \text{ Mm}^3$

$V (\text{apports}) - V (\text{turbinage}) - (\text{Evaporation}) = \Delta V$  d'où  $V (\text{apports}) = 1450 + 9 + 868$  ; soit

$$V = 2327 \text{ Mm}^3$$

### Exercice :

La future retenue d'un barrage s'étend sur une superficie de  $50 \text{ cm}^2$  planimétrée sur un plan au 1/25 000 :

- 1) calculer la superficie réelle qui sera inondée (en hectare) par cette retenue.
- 2) Calculer le coût d'expropriation de cette superficie sachant que le prix d'un hectare est de 50 000,00 Dhs.

### Réponses :

- 1) la retenue s'étendra sur 62,5 hectares.
- 2) Le coût de l'expropriation s'élèvera à  $62,5 \times 50\,000 = 3,125 \text{ Mdhs}$ .

### Exercice :

La protection de la zone d'ourika nécessite l'édification d'un barrage sur l'oued Ourika qui sera muni d'une conduite de prise d'eau de section circulaire :

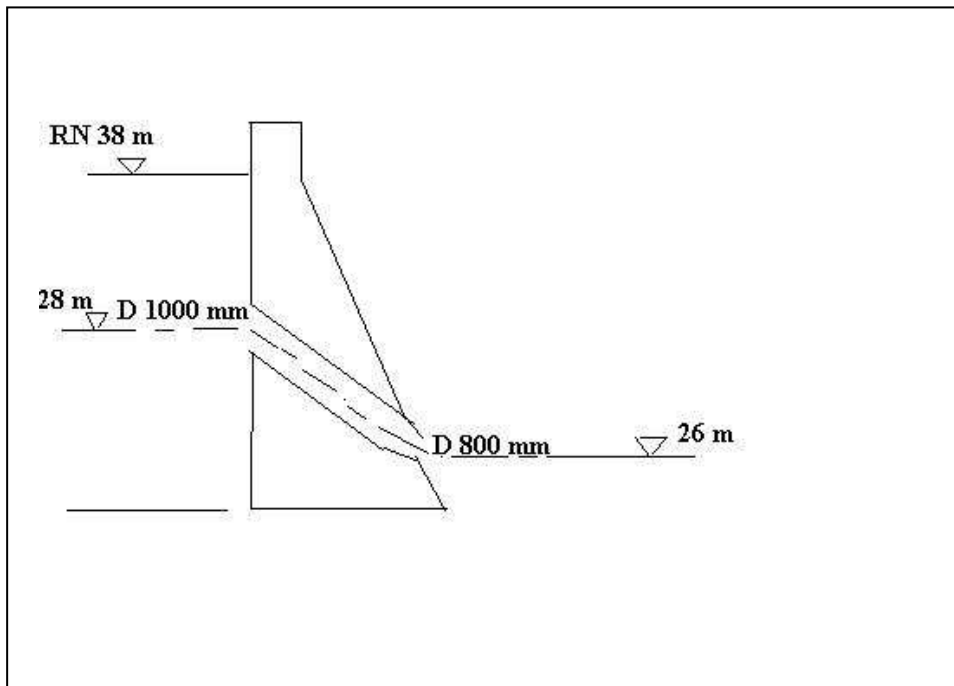
A l'entrée :  $D = 1000 \text{ mm}$  et la côte est de 28 m.

A la sortie :  $D = 800 \text{ mm}$  et la côte est de 26m.

Le niveau normal de la retenue de ce barrage est à la côte 38 m (niveau local).

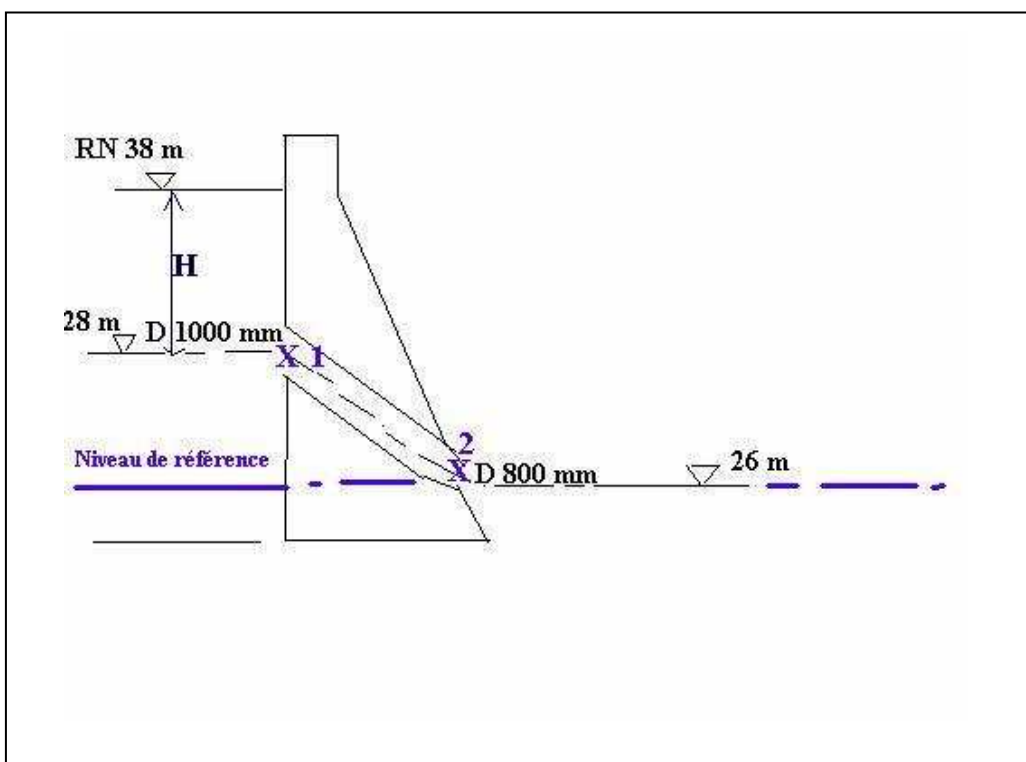
Les pertes de charges linéaires et singulières sont supposées négligeables.

- 1) calculer les vitesses en m/s et les débits d'eau en  $\text{m}^3/\text{s}$  à la sortie de la prise d'eau lorsque le niveau d'eau à l'amont correspond à la cote de la retenue normale (38m) et à la cote de 26m.



- 3) calculer les débits et les vitesses à l'entrée de la prise d'eau pour la cote de la retenue normale.
- 4) les pertes de charges sont supposées non négligeables et sachant que le débit à la sortie est évalué à  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  pour la cote de la retenue normale. Calculer les pertes de charges.

**Réponses :**



$$1) Z_1 + P_1/\omega + V_1^2/2g = Z_2 + P_2/\omega + V_2^2/2g$$

$$2 + \omega H/H + V_1^2/2g = V_2^2/2g$$

$$12 + V_1^2/2g = V_2^2/2g \quad (1) \text{ d'autre part et d'après l'équation de continuité } Q_1 = Q_2 \text{ d'où :}$$

$$V_1 \Pi d_1^2/4 = V_2 \Pi d_2^2/4 \quad (2) \text{ soit } V_1 = 0,64 V_2 \quad (3).$$

En remplaçant  $V_1$  par sa valeur dans (1), on obtient  $V_2 = 20 \text{ m/s}$ , le débit correspondant est  $Q = VS$ , soit  $Q_2 = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

3) en amont de la galerie, on aura  $V_1 = 0,64 V_2$ , soit  $V_1 = 12,8 \text{ m/s}$ , le débit sera toujours de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  (**principe de continuité**).

4) avec le débit de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ , et en appliquant  $Q = VS$ , on obtient  $V_2 = 12 \text{ m/s}$ , en appliquant le principe de continuité, on obtient une vitesse en amont de  $V_1 = 7,7 \text{ m/s}$ .

En appliquant toujours le principe de Bernoulli entre les points 1 et 2, on obtient :

$$2 + 10 + V_1^2/2g = V_2^2/2g + \Delta H, \text{ soit en remplaçant } V_1 \text{ et } V_2 \text{ par leur valeurs, } \Delta H = 16,2 \text{ m}$$

### Exercice :

Les apports d'eau et les fournitures du barrage pour le 1<sup>er</sup> trimestre de la 1<sup>ère</sup> année sont consignés dans le tableau suivant :

	Septembre	Octobre	Novembre
Apports	15,1	16,8	17,6
Irrigation	10	8	6
AEP	2	2	2
Turbinage	5	5	5
Evaporation	1,8	1,5	1

Calculer la réserve du barrage au début de chaque mois sachant que la réserve au début du mois de Septembre est de  $380 \text{ Mm}^3$ .

### Réponses :

Pour le mois de Septembre :  $380 + 15,1 - (10+2+5+1,8) = 376,3 \text{ Mm}^3$ , c'est la réserve au début du mois d'octobre.

Pour le mois d'octobre :  $376,3 + 16,8 - (8+2+5+1,5) = 376,6 \text{ Mm}^3$ , c'est la réserve au début du mois de novembre.

Pour le mois de novembre :  $376,6 + 17,6 - (6+2+5+1) = 380,2 \text{ Mm}^3$ , c'est la réserve au début du mois de décembre.

### Exercice :

La dégradation spécifique d'un bassin versant est de  $22 \text{ T/Km}^2/\text{an}$ , sachant que la superficie du bassin versant est de  $514 \text{ Km}^2$ , calculer l'érosion globale du bassin en  $\text{T/an}$ .

### Réponse :

L'érosion globale sera :  $514 \times 22 = 11308 \text{ Tonnes/an}$ .