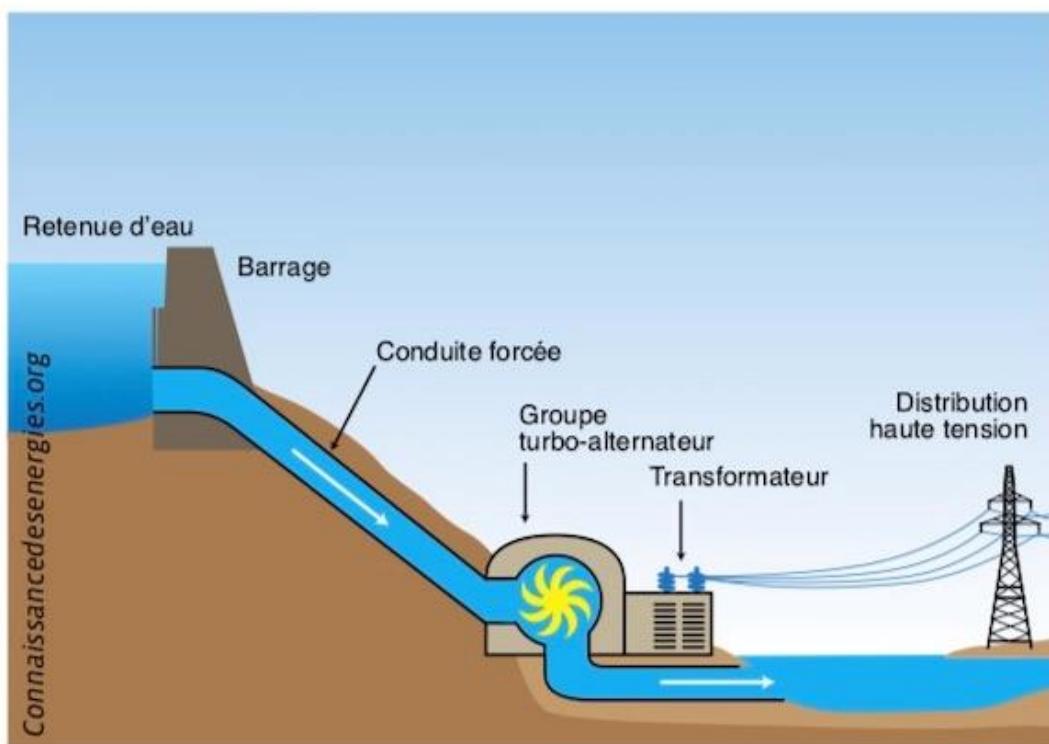
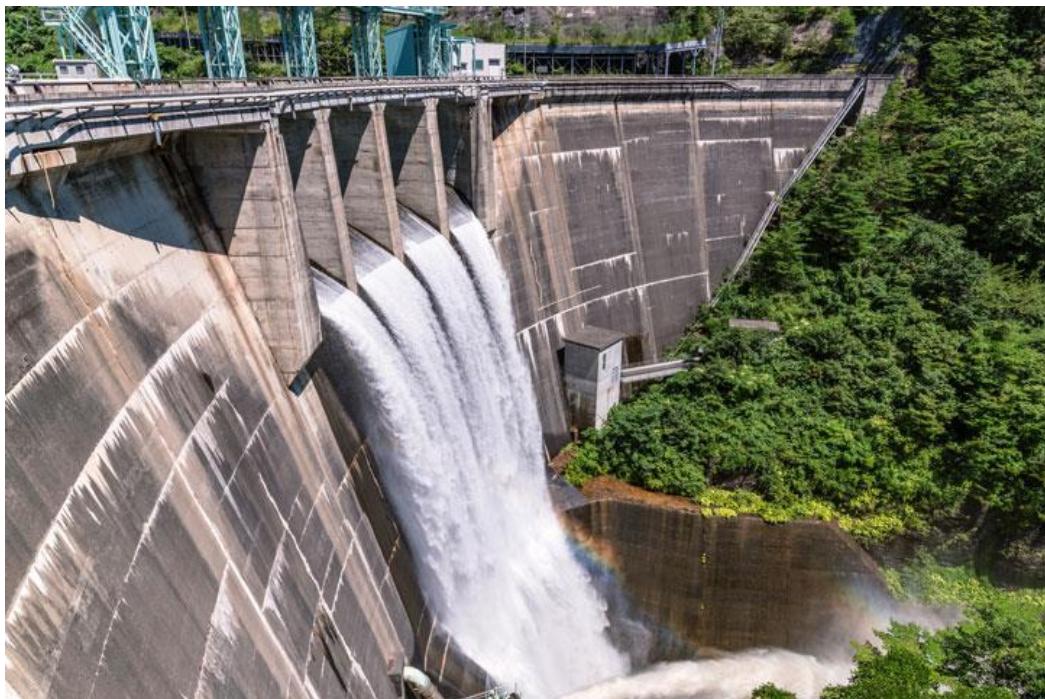


Chapitre 6 : Energie Hydraulique

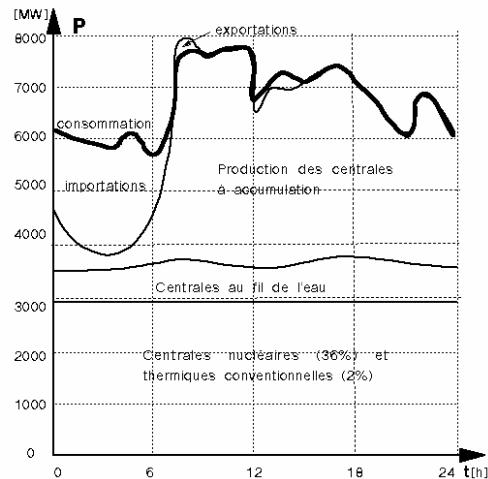


1. Production d'énergie et hydraulique

Les besoins en courant fluctuant

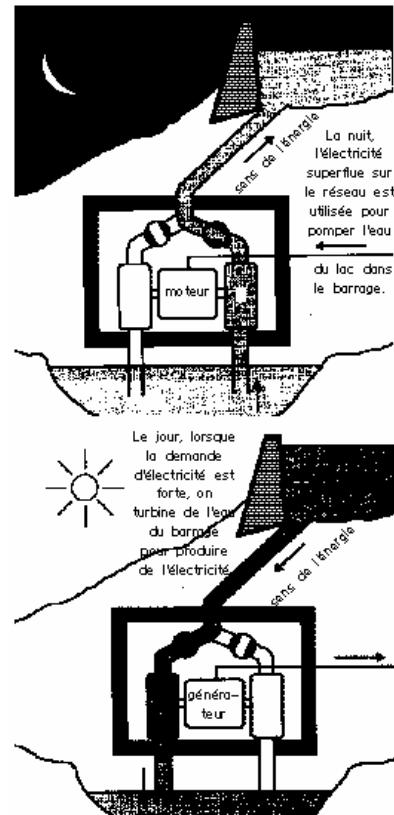
La consommation d'électricité est bien supérieure pendant les mois d'hiver. Les besoins fluctuent également au cours de la semaine ; on consomme beaucoup plus les jours ouvrables. La demande de courant varie aussi d'heure en heure au cours de la journée. On utilise pourtant constamment une quantité minimum d'électricité : la **charge de base**. Le courant consommé en plus durant certaines heures (8h - 12h et 15h - 18h) est appelé **demande de pointe**.

Dans notre pays, les centrales thermiques et au fil de l'eau couvrent la charge de base. Elles fournissent 24 heures sur 24 pratiquement toujours la même quantité de courant. Si l'on représentait graphiquement la production de ces deux types de centrales, on obtiendrait une large bande constante. La couverture de la demande de pointe, fortement fluctuante, est essentiellement assurée par les centrales à accumulation des Alpes facilement réglables.



Cycle de pompage turbinage dans les centrales à haute chute

L'énergie électrique est impossible à stocker (éventuellement une très faible quantité dans des batteries à faible rendement). Une centrale thermique ou nucléaire ne peut être arrêtée qu'en quelques jours ou semaines ; il est donc obligatoire de la laisser fonctionner à pleine charge ou de l'arrêter. Pendant les heures de faible consommation (22h - 5h), un surplus d'énergie électrique n'est pas consommé et serait perdu si cette énergie n'était pas utilisée pour remonter l'eau de la vallée jusqu' dans les barrages pour transformer l'énergie électrique en potentielle. Lors des heures de pointe de consommation, on fera redescendre cette eau pour réutiliser cette énergie. Il est clair que l'on perd environ 30% de cette énergie lors de la transformation mais autrement, on la perdrait entièrement. Economiquement, l'énergie en trop est très bon marché (2 à 5 cts/kWh) et l'énergie de pointe très chère (25 cts/kWh), ce qui permet d'assurer la rentabilité de la centrale.



Les deux guerres mondiales provoquèrent dans notre pays - très pauvre en matières premières - de graves pénuries énergétiques, qui donnèrent un nouvel élan au développement de la force hydraulique. C'est ainsi que se formèrent les grands ensembles énergétiques alpestres dont la zone de captage s'étendait souvent sur plusieurs vallées. On s'avisa progressivement que ce recours aux ressources hydrauliques ne pouvait suffire indéfiniment pour satisfaire les besoins croissants du pays en électricité. La Suisse devait donc envisager de construire des centrales

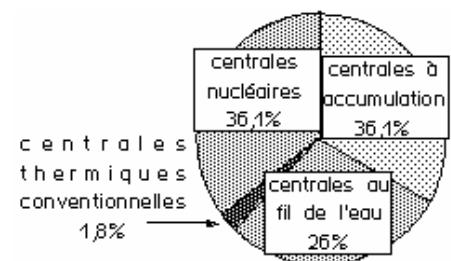
thermiques. Et l'on vit ainsi apparaître au lendemain de la Seconde Guerre Mondiale des petites centrales alimentées au fuel et quelques autres installations avec des turbines à vapeur. Plus tard, l'économie électrique décida de s'engager dans la voie nucléaire et, en 1984, l'énergie atomique couvrait d'ores et déjà 35% des besoins en électricité.

En Suisse, 62% de la production d'électricité est d'origine hydraulique donc solaire.

	CENTRALE THERMIQUE	CENTRALE HYDRAULIQUE
Rendement :	mauvais (20 - 35 %)	bon (75 %)
Localisation, géographie :	Place restreinte, souvent près des cours d'eau pour le refroidissement.	Grandes surfaces pour les barrages à certains endroits dans les montagnes ainsi que sur les fleuves.
Pollution :	Chaleur et gaz de combustion (CO ₂ , SO ₂ , NO ₂) et poussières OU faible quantité d'éléments gazeux radioactifs (1% de la radioactivité naturelle).	Débit des rivières et des fleuves, léger changement de climat à cause des bassins créés.
Production d'énergie :	Constante, il faut quelques jours pour arrêter la centrale.	Pour les barrages : réglable en quelques minutes utilisable pour produire l'énergie de pointe autrement : réglable.
Coût :	De plus en plus cher pour les centrales nucléaires (normes de sécurité) ; assez cher pour les autres.	Très bon marché pour les vieilles usines au fil de l'eau. Cher pour les barrages.
Combustible :	2 wagons/an d'uranium, 50'000 wagons/an de charbon pour une centrale moyenne.	Eau et soleil
Déchets :	735 tonnes de déchets faiblement radioactifs + 12 tonnes de hautement radioactifs OU 350'000 tonnes de cendres et mâchefer et 120'000 tonnes de boues	AUCUN

Coût de l'énergie électrique (kWh) en 1995 à la sortie de la centrale :

Centrale au fil de l'eau (Lavey)	3 - 8 cts/kWh
Centrale thermique	11 cts/kWh
Barrages (réversibles)	4 - 18 cts/kWh
Centrales nucléaires	
* Mühleberg	5,5 cts/kWh
* Gösgen	7 cts/kWh
* Leibstadt	12 cts/kWh



2. Les trois types de centrales hydrauliques

1) Centrale à haute chute

Elles sont caractérisées par un barrage situé dans les montagnes relié par une galerie d'amenée qui peut mesurer une dizaine de kilomètres à une conduite forcée.

La dénivellation ou hauteur de chute se situe entre 200 et 2000 mètres donc la vitesse de l'eau dans la conduite ainsi que la pression sont élevées. La turbine utilisée s'appelle Pelton et fonctionne grâce à l'énergie cinétique de l'eau.

S'inspirant de la roue à cuillères en usage dans les montagnes de Californie, l'ingénieur américain **Lesler Allen Pelton** mis au point vers 1870 une turbine utilisée pour les hautes chutes dont le débit est faible. Pour des débits plus élevés, on construit des turbines à plusieurs injecteurs. Elle utilise uniquement l'**énergie cinétique** de l'eau.

Pour éviter de faire exploser la conduite lorsque l'on arrête l'eau avec la vanne de pied, on installe une cheminée d'équilibre au sommet de la conduite forcée et les fluctuations du débit dans la conduite forcée font varier la hauteur de l'eau dans la cheminée d'équilibre. Cette dernière permet d'éviter le "coup de bêlier".

On commande la production d'énergie dans la centrale par la vanne de pied et les injecteurs des turbines.

Un système de vannes permet de pomper l'eau de la vallée dans le barrage pour utiliser l'énergie de trop sur le réseau électrique. La pompe se trouve reliée à la machine électrique qui fonctionne alors comme un moteur.

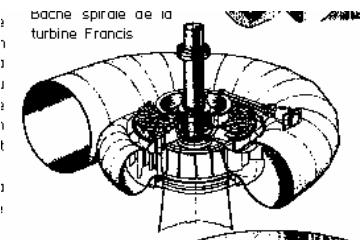
Exemples : Grande Dixence, Emosson, Hongrin, Oberhasli...



2) Centrale à moyenne chute

Dans ce type d'installation, la centrale électrique se trouve au pied du barrage et la hauteur de chute est donc bien plus faible. On peut quand même obtenir de grandes puissances grâce à un débit plus grand.

En raison de la plus petite hauteur de chute, la vitesse est plus faible et la **turbine Francis** utilise les énergies cinétique et de pression de l'eau. Le dispositif d'injection de l'eau sur le rotor de la turbine et la forme de ce rotor sont tels que l'eau pénètre dans la turbine à une vitesse réduite correspondant à une fraction de celle dont la chute est capable en ce point. La turbine Francis convient pour les chutes entre 20 et 350 mètres. On utilise aussi une turbine Francis comme pompe lorsque la chute est faible (200 - 300 m) et peut atteindre 500 m (479 m à Mattmark).



En 1855, dans son livre "Lowell Hydraulic Experiments", l'américain d'origine anglaise **James Francis** (1815-1892) divulguait l'invention d'une turbine à réaction utilisée dans les chutes moyennes et faibles. Connue en Europe vers 1880, elle supplanta les modèles français (Fourneyron, Fontaine et Girard). Elle utilise les **énergies de pression et cinétique** de l'eau.

Exemples : Centrales entre Vallorbe et Orbe...

3) Centrales au fil de l'eau

Dans ce cas, la chute est très faible (entre 5 et 30 mètres) mais le débit est énorme. On utilise la turbine Kaplan à pales orientables. A cause de la faible chute d'eau, la turbine Kaplan et son alternateur tournent très lentement.

Dès 1912, l'autrichien **Viktor Kaplan** eut l'idée de perfectionner une turbine hélice en rendant réglable l'inclinaison des pales. La construction industrielle n'en commença qu'en **1924**. Elle était conçue pour capter l'énergie des chutes basses et des cours d'eau larges et peu rapides. Elle utilise uniquement l'énergie de pression de l'eau.

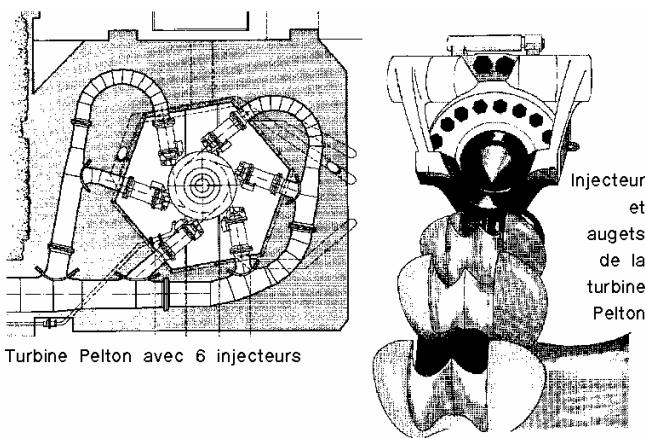


Exemples : Lavey près de St-Maurice, Verbois près de Genève...

3. Les trois types de turbines hydrauliques

Turbine Pelton (1870)

S'inspirant de la roue à cuillères en usage dans les montagnes de Californie, l'ingénieur américain Lester Allen Pelton mis au point vers 1870 une turbine utilisée pour les hautes chutes dont le débit est faible. Pour des débits plus élevés, on construit des turbines à plusieurs injecteurs. Elle utilise uniquement l'énergie cinétique de l'eau.



Turbine Pelton avec 6 injecteurs

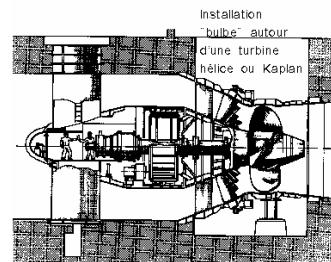
Turbine Francis (1855)

En 1855, dans son livre "Lowell Hydraulic Experiments", l'américain d'origine anglaise James Francis (1815-92) divulguait l'invention d'une turbine à réaction utilisée dans les chutes moyennes et faibles. Connue en Europe vers 1880, elle supplanta les modèles français (Fourneyron, Fontaine et Girard). Elle utilise les énergies de pression et cinétique de l'eau.

Turbine Kaplan (1912)

Dès 1912, l'Autrichien Viktor Kaplan eut l'idée de perfectionner une turbine hélice en rendant réglable l'inclinaison des pales. La construction

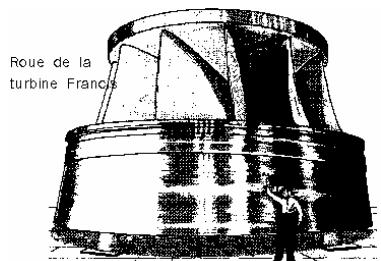
industrielle n'en commença qu'en 1924. Elle était conçue pour capter l'énergie des chutes basses et des cours d'eau larges et peu rapides. Elle utilise uniquement l'énergie de pression de l'eau.



La turbine Pelton (1870) convient aux très hautes chutes, entre 200 et 2000 m. Comme les barrages s'élevant hors sol à plus de 200 m de hauteur sont d'une extrême rareté, la turbine Pelton ne se rencontre pas dans les usines de pied de barrage, mais par contre on la trouve à l'extrémité des conduites forcées d'usines de dérivation de haute chute.

La turbine Francis (1855) est une turbine à réaction. Le dispositif d'injection de l'eau sur le rotor de la turbine et la forme de ce rotor sont tels que l'eau pénétrant dans la turbine possède une vitesse réduite correspondant à une fraction seulement de la vitesse dont la chute est capable en ce point. L'eau admise dans le rotor possède donc à la fois de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle de pression.

La turbine Francis convient aux moyennes chutes, entre 20 et 350 m. On la trouve aussi bien dans les usines de pied de barrage que dans les usines de dérivation de moins de 350 m de chute.



La turbine Kaplan est aussi une turbine à réaction. Elle est constituée d'une roue en forme d'hélice à pales orientables pour améliorer le rendement et a été mise au point par Viktor Kaplan en 1912. Elle convient aux très basses chutes, entre 5 et 30 m. Cette limite tend d'ailleurs à s'accroître, et en Italie des turbines Kaplan ont été installées sous une hauteur de chute de 55 m.

Questions et exercices sur l'énergie hydraulique

- 1) a) D'où vient l'énergie hydraulique ?
b) Est-elle épuisable ?
c) Quels sont les différents types d'installations hydrauliques ?
- 2) a) Dans la production d'énergie électrique en Suisse quelle est la proportion issue de l'hydraulique ? Commenter ce chiffre en le comparant avec la production des voisins.
b) Peut-on en produire plus ? Et où ?
- 3) a) Expliquer comment fonctionnent une turbine et une pompe.
b) Quels sont les trois types de barrages à haute chute et où les utilise-t-on ?
- 4) a) A quels moments un barrage est-il plein ou presque vide ?
b) Pourquoi y a-t-il tant de galeries d'aménée d'eau dans nos montagnes ?
- 6) a) Il semble absurde de remonter l'eau dans le barrage de l'Hongrin alors que le soleil le fait très bien. Est-ce rentable du point de vue physique ?
b) Expliquer pourquoi c'est une pratique courante ?
- 7) a) Calculer les rendements de la centrale hydraulique de l'Hongrin en turbinage et en pompage grâce aux données techniques.
b) Est-ce possible de les améliorer ? Si oui comment ?
- 8) L'eau d'un barrage parvient à l'entrée d'une turbine à raison de 2 m^3 par seconde et après une perte d'altitude de 600 m. Calculer la puissance électrique produite par le générateur si le rendement global vaut 70%.
- 9) L'aménagement hydroélectrique du barrage de la Grande Dixence comprend plusieurs installations :
 - * Le lac de retenue de la Grande Dixence de volume utile de 400'000'000 m³ d'eau.
 - * Les centrales hydroélectriques de Fionnay et de Nendaz de puissances électriques de 360 MW et de 480 MW.
 - * L'usine de pompage et de turbinage de Zmutt.
 - * Les stations de pompage de Ferpècle, Staffel et d'Arolla qui refoulent de l'eau dans le lac de retenue.
 a) Pour quelles raisons a-t-on construit des stations de pompage qui refoulent de l'eau dans le lac de retenue ?
b) Combien de temps les usines de Fionnay et de Nendaz peuvent-elles fonctionner avec l'eau contenue dans le lac de retenue si le débit total de l'eau qui les alimente est égal à $45 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 10) La station de pompage de Ferpècle fait partie du complexe de la Grande Dixence. Elle est équipée de trois pompes qui refoulent chacune $2,8 \text{ m}^3$ d'eau par seconde dans le lac de retenue du barrage de la Grande Dixence. La dénivellation entre la station de pompage et le lac est de 212 m. Quelle est la puissance totale de ces trois pompes ?
- 12) A la centrale hydroélectrique de Veytaux, on peut pomper de l'eau du lac Léman dans le lac de l'Hongrin et utiliser ensuite cette eau pour produire de l'électricité,
 - a) La quantité d'électricité produite avec l'eau pompée est-elle la même que celle qui a été nécessaire à pomper l'eau ?
 - b) Quel est l'intérêt de cette façon de procéder ?
- 13) La centrale hydroélectrique de Veytaux (Chillon) a un rendement global de 85%. Elle est alimentée par l'eau provenant du barrage de l'Hongrin. La dénivellation de la chute d'eau est égale à 860 m et le débit qui alimente ses turbines est de $32 \text{ m}^3/\text{s}$. Quelle est la puissance électrique disponible à la sortie des alternateurs de cette usine ?
- 14) Pour impressionner les visiteurs, les responsables de la centrale hydroélectrique de l'Hongrin ont accepté de faire une vidange de 5 minutes de la conduite forcée dans le lac Léman. La dénivellation est de 850 m et le débit de $25 \text{ m}^3/\text{s}$.
Calculer le prix de cette démonstration en admettant un rendement de 86% en turbinage et un prix de vente du kWh à 20 centimes.

- 15) Au moyen des chiffres sur la brochure de la Grande Dixence, calculer :
- Le rendement de la centrale de Fionnay.
 - En admettant des rendements de 80% pour le pompage et de 85% pour le turbinage
 - Le débit de pompage de l'usine de Stafelalp.
 - Le débit de turbinage de la centrale de Chandoline.
- 16) Le rendement global de la centrale FMHL en pompage puis en turbinage est de 71.5 %. On utilise une énergie électrique de 10 MWh pour pomper de l'eau du lac Léman dans le barrage de l'Hongrin puis on turbine la même quantité d'eau dans le lac Léman.
- Transformer les 10 MWh en joules et donner le volume d'eau pompé si le rendement (de pompage) est de 80% et la dénivellation de $h = 850$ m.
 - Calculer l'énergie perdue au cours de l'opération.
 - Expliquer à quoi sert cette opération ridicule à première vue.
- 17) a) Calculer la vitesse de l'eau à la sortie de l'injecteur de la turbine Pelton (chiffres dans la brochure des forces motrices de l'Hongrin).
b) Calculer l'énergie produite par le turbinage de 1 m³ d'eau dans la centrale de Veytaux grâce aux chiffres dans la brochure.
- 18) Le rendement d'une série de pompes est de 85 % et le débit total de 50 m³/s.
- Quelle est la hauteur de pompage si la puissance électrique des moteurs qui activent la pompe est de 900 MW ?
 - Quelle est la puissance récupérée par MW pompé si le groupe de turbinage a un rendement de 90 %.

Corrigé des exercices

- a) Energie solaire mgh ; b) non ; c) cf. p. E 14 et E 15.
- a) 62% (E 13) France : 80% nucléaire b) guère plus.
- a) La turbine Pelton utilise l'énergie cinétique de l'eau (choc élastique) $v_{jet} = 2 * v_{turbine}$. b) voûte (rochers très solides) ; poids (rochers moyens) et digue (terrain peu solide).
- a) Vide à la fin du printemps et plein à la fin de l'automne. b) pour amener l'eau d'autres vallées dans le barrage.
- A cause de la consommation d'énergie de jour et de nuit ; en été et en hiver... Utiliser l'électricité excédentaire du réseau.
- a) $\eta = P_{éel}/P_{hydr,t} = 240'000'000/(32'560 * 10 * 850) = 87\%$ et
 $\eta_p = P_{hydr,p}/P_{éel} = 24'280 * 10 * 850 / 240'000'000 = 86\%$. ; b) Difficilement.
- $P_{éel} = \eta mgh/t = 8,4$ MW (m/t = 2000 kg/s).
- a) Pour augmenter le volume de la retenue d'eau. b) $t = 400'000'000/45 = 8,888$ Ms = 102.9 jours.
- $P = 3 D gh = 3 2800 2120 = 17,8$ MW.
- a) Non car il faut compter le rendement des pompes multiplié par celui des turbines (0,87*0,87 = 75%) ; b) Pour utiliser l'énergie électrique excédentaire du réseau.
- $P = \eta D gh = 0,85 * 32'000 * 8600 = 234$ MW.
- $E_{hydr} = 25'000 * 10 * 850 * 5 * 60 = 63,75$ GJ = 17710 kWh ; $E_{éel} = \eta E_{hydr} = 15'230$ kWh qui coûtent 3046 Frs.
- a) $\eta = P_{éel}/P_{hydr,t} = 290'000'000/(45'000 * 10 * 878) = 74\%$; b) $D_p = \eta P_{éel} / gh = 9,8$ m³/s ; c) $D = P_{éel}/\eta_t gh = 120'000'000/(0,85 * 10 * 1747) = 8081$ kg/s = 8,08 m³/s.
- a) $E_{éel} = 3,6 * 10^{10}$ J ; $E_{hydr,p} = 2,88 * 10^{10}$ J = $mgh \Rightarrow m = 3,38 * 10^6$ kg = 3388 m³ ; b) $Q = 2,85$ MWh = $1,026 * 10^{10}$ J. c) On utilise de l'énergie électrique qui serait autrement perdue.
- a) $v = (2gh)^{1/2} = 130$ m/s = 470 km/h ($h = 850$ m) ; b) $E_{éel} = \eta mgh = 0,87 * 1000 * 10 * 850 = 7,395$ MJ = 2,054 kWh.
- $P_{hydr,p} = \eta P_{éel} = \eta Dgh \Rightarrow h = \eta P_{éel} / Dg = 1530$ m ; b) $\eta = 0,85 * 0,9 = 0,765 \Rightarrow$ on récupère donc 0,765 MW électrique par MW électrique pompé (perte de 0,235 MW).