



## 17 EXERCICES DE STOCKAGE GRAVITAIRE

### Exercice 17.2.1 : Stockage par pompage-turbinage

Une centrale à pompage hydroélectrique fournit une puissance de 10MW pendant 7h. Un tunnel de 750m (hauteur) relie le réservoir du haut (lac) à celui du bas (caverne creusée dans la montagne).

### QUESTIONS

**Question 1** : Quel est le débit massique d'eau ?

**Question 2** : Quelle est la taille minimale (volume) du réservoir dans la montagne ?

## RÉPONSES

- 1)  $P = g \cdot h \cdot m/t \Rightarrow m/t = P/g \cdot h \Rightarrow m/t = 10^6 / (9.81 \cdot 750) = 1,36 \text{ e}3 \text{ kg/s}$
- 2)  $V = m/t \cdot t / \rho = 1,4 \text{ e}3 \cdot 7 \cdot 3600 / 1000 = 34 \text{ 250 m}^3$



## Exercice 17.2.2 : La STEP

Une STEP est caractérisée par un dénivelé de 926 m entre la hauteur de la turbine et la fond du réservoir supérieur. Son réservoir supérieur à un volume de 134,8 hm<sup>3</sup>.

**PRODUCTION :** Les alternateurs ont une puissance utile de 157 MW et un rendement de 98,5%. Les 4 turbines Pelton ont un rendement de 90%.

**CONSOMMATION :** Les 8 machines synchrones (alternateurs/moteurs) accouplées ont une puissance électrique de 149 MW avec un rendement de 98,1% et les turbines-pompes accouplées ont un rendement de 89,4% en turbine et 89,9% en pompe.

En une année, l'énergie électrique consommée pour le pompage est égale à 1720 GWh.

## QUESTIONS

**Question 1 :** Calculer l'énergie potentielle de l'eau stockée dans le barrage lorsqu'il est plein (en J puis en MWh).

**Question 2 :** Calculer le rendement global des turbines – pompes en fonctionnement « pompe » et en déduire l'énergie transférée à l'eau pendant une année. Évaluer le nombre de fois qu'une même quantité d'eau est turbinée en une année.

**Question 3 :** La puissance maximale en production est égale à 1690 MW pendant une heure : les alternateurs reliés aux turbines Pelton sont utilisés à leur puissance utile, ceux reliés aux turbines – pompes (Francis) fournissant le complément. Calculer l'énergie mécanique nécessaire et en déduire la quantité d'eau turbinée.

**Question 4 :** La puissance de pointe est égale à 1420 MW pendant 172 heures (la répartition de puissance suit le même principe que pour la question précédente). Calculer l'énergie mécanique nécessaire et en déduire la quantité d'eau turbinée. Combien de temps faut-il pour remonter la même quantité d'eau du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur si toutes les pompes sont en fonctionnement ?

## RÉPONSES

**Question 1 :** Calculer l'énergie potentielle de l'eau stockée dans le barrage lorsqu'il est plein (en J puis en MWh).

$$E = mgh = \rho \cdot V \cdot g \cdot h = 1000 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 134,8 \text{e}6 [\text{m}^3] \cdot 9,81 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot 926 [\text{m}]$$

$$= 1,2245 \text{e}15 [\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}] \Rightarrow 340147 \text{ MWh} \Rightarrow 340 \text{ GWh}$$

On suppose une densité de 1000 kg/m<sup>3</sup> et il ne faut pas oublier que hm<sup>3</sup> c'est un million de m<sup>3</sup>.

**Question 2 :** Calculer le rendement global des turbines – pompes en fonctionnement « pompe » et en déduire l'énergie transférée à l'eau pendant une année. Évaluer le nombre de fois qu'une même quantité d'eau est turbinée en une année.

$$\text{Rendement turbines – pompe en pompage} = 0,981 \cdot 0,898 = 0,881$$

Il faut de limiter aux turbines Francis. Il faut tenir compte du rendement des machines électriques (synchrones) soit 98,1% et du rendement des pompes soit 89,8% .

Les pompes consomment 1720 GWh (électrique)/an, l'énergie mécanique (potentielle) transférée à l'eau est donc :

$$\text{Energie transférée à l'eau} = 0,881 \cdot 1720 = 1515 \text{ GWh}$$

Pour évaluer le nombre de fois qu'une même quantité d'eau est turbinée en une année, on divise l'énergie totale transférée à l'eau par l'énergie contenue par l'eau lorsqu'elle est dans le réservoir supérieur :

$$1515/340 = 4,455 \text{ fois le réservoir dans l'année}$$

**Question 3 :** La puissance maximale en production est égale à 1690 MW pendant une heure : les alternateurs reliés aux turbines Pelton sont utilisés à leur puissance utile, ceux reliés aux turbines – pompes (Francis) fournissant le complément. Calculer l'énergie mécanique nécessaire (on parle ici de l'énergie potentielle de l'eau dans le réservoir) et en déduire la quantité d'eau turbinée.

$$\text{Rendement turbines Francis – pompe en turbinage} = 0,981 \cdot 0,894 = 0,877$$

$$\text{Rendement turbines Pelton} = 0,985 \cdot 0,90 = 0,8865$$

$$\text{Energie nécessaire} = \frac{157 \cdot 4}{0,8865} \text{ (ou } 709 \text{ MW)} + \frac{1690 - 157 \cdot 4}{0,877} \text{ (ou } 1211 \text{ MW)} = 1920 \text{ MW pendant } 1 \text{ h}$$

Puissance utile des turbines Pelton  $P_t = 4 \times 157 = 628 \text{ MW}$  et rendement global de  $\eta_t = 0,985 \times 0,9 = 0,886$

La puissance mécanique (absorbée) est donc  $P_{mt} = 628 / 0,886 = 709 \text{ MW}$  soit 709 MWh pour une heure de fonctionnement. La puissance utile des turbines Francis est en théorie de  $8 \times 149 = 1192 \text{ MW}$ . Mais le maximum est de 1690 MW donc, les Francis ne pourront développer que ce qui reste soit  $1690 - 628 = 1062 \text{ MW}$ .

donc  $P_{mt} = 1062 / 0,877 = 1211 \text{ MW}$ .

Ainsi, on aura un total de 1920MW pendant 3600 s

$$\Rightarrow 1920e6 * 60 * 60 = 6.912e12 \text{ J}$$

Et le volume d'eau correspondant sera

$$V = \frac{E}{\rho gh} = \frac{6.91e12}{1000 * 9.81 * 926} = 7.6e5 \text{ m}^3 \Rightarrow 0.76 \text{ hm}^3$$

**Question 4 :** La puissance de pointe est égale à 1420 MW pendant 172 heures (la répartition de puissance suit le même principe que pour la question précédente). Calculer l'énergie mécanique nécessaire (on parle ici de l'énergie potentielle de l'eau dans le réservoir) et en déduire la quantité d'eau turbinée. Combien de temps faut-il pour remonter la même quantité d'eau du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur si toutes les pompes sont en fonctionnement ?

Il faut encore une fois recenser les machines utilisées puis tenir compte de leurs rendements et employer d'abord les turbines Pelton puis pour le reste employer les turbines Francis

$$\text{Energie nécessaire} = \frac{157 * 4}{0.8865} + \frac{1420 - 157 * 4}{0.877} = 1612 \text{ MW pendant } 172 \text{ h} \Rightarrow 1612e6 * 60 * 60 * 172$$

$$\begin{aligned} \text{Energie nécessaire} &= 709 + 903 = 1612 \text{ MW pendant } 172 \text{ h} \Rightarrow 1612e6 \frac{\text{J}}{\text{s}} * \frac{3600\text{s}}{\text{h}} * 172\text{h} \\ &= 9.98e14 \text{ J} \end{aligned}$$

$$V = \frac{E}{\rho gh} = \frac{9.98e14}{1000 * 9.81 * 926} = 1.1e8 \text{ m}^3 \Rightarrow 110 \text{ hm}^3$$

Toutes les pompes en fonctionnement absorbent une puissance électrique de  $8 \times 149 = 1192 \text{ MW}$ . Le rendement global de la chaîne de pompage est  $\eta_p = 0,981 \times 0,898 = 0,881$  ce qui donne une puissance utile

$$\text{Puissance fournis par les 8 pompes} = 8 * 149e6 * 0.881 = 1.05e9 \frac{\text{J}}{\text{s}} \text{ ou } \text{W}$$

Pour remonter la quantité d'eau calculée précédemment, il faut lui fournir  $\Delta W = 276900 \text{ MWh}$  d'où la durée requise de

$$\frac{9.98e14}{1.05e9} = 9.5e5 \text{ s} \Rightarrow 264 \text{ h}$$