

Le barrage de Grand'Maison est un barrage hydroélectrique situé dans le département de l'Isère. Avec une puissance de 1800MW à débit maximal, l'usine qui lui est associée forme le plus puissant ensemble hydroélectrique français, correspondant à 9% de la puissance du parc hydraulique exploité par EDF en France. La figure 1 donne une vue d'ensemble de l'installation. La retenue de Grand'Maison peut contenir près de 140 millions de m³ d'eau, emmenée vers la retenue du Verney par une galerie d'amenée et trois conduites forcées construites en parallèle. La conduite d'amenée descend en pente douce depuis le barrage haut jusqu'à une cheminée d'équilibre de 200 m de hauteur qui permet de réguler la pression à l'ouverture et la fermeture des vannes (dispositif anti coup de bélier). À partir de ce lieu, l'eau est amenée à l'altitude du Verney par les trois conduites forcées de grande pente.

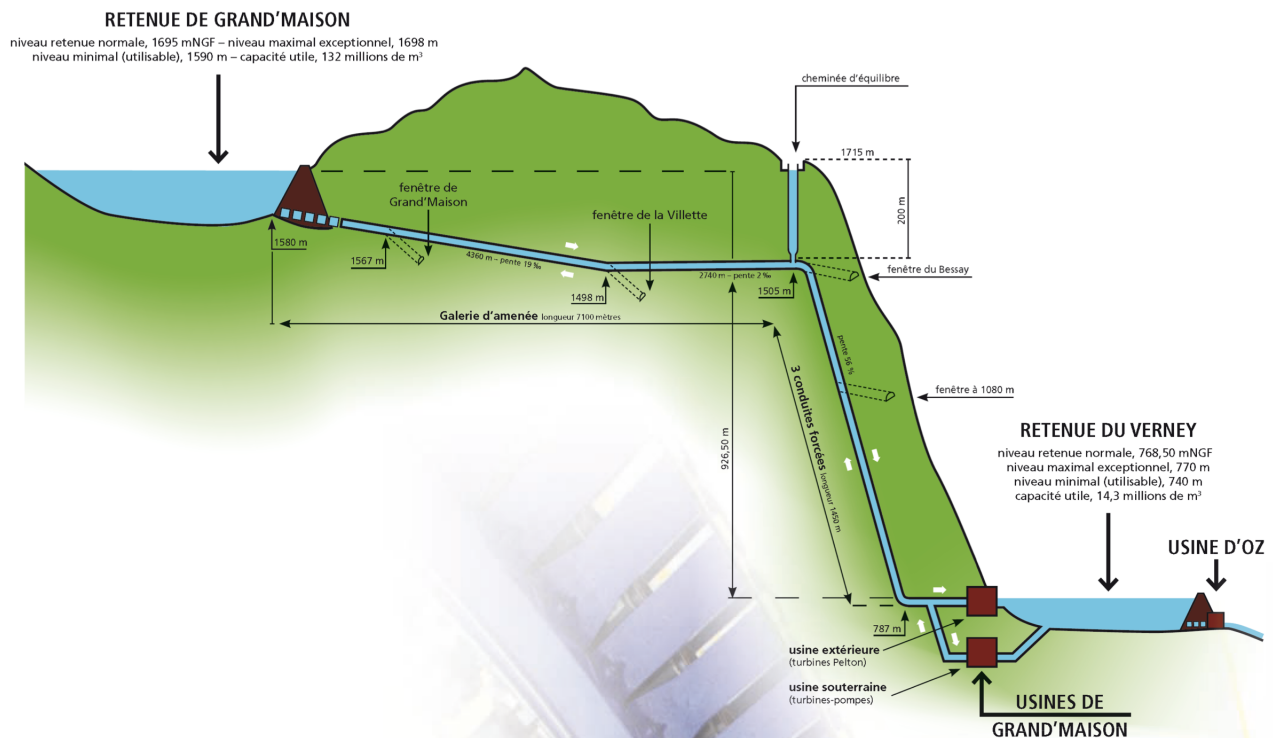


FIGURE 1 – Schéma général de l'installation hydroélectrique de Grand'Maison. Source : EDF

Hypothèses et données :

- ▷ Seul le régime permanent est considéré dans ce problème ;
- ▷ L'eau est un liquide incompressible, de masse volumique $\rho = 1.10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ et de viscosité $\eta = 1.10^{-3} \text{ Pa.s}$;
- ▷ La pression atmosphérique est supposée uniforme, égale à $P_0 = 1 \text{ bar}$;
- ▷ L'axe z est vertical orienté vers le haut, d'origine $z = 0$ au niveau du Verney où émergent les conduites forcées ;
- ▷ Le point d'entrée de la conduite d'amenée se trouve à une altitude $z_e = 800 \text{ m}$ au dessus du Verney et sous une hauteur d'eau $H = 140 \text{ m}$.

I - Etude de la centrale hydroélectrique

1. Donner l'ordre de grandeur de la puissance électrique produite par une centrale thermique, par une tranche de centrale nucléaire ou par un parc éolien en mer.
2. Quel inconvénient, lié à la production électrique, est associé à l'éolien, terrestre surtout, et au solaire ?

A - Dimensionnement du barrage amont

Le barrage amont est un barrage poids (voir figure 2), constitué d'une structure en béton de longueur $L = 550$ m dans la direction (Oy) dont la coupe transversale peut être modélisée par un triangle rectangle de hauteur $H = 140$ m égale au niveau d'eau maximal du barrage et de base d que l'on cherche à dimensionner.

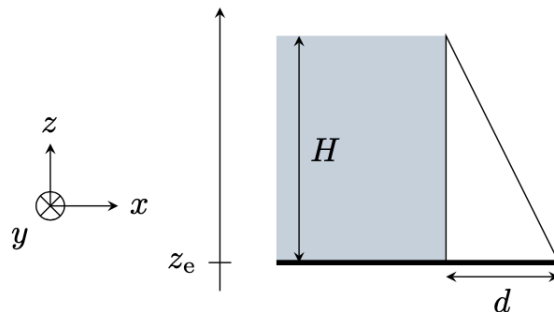


FIGURE 2 – Barrage poids

3. Justifier qualitativement que l'eau dans la retenue amont peut être supposée en équilibre hydrostatique.
4. Déterminer le champ de pression dans la retenue amont $P(z)$.
5. Montrer que la résultante des forces pressantes exercées par l'eau sur le barrage vaut

$$\vec{F}_p = \left(P_0 + \rho g \frac{H}{2} \right) HL \vec{u}_x$$

6. On donne la masse volumique du béton $\rho' = 3.10^3$ kg.m⁻³. Exprimer le poids $\vec{P}$ du barrage.
7. Un barrage poids doit être dimensionné de telle sorte que $F_p < \frac{4}{3}P$. En déduire la valeur minimale de d .

B - Bilan de puissance

Pour aller de la retenue de Grand-Maison jusqu'à l'usine hydroélectrique, l'eau circule d'abord dans une conduite d'amenée de diamètre $D = 7$ m et de longueur $L = 7$ km, jusqu'à la verticale de la cheminée d'équilibre. Cette conduite d'amenée se sépare ensuite en trois conduites forcées identiques, de diamètre $d < D$ et de longueur $l = 1500$ m. Chaque conduite forcée est envoyée vers un bloc turbine en sortie duquel l'eau a une vitesse nulle et une pression égale à la pression

atmosphérique. Le barrage fonctionne de telle sorte que la vitesse de l'eau est d'environ 5 m.s^{-1} dans la galerie d'amenée et 15 m.s^{-1} dans les conduites forcées.

8. Déterminer le débit volumique Q entre la retenue de Grand'Maison et la retenue du Verney. En déduire le diamètre des conduites forcées. On prendra $1/\sqrt{3} \simeq 0,6$
9. Déterminer la puissance maximale fournie aux turbines.
10. Définir le phénomène de perte de charge. Rappeler ce qui distingue les pertes de charge régulières et singulières.

Les pertes de charge régulières peuvent être calculées par la relation empirique de Darcy-Weisbach,

$$\tilde{h} = \lambda \frac{V^2}{2gD} L$$

avec V la vitesse de l'écoulement, D le diamètre et L la longueur de la conduite dans laquelle il a lieu, et λ un coefficient de perte de charge sans dimension. La valeur de λ peut être déterminée à partir du diagramme de Moody, représenté figure 3. Elle dépend du nombre de Reynolds de l'écoulement et/ou de la rugosité relative de la conduite ε_r , définie comme le rapport entre la rugosité absolue ε (hauteur caractéristique des aspérités sur la paroi) et le diamètre D , $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{D}$.

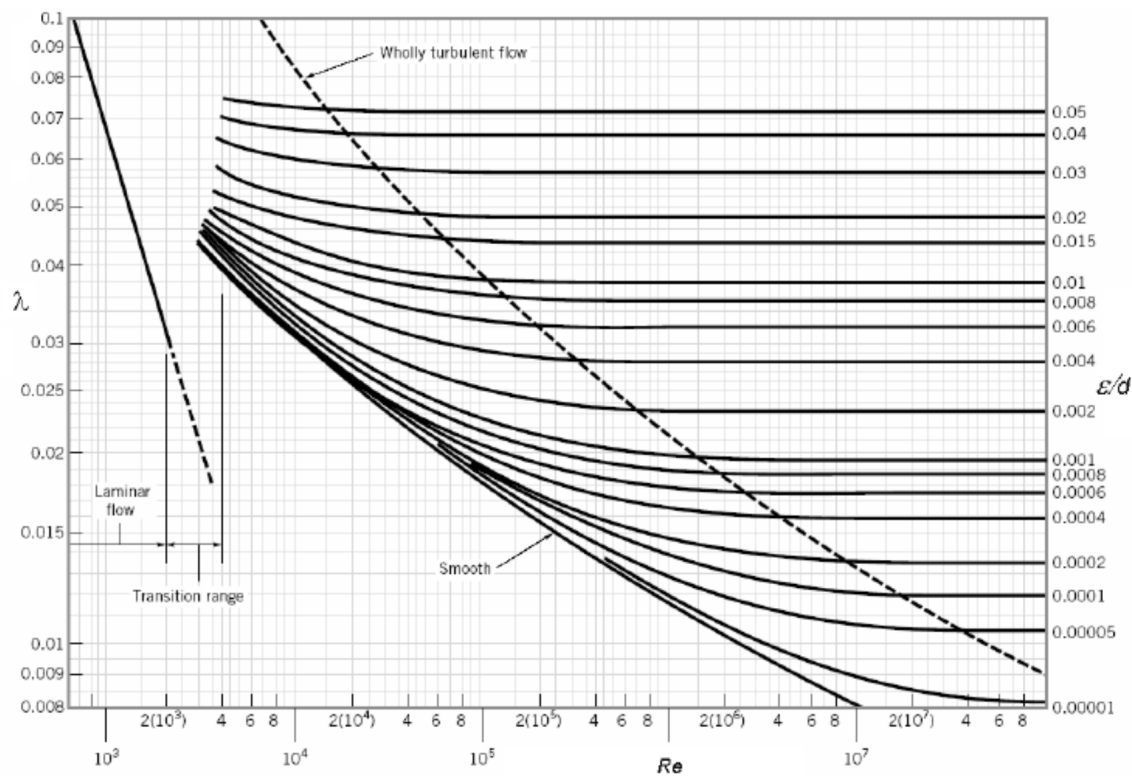


FIGURE 3 – Diagramme de Moody

11. Vérifier que λ est sans unité.
12. Calculer le nombre de Reynolds dans la conduite d'amenée. L'écoulement est-il laminaire ou turbulent ?
13. La conduite d'amenée est en béton, de rugosité $\varepsilon = 0,7 \text{ mm}$. Déterminer le coefficient de perte de charge λ .

14. En déduire la perte de charge régulière totale dans la conduite d'amenée, exprimée en hauteur d'eau équivalente $\tilde{h}_a$.

La perte de charge dans chacune des conduites forcées se calcule par un raisonnement analogue et vaut $\tilde{h}_f = 55$ m.

15. En déduire la puissance réellement fournie par l'écoulement aux turbines.

C - Fonctionnement en pompage-turbinage

Les deux retenues de Grand'Maison (en amont) et du Verney (en aval) ont la particularité de constituer une station de transfert d'énergie par pompage, abrégée STEP. Certaines des turbines de l'installation de Grand'Maison peuvent également fonctionner en pompe et permettent de remonter l'eau de la retenue du Verney vers la retenue de Grand'Maison avec un débit $Q' = 135 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Lorsque la production électrique est supérieure à la demande, l'eau est ainsi remontée (phase de pompage) puis peut être libérée pour produire à nouveau de l'électricité (phase de turbinage) lorsque la production a baissé : entre temps, l'énergie est stockée sous forme d'énergie potentielle. Cela permet d'optimiser l'adéquation entre production et consommation, ce qui est un enjeu crucial pour l'insertion massive des sources renouvelables intermittentes (principalement solaire et éolien) sur les réseaux électriques.

16. Quel intérêt de pouvoir pomper de l'eau de l'aval à l'amont d'un barrage du point de vue de la production électrique globale d'un pays ?
17. Expliquer simplement pourquoi le rendement de l'opération de pompage turbinage doit être estimé à partir des travaux massiques plutôt que des puissances indiquées.
18. En exploitant le résultat de la question 15., déterminer le travail indiqué massique fourni par l'eau à la turbine lors de la phase de turbinage.
19. Déterminer le travail indiqué massique à fournir lors de la phase de pompage. Pour le débit Q' , la perte de charge totale vaut $\tilde{h}' = 100$ m.
20. En déduire le rendement énergétique r d'un cycle de pompage-turbinage.

D - Cavitation

La cavitation est un phénomène très néfaste pour la durée de vie des conduites, et qu'il est absolument indispensable de neutraliser lors de la conception d'un barrage. Pour le comprendre physiquement, on suppose pour cette dernière partie que l'eau ne s'écoule que dans une unique conduite de diamètre D uniforme et on néglige les pertes de charge.

21. En supposant que cette conduite débouche à l'air libre, déterminer la vitesse de l'eau en sortie de barrage.
22. Montrer qu'au sein des conduites la pression $P(z)$ évolue avec l'altitude selon

$$P(z) = P_0 \left(1 - \frac{z}{z_0} \right)$$

avec z_0 à exprimer en fonction des données. Montrer que la pression s'annule à une hauteur z à estimer numériquement. Que penser physiquement de ce résultat ?

23. En s'appuyant sur un diagramme (P, T) à tracer sur la copie, expliquer le phénomène physique qui a lieu avant que la pression ne s'annule. Comment nomme-t-on la pression à laquelle il a lieu ?

Pour contrer la cavitation, on dispose à l'extrémité libre de la conduite une tubulure de longueur négligeable et de section décroissante appelée injecteur, schématisé figure 4, de diamètre de sortie δ .

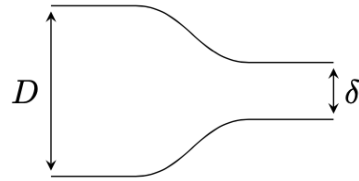


FIGURE 4 – Injecteur

- 24.** Exprimer $P(z)$ en présence de l'injecteur et en déduire que la cavitation disparaît si δ est plus faible qu'une valeur limite δ_0 .

1