

Bureau d'Etudes en Hydroélectricité

Etude d'un cas pratique

15/03/2018 - Quentin Morel



Nota Général et informations

Ce cas pratique est volontairement orienté comme un travail d'ingénierie, permettant d'appréhender le métier réel d'ingénieur en hydroélectricité. Il reste cependant un vrai travail scientifique. Les calculs et raisonnement nécessiteront donc d'excellentes explications, et un détail méthodologique important. Tous les commentaires d'interprétation « physiques » sont bien entendu attendus.

- Certains points n'auront pas été vus en cours ou lors de la présentation. De même, certaines données nécessaires ne seront pas fournies dans le sujet. Les recherches internet sont donc encouragées, tout comme les discussions techniques avec l'ingénieur responsable du TD.
- L'ensemble des calculs devront être réalisés sous Excel ou tableur équivalent.
- Certaines questions sont complexes, et nécessitent une lecture très attentive de l'énoncé et de l'ensemble des données mises à disposition
- Le rendu devra comprendre le rapport de TD d'une quinzaine de pages, ainsi que le ou les fichiers Excel justifiant les calculs.
- Comme pour un rendu professionnel, une attention particulière sera portée sur la mise en forme des documents, aussi bien du rapport que du ou des fichiers Excel.
- Les formules utilisées doivent être présentées de manière analytique dans le rapport avant d'être utilisées dans Excel

L'ensemble des rapports et documents doit être envoyé par mail le 16/03/2018 avant 10h45.

Contexte et premières données

On étudie dans ce cas pratique réalisé en binôme (ou trinôme, ayant à traiter une question supplémentaire) un aménagement hydroélectrique de haute chute, constitué de l'amont vers l'aval :

- d'une retenue d'altitude, formée par un barrage poids, permettant de stocker l'eau et de la capter pour la mener vers les ouvrages aval
- d'une conduite forcée partant du pied du barrage pour alimenter la centrale hydroélectrique plus bas dans la vallée
- d'une centrale hydroélectrique équipée d'une turbine, permettant la valorisation énergétique de la chute et du débit, et la restitution du débit turbiné à la rivière

En amont direct du barrage, le fond de la retenue est plat sur une distance l_1 puis remonte pour retrouver le terrain naturel. Les principales caractéristiques du site sont fournies ci-après. Ces données concernant l'ensemble du TD, ne pas hésiter à systématiquement s'y référer. Enfin, certaines données techniques spécifiques seront fournies à la fin de chaque paragraphe.

	Barrage
Longueur du barrage L_{crete}	60 m
Largeur du barrage en crête l_{crete}	A déterminer
Revanche du barrage	50 cm
	Retenue d'eau
Altitude maximale de retenue d'eau	1000 m NGF
Altitude minimale d'Exploitation de la retenue	975 m NGF
Longueur plane de la retenue l_1	100 m
Pente du fond de retenue à l'amont τ	5%
	Conduite forcée
Longueur de la conduite forcée	500 m
Diamètre de la conduite forcée	1,8 m
	Turbine
Puissance Maximale Brute de l'installation	30 MW
Altitude de la turbine	855 m NGF

FIGURE 1 – Données initiales du problème

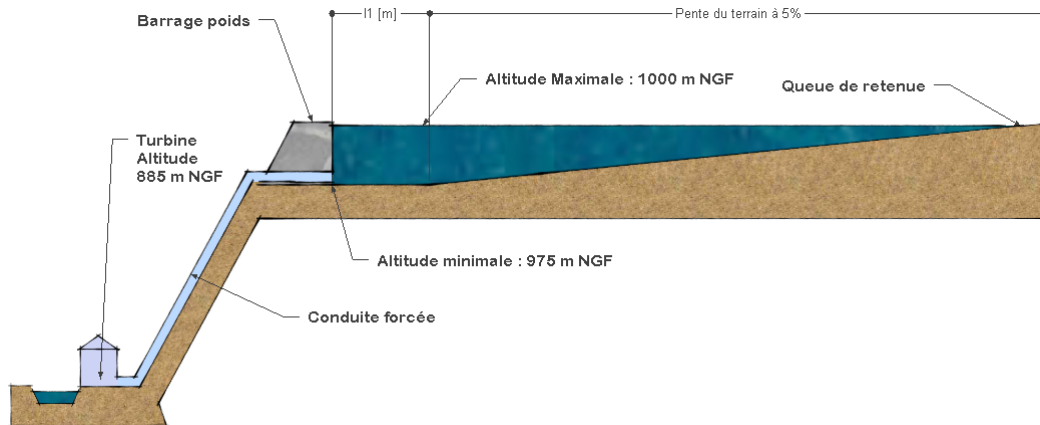


FIGURE 2 – Coupe de l'aménagement étudié (sans respect d'échelle)

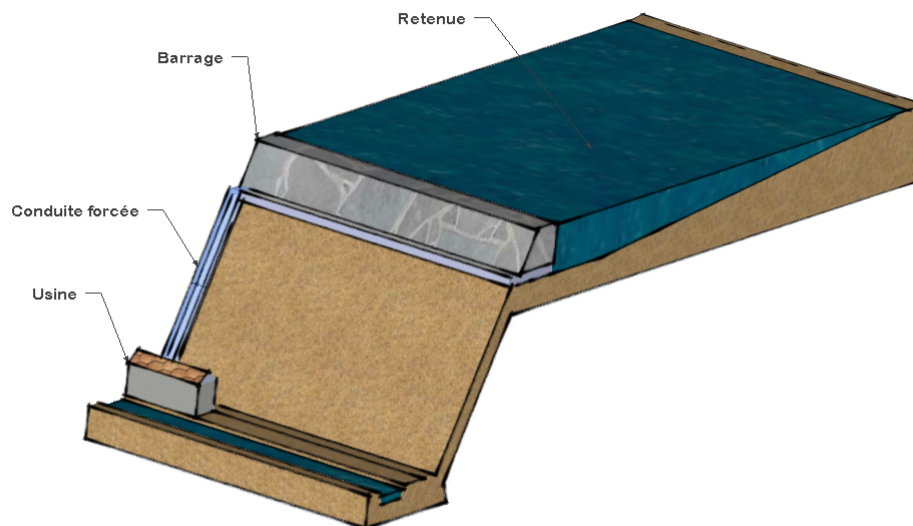


FIGURE 3 – Vue 3D schématique de l'aménagement (sans respect d'échelle)

1 Etude préliminaire du barrage poids

1.1 Etude structurelle

On considère un barrage poids en béton armé, permettant de retenir le lac sur une hauteur $H = 25 \text{ m}$. Pour simplifier, le barrage est assimilé à l'adjonction d'une section rectangulaire amont et d'une section triangulaire aval, monolithique, comme schématisé sur la figure 5. On cherche dans ce paragraphe à dimensionner ce barrage pour la reprise des efforts de poussée hydraulique.

1. Donner la forme de la poussée hydrostatique dF sur une surface dS du parement amont du barrage.
2. En déduire la poussée totale F sur la barrage.



FIGURE 4 – Photographie d'un barrage poids

3. En considérant que le barrage reprend la poussée hydraulique uniquement par frottement via son poids sur le sol en place, calculer complètement les dimensions du barrage, revanche incluse. En déduire la largeur du barrage en crête, l_{crete}

Données techniques :

- ➔ la revanche du barrage est l'écart entre la hauteur d'eau maximale et la crête du barrage
- ➔ Le coefficient de frottement béton/sol est issu d'investigations géotechniques. Il vaut ici $\Phi = 30 \text{ deg.}$
- ➔ la masse volumique du béton armé vaut $\rho_b = 2500 \text{ kg/m}^3$
- ➔ Le parement amont du barrage est vertical
- ➔ Le parement aval du barrage possède une pente 1H/2V

1.2 Etude de la capacité de retenue

En pied de barrage, le terrain naturel sous la retenue dispose d'une longueur l_1 plane, puis la pente du terrain naturel est établie à $\tau = 5\%$ pour récupérer le terrain naturel, comme indiqué sur la figure 2.

1. Calculer la longueur totale maximale de la queue de retenue
2. Donner la capacité volumique maximale de retenue du barrage
3. Calculer la loi $V = f(h(t))$, donnant le volume de la retenue en fonction de la hauteur d'eau dans la retenue. On considérera que la hauteur variable respecte $h(t) \in [0; 25]$
4. Présenter le graphe $V = f(h)$

2 Evaluation de l'énergie produite par l'installation

On souhaite équiper une centrale hydroélectrique en aval du barrage, dont les turbines sont situées à l'altitude z_{turb}

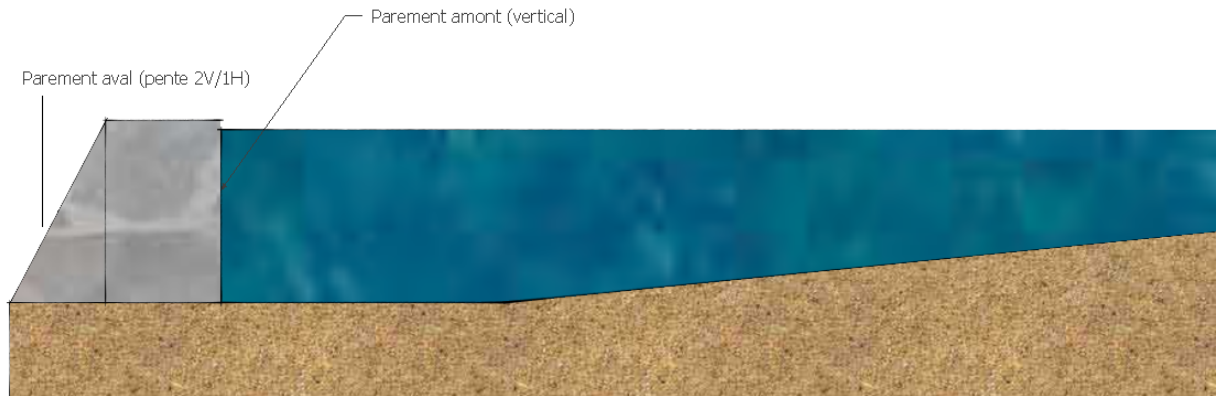


FIGURE 5 – Profil en long de la retenue et coupe sur barrage

2.1 Calcul de la loi de chute nette

1. Rappeler la formule permettant de calculer les pertes de charge ΔH dans la conduite forcée
2. Après avoir calculé le débit maximal turbinable pour respecter la puissance brute de l'installation, calculer les pertes de charge pour le débit d'équipement, et exprimer la loi de variation de ces pertes en fonction du débit sous la forme $\Delta H(Q) = \alpha Q^2$, avec α constante.
3. Tracer le graphique $H_n = f(Q_{turb})$ pour $Q_{arm} \leq Q_{turb} \leq Q_e$.

Données techniques :

- Les pertes de charge singulières seront négligées
- Le coefficient de débit peut être calculé en utilisant la formule de Haaland

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1,8 \log \left(\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{k_s}{3,7D} \right)^{1,11} \right)$$

- On considérera une rugosité pour la conduite forcée de $k_s = 0,1 \text{ mm}$

2.2 Calcul de l'énergie produite à débit constant

Dans cette partie, on considère que l'apport naturel en eau est négligeable (il n'y a pas d'eau dans la rivière alimentant le barrage). On ne dispose que de l'eau stockée dans la retenue.

Un incident réseau nécessite la mise en oeuvre en urgence de la puissance maximale de la centrale hydroélectrique. Dans toute cette partie, on fera donc l'approximation que $Q_{turbine} = cte = Q_e$.

Cette situation intervient lorsque la retenue est complètement remplie. Dans toute cette section, on note $V(t)$ le volume de la retenue à un instant t .

1. Déterminer la puissance nette injectée sur le réseau au moment du démarrage de l'installation
2. Déterminer en combien de temps la retenue est complètement vidée
3. Exprimer la valeur de l'énergie infinitésimale dE produite par l'installation électrique pendant un laps de temps dt
4. Ecrire l'évolution du volume $V(t)$ en fonction du temps et du volume initiale de la retenue V_0

5. Exprimer ce volume $V(t)$ en fonction des données géométriques de l'installation, à un instant t
6. En isolant dt et par intégration sur la variable $H(t)$, calculer le productible E en MWh attendu pendant toute la période de vidange
7. **Obligatoire Trinôme - Bonus pour binômes** : Indiquer la cote NGF de la retenue quand on aura pu fournir $E_{urgence} = 100 MWh$ au réseau. En combien de temps y parviendra-t-on ?

Données techniques :

- Le débit d'armement de la turbine est égal à 10% de son débit d'équipement
- On considère que le rendement de la turbine est constant, fixé à $\eta_{turb} = 92\%$
- On considère que le rendement de l'alternateur est constant, fixé à $\eta_{alt} = 99\%$

2.3 Calcul de l'énergie produite par gestion du remplissage

Dans cette section, on considère un mode de fonctionnement où le niveau du barrage est imposé mensuellement. Ceci peut être le cas pour maintenir une cote dite *touristique* pour l'été, par exemple. Dans cette configuration, on turbine uniquement les débits arrivant dans la rivière.

La chronique des débits journaliers de la rivière est fournie dans le fichier excel à télécharger sur le site du département

1. Etablir la loi de turbinage $Q_{turb} = f(Q_{riv})$ en fonction des différents débits caractéristiques de la machine et de l'aménagement.
2. A partir des débits journaliers, calculer le productible annuel attendu pour cette installation

Données techniques :

- Le débit réservé est fixé à sa valeur réglementaire minimale
- Le remplissage de la retenue est géré via les cotes suivantes :

Mois	Cote NGF
Janvier	1000
Février	990
Mars	980
Avril	980
Mai	980
Juin	1000
Juillet	1000
Aout	995
Septembre	990
Octobre	990
Novembre	980
Décembre	985

FIGURE 6 – Gestion altimétrique mensuelle de la retenue

2.4 Question obligatoire pour le trinôme, bonus pour les autres) : Aide à la décision

Après une expertise, le propriétaire de l'installation se rend compte que son barrage souffre d'une mal-façon. En effet, une fuite en pied de barrage se propage, occasionnant une perte de débit. Cette fuite est assimilable à un passage dans un orifice de diamètre D_{fuite} constant.

Cette fuite ne présentant aucun risque pour les personnes, le propriétaire souhaite toutefois intervenir et réparer cette fuite si la perte financière est supérieure à **1,5%** de sa recette actuelle (celle avec la fuite. . .)

Indiquer au propriétaire s'il doit ou non réparer son ouvrage.

Cette question fait intervenir de nombreux calculs intermédiaires. La rédaction de la méthodologie employée et du cheminement doit être clairement explicitée dans le rapport de TD.

Données techniques :

- ✦ Le diamètre de la fuite est de $D_{fuite} = 300mm$
- ✦ Le débit transitant par un orifice en charge peut être calculé par $Q = \mu_o S \sqrt{2gH}$
 - μ : coefficient de débit, $\mu_o = 0,6$
 - S : section de la fuite
 - H : hauteur d'eau sur l'orifice
- ✦ Sur le marché européen *SPOT*, le prix de revente de l'électricité peut être approché par les valeurs mensuelle suivantes :

Mois	Prix [€/MWh]
Janvier	70
Février	70
Mars	60
Avril	60
Mai	35
Juin	25
Juillet	20
Aout	15
Septembre	30
Octobre	45
Novembre	50
Décembre	60

FIGURE 7 – Prix moyen de valorisation de l'énergie sur le marché SPOT