



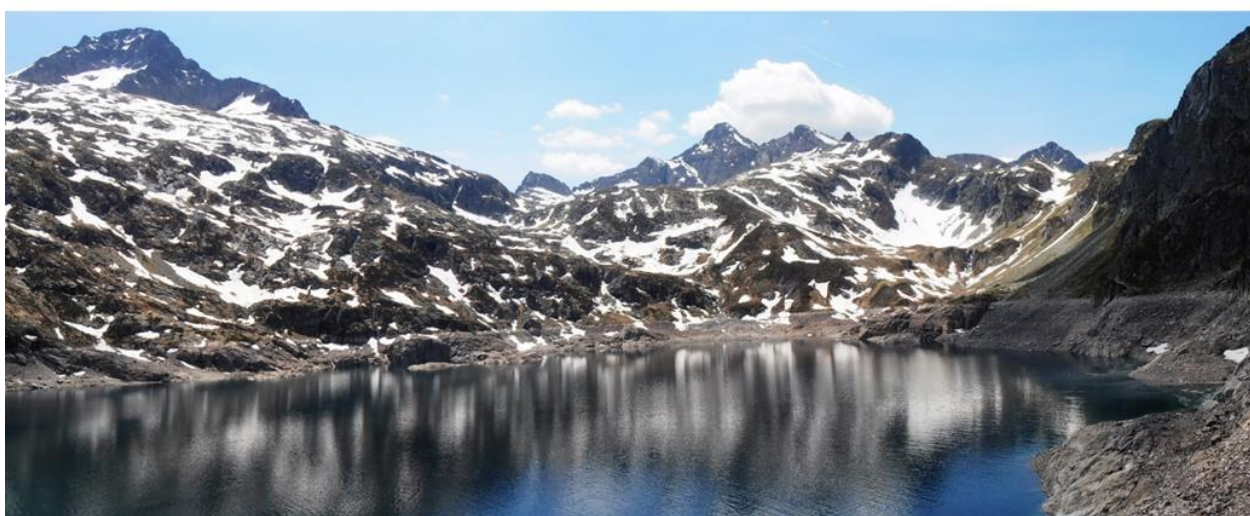
setec
énergie environnement

Quentin Morel (N08)
Ingénieur chef de projet hydroélectricité
quentin.morel@setec.fr

191 Cours Lafayette
69 458 LYON CEDEX 06
www.energy.setec.fr



BUREAU D'ETUDES HYDROELECTRICITE



Département « Energie & Fluides » 2A – 21 Mars 2017
Cours « Turbomachines – Energies hydraulique et éolienne »



Nota général et informations sur le bureau d'études

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 et échanges avec l'ingénieur responsable du TD.
- L'ensemble des calculs devront être réalisés sous Excel ou tableur équivalent.
- Le rendu devra comprendre le rapport de TD d'une quinzaine de pages, ainsi que le ou les fichiers Excel justifiant les calculs.
- Ce bureau études sera réalisé par binôme
- 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.

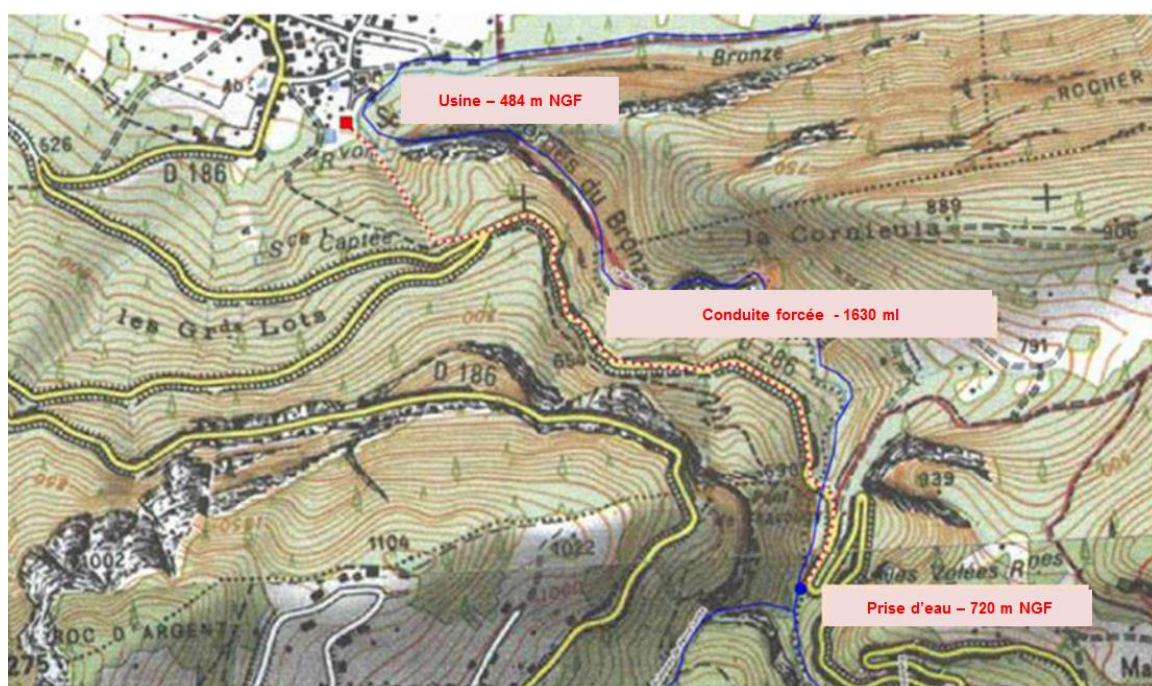
Rendu :

Les rapports de cas pratique et fichiers Excel associés devront être envoyés à quentin.morel@setec.fr le 23/03/2017 avant 12h00 (1 rapport par binôme).

Contexte et premières données

On étudie dans ce cas pratique l'étude d'avant-projet d'une petite centrale hydroélectrique.

Elle est installée sur le cours d'eau du Bronze, sur la Commune de Bonneville (74 Haute Savoie).



Les principales caractéristiques de l'aménagement sont fournies ci-après :

Données	Valeur
Altitude de la prise d'eau	720 m NGF
Altitude de restitution	484 m NGF
Bassin versant de la prise d'eau	24,60 km ²
Bassin versant de la station de mesure	26,32 km ²
Longueur de conduite forcée	1630 ml
Type de conduite	Acier
Turbine	Pelton

Partie 1 : Ressource hydrologique et débits caractéristiques

Afin de pouvoir déterminer le productible envisageable d'une centrale hydroélectrique, il faut estimer la ressource en eau à partir de l'historique des débits.

*Le fichier Excel fourni contient la liste des débits journaliers du Bronze pendant une période de 1968 à 2013. **Ces débits sont ceux à la station de mesures.***

Question 1 : Hydromorphologie

- Décrire l'ensemble des phénomènes impliquant qu'en deux points distincts d'un même cours d'eau, le débit soit différent.

A ce stade, on considère que l'on peut calculer le débit à la prise d'eau par homothétie de surface de bassin versant par rapport à la station de mesure.

Question 2 : Module

- Définir et calculer le module Q_m du Bronze au droit du site de prise d'eau.

Question 3 : Débit réservé

- Donner la définition du débit réservé.
- Citer le texte de loi précisant la valeur minimum d'un débit réservé.
- En déduire le débit réservé minimal dans le cas de ce projet.

Question 4 : Débits caractéristiques

- Définir le débit d'équipement. Pour ce type d'installation, il sera égal à 1,53 fois le module.
- Définir le débit d'armement Q_a . Il est égal à 10% du débit d'équipement pour la turbine de ce projet

Indiquer le débit d'équipement et le débit d'armement associé dans le cadre de ce projet

Question 5 : Loi de fonctionnement

- En fonction des différents débits caractéristiques Q_e , Q_a et Q_r , donner la loi de fonctionnement de la centrale en fonction de la valeur du débit de la rivière au droit de la prise d'eau Q
- A partir des questions précédentes et en exploitant la courbe des débits classés dans la feuille Excel, représenter graphiquement cette loi de fonctionnement grâce à la courbe des débits turbinés classés, sur le même graphique que la courbe des débits classés.

On veillera à choisir les échelles du graphique pour assurer la lisibilité visuelle de l'impact des différents débits caractéristiques

Question 6 : Analyse des débits

Combien de jours par an obtient-on :

- Un débit supérieur au débit réservé ?

- Un débit permettant de commencer à turbiner ?
- La puissance maximale à la centrale ?

Partie 2 : Dimensionnement de la conduite forcée



Sur les ouvrages de haute et moyenne chute, une conduite forcée est un tuyau permettant l'acheminement des eaux à turbiner depuis la prise d'eau vers l'usine en contrebas.

Ces conduites peuvent avoir des diamètres allant de 200 mm pour les faibles débits jusqu'à plus de 6 m dans le cas notamment des STEP à fort débit d'équipement.

Ces conduites sont soumises à de nombreux efforts :

- Efforts hydrauliques
- Efforts thermiques
- Efforts des charges de remblais
- Efforts des charges routières
- Etc ...

Le but de cette section est de présenter quelques calculs de dimensionnement type d'une conduite forcée au stade d'avant-projet en réalisant quelques vérifications d'ordres pratiques.

Question 1 : Diamètre de la conduite forcée

A ce stade des études, on veut déterminer le diamètre intérieur de la conduite forcée tel que les pertes de charge totales restent inférieures à 10% de la chute brute.

Pour des contraintes de fabrication, les gammes de diamètres sont toutes des multiples de 50 mm.

- Indiquer la chute brute du projet
- Rappeler la formule de pertes de charge linéaire. On notera f le coefficient de pertes de charge.
- Calculer le diamètre intérieur compris entre 100 mm et 1000 mm en retenant pour diamètre final le diamètre optimal.
- Préciser les pertes de charge pour le diamètre retenu.

Données

- on utilisera la formule de Haaland pour la détermination du coefficient de pertes de charge f

$$f = \frac{1}{\left(1.8 \log \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{k_s}{3.71 D} \right)^{1.11} \right)\right)^2}$$

Avec

- ✓ f le coefficient de perte de charge
- ✓ Re le nombre de Reynolds de l'écoulement
- ✓ k_s la rugosité du matériau, valant 0,1 mm pour une conduite acier neuve
- ✓ D , le diamètre intérieur de la conduite forcée
- les pertes de charge singulières (coudes, etc...) sont négligées

Question 2 : Conditions d'essais de la conduite

La phase d'essai de la conduite forcée consiste à monter en pression par ajout d'eau dans une conduite forcée fermée à ces deux extrémités, et équipées de manomètres.

Dans le cadre de ce projet, la pression d'épreuve est imposée en pied de conduite à :

$$P_{\text{epreuve,usine}} = 1,2 P_{\text{stat,usine}} + 5 \text{ bar}$$

- Calculer la pression d'épreuve à l'usine
- En déduire la loi de pression en un point d'altitude z quelconque de la conduite forcée. La représenter sur un graphe $P_{\text{épreuve}}=f(z \text{ NGF})$
- Pendant les essais, on observe une fuite importante sur la conduite enterrée. Indiquer une méthodologie pour localiser précisément cette fuite.

Question 3 : Epaisseur de la conduite

Le calcul de l'épaisseur minimale d'une conduite est définie par :

$$e_{\text{min}} = \frac{PD_{\text{ext}}}{2 \sigma_{\text{ad}}}$$

Avec :

- P : la pression interne [Pa]
- D_{ext} : le diamètre extérieur de la conduite [m]

- σ_{ad} : contrainte maximale admissible dans l'acier [Pa]

En considérant que l'on autorise l'acier à travailler à 75% de sa limite élastique pendant les essais, calculer l'épaisseur nécessaire de la conduite forcée, en prenant en compte :

- Une tolérance de 20% sur l'épaisseur sur la fabrication en atelier
- Puis une surépaisseur anticorrosion de 1 mm

Données :

- La conduite forcée est construite en acier S355 J₀

Question 4 : Vidange d'une conduite forcée (difficile).

Lors de la vidange de la conduite forcée, la hauteur de chute $H(t) = z(t) - z_{usine}$ diminue jusqu'à atteindre 0.

En réalisant un bilan de volume sur la conduite forcée (on s'aidera de la relation entre l'élément de longueur dl de conduite et la variation d'altitude dz), et en considérant que la vidange suit la loi d'orifice $Q(t) = \mu S_v \sqrt{2gH(t)}$, **estimer le temps de vidange de la conduite forcée.**

Données :

- Les pertes de charge sont négligées pendant la phase de vidange
- S_v est la section hydraulique de la vanne de vidange
- Applications numériques :
 - Diamètre de la vanne : 100 mm
 - Diamètre de la conduite forcée : calculé précédemment
 - Coefficient de débit $\mu = 0,6$

Partie 3 : Caractéristiques de la centrale, productible et recettes

Question 1 : Détermination de la puissance maximale brute

- Définir et calculer la PMB : Puissance Maximale Brute de la centrale
- Cette centrale est-elle sous le régime de la concession ou de l'autorisation ?
- A quoi la PMB correspondrait-elle « physiquement » ?

Question 2 : Energie hydroélectrique

L'énergie hydroélectrique s'obtient en intégrant la puissance sur la durée d'étude.

$$E = \int_0^T \rho g \eta Q H_n dt$$

Donner la signification et l'unité de chaque grandeur. Quelles grandeurs dépendent du temps ?

Question 3 : Calcul de productible

A partir de la courbe des débits classés établie précédemment, les données de rendement, et vos calculs précédents, construire un modèle Excel permettant de calculer le productible sur une année type.

- Présenter le graphique des productibles classés
- Indiquer le productible attendu dans le cas de cette centrale.
- Commenter l'ordre de grandeur de cette valeur (équivalent CO₂, nombre de foyers alimentés...)
- Commenter l'écart entre la puissance maximale brute et la puissance maximale réellement atteinte. Quelle puissance d'alternateur préconiserez-vous d'installer sur site ?

Données :

- *Le rendement de la turbine, pour des débits supérieurs au débit d'armement, est considéré constant à 90%*
- *Le rendement de l'alternateur est constant à 95%*
- *Les pertes de charge varient en αQ^2*

Question 4 : Recettes de l'exploitant

En fonction de la puissance installée, et de la réglementation en vigueur (voir ci-après), calculer le tarif d'achat total dont bénéficiera cette centrale. En déduire la recette brute de l'exploitant.

Données :

- *Pour les centrales de petites puissances dont l'autorisation a été obtenu avant 2016, le tarif d'achat est constant, et ne dépend donc pas de la saison ou de l'heure de la journée*

CONTRAT D'ACHAT POUR LES INSTALLATIONS UTILISANT L'ENERGIE HYDRAULIQUE (H07)

La valeur de K au 01/01/2015 est de : **1,16399**

En métropole continentale + Corse :

En c€/kWh	Tarif T	Prime MP		
		0 < P ≤ 400 kW	600 kW < P ≤ 2 500 kW	P > 3 000 kW
Tarif à une composante	7,065	2,910	0,582	0,000
Tarif à deux composantes				
Hiver	9,754	4,016	0,803	0,000
Eté	5,156	2,118	0,419	0,000
Tarif à quatre composantes				
Hiver, HP	11,861	4,889	0,978	0,000
Hiver, HC	6,926	2,852	0,570	0,000
Eté, HP	5,296	2,177	0,431	0,000
Eté, HC	4,947	2,037	0,407	0,000
Tarif à cinq composantes				
Hiver, P	20,626	8,497	1,699	0,000
Hiver, HP	10,383	4,272	0,850	0,000
Hiver, HC	6,926	2,852	0,570	0,000
Eté, HP	5,296	2,177	0,431	0,000
Eté, HC	4,947	2,037	0,407	0,000
Houlomotrice - Marémotrice	17,460			
Majoration de qualité	1,956			

- On retiendra le tarif à **une seule composante**
- Seules les composantes T et MP seront prises en compte pour le calcul de la recette

Question 5 : facteur de charge

- Donner le « facteur de charge » de l'installation
- Commenter cette valeur, notamment vis-à-vis d'autres type d'énergie.

Question 6 : Impact environnemental

Après étude du dossier de demande d'autorisation, la DDT (Direction Départementale des Territoires) et l'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques) considèrent que le débit réservé doit être de 15% au lieu de 10% pour prendre en compte la population piscicole.

- Evaluer l'impact énergétique et financier pour votre client, le développeur de la centrale.

Question 7 : temps de retour

Cet aménagement a été chiffré à 4,3 M€. Déduire le temps de retour brut de l'investissement.

Partie 4 : Optimisation et calcul du taux de rentabilité interne

Question 1 : Optimisation technico-économique du diamètre de la conduite

Cette question nécessite l'utilisation d'une grande partie des méthodes utilisées ci-avant.

Dans la première partie du TD, on a calculé le diamètre intérieur de la conduite forcée en considérant que l'on voulait limiter les pertes de charge à 10% de la chute brute.

Dans cette question, on veut optimiser le diamètre d'un point de **vue technico-économique**.

En considérant que le prix de la conduite n'est lié qu'à sa masse, calculer le diamètre économique, et l'épaisseur associée, c'est-à-dire celui qui maximise la production, et donc la recette, en minimisant l'**investissement total** de l'installation.

On minimisera pour ce faire le ratio :

$$\frac{I}{R} = \frac{\text{Sommes des investissements}}{\text{Somme des recettes}}$$

L'investissement total dépend de la conduite forcée mais également de tout le reste de l'installation, on écrira, pour l'optimisation $I = I_{\text{conduite}} + I_0$, avec I_0 la part fixe (prise d'eau, bâtiment, turbine, etc...)

Données :

- La gamme de diamètre est comprise entre 0,1 m et 1 m, par pas de 50 mm
- Toutes les données de rugosité et rendement sont les mêmes que précédemment
- $I_0 = 3 \text{ M€}$
- Coûts d'installation de la conduite forcée : 10 € / kg

Question 2 : Calcul du taux de rentabilité interne (TRI)

Le TRI est un outil de décision à l'investissement. Un projet d'investissement ne sera généralement retenu que si son TRI prévisible est suffisamment supérieur au taux bancaire, pour tenir compte notamment de la prime de risque propre au type de projet.

- En reprenant les données économiques de la partie 3, calculer le TRI sur 20 ans à euro constant.

$$VAN = 0 = \sum_{n=1}^{20} \frac{FT_n}{(1 + TRI)^n} - I$$

Avec FT_n le flux de trésorerie de l'année n

- Comparer au taux du livret A ☺