

Dhaker Abbes
Nicolas Waldhoff
Arnaud Davigny
Bruno Francois

Énergies renouvelables

Rappels de cours et exercices corrigés



Chapitre 1- Energie hydraulique

I. Résumé de cours

1. Introduction

L'hydroélectricité ou énergie hydraulique est la conversion de l'énergie potentielle de l'eau (chute d'eau entre deux niveaux de hauteurs différentes ou les marées qui vont créer un mouvement de l'eau) en énergie mécanique puis en énergie électrique (Figure 1.1). La conversion de l'énergie hydraulique en énergie mécanique est réalisée à l'aide d'une turbine. La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique se fait à l'aide d'un générateur électrique qui est le plus souvent une génératrice synchrone. L'énergie est ensuite injectée sur le réseau électrique à l'aide d'un transformateur qui permet de raccorder deux réseaux électriques avec des tensions différentes. En France, en 2020, c'est la première source d'énergie électrique renouvelable devant l'éolien et la deuxième source de production d'électricité du pays après le nucléaire [RTE20].

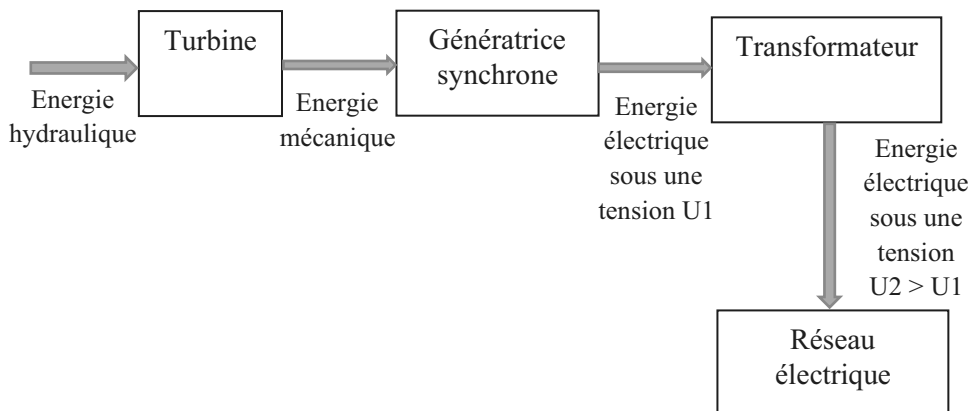


Figure 1.1 : Conversion de l'énergie hydraulique en énergie électrique

2. La puissance hydraulique

La puissance maximale captée par une turbine hydraulique est donnée par la relation suivante :

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h \quad (1)$$

Avec :

P : puissance mécanique (W)

Q : débit volumique (m³/s)

h : hauteur de chute (m)

ρ : masse volumique de l'eau (kg/m³) (1000 kg/m³)

g : constante d'accélération de la pesanteur (9,81 m.s⁻²)

La puissance mécanique développée par une turbine hydraulique (1) est obtenue en prenant en compte le rendement de la turbine (2) :

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h \cdot \eta \quad (2)$$

- η : rendement de la turbine (<1) (de l'ordre de 60% à 93% selon le type de turbine [MEG08])

3. Les types de turbine

Il existe plusieurs types de turbine qui dépendent du dimensionnement et de la configuration de la centrale hydroélectrique et de la hauteur de chute [MEG08] [SER12] [SHE10] [IFC15] :

- turbine Pelton, adaptée au grande hauteur de chute,
- turbine Francis, adaptée à une hauteur de chute moyenne à grande,
- turbine Kaplan, adaptée à une hauteur de chute faible et débit élevé,
- groupe Bulbe (turbine Kaplan), adapté à une hauteur de chute faible, fonctionnement en immergé,
- groupe réversible turbine / pompe pour les Stations de Transfert d'Energie par Pompage.

Le dimensionnement du générateur électrique dépend de la topologie du site d'installation [SHE10] [IFC15].

4. Les grandes familles de barrage

On peut trouver quatre grandes familles de barrage [EDF21a] [CFB21] [KER08] [IFC15] :

- les barrages-voûtes,
- les barrages à contreforts,
- les barrages poids,
- les barrages poids en remblai.

Avant la construction du barrage, il est nécessaire de faire une étude de faisabilité qui va prendre en compte une étude hydrologique, une étude topographique, les contraintes environnementales et administratives, le dimensionnement et une analyse financière [AUV16] [PAC16] [FRA17] [GOUV21a] [IFC15].

Pour un même barrage, il est possible d'avoir plusieurs usages : la production d'électricité, la régularisation du débit des cours d'eau avec l'écrêtement des crues et le soutien des étiages (débits minimaux connus statistiquement d'un cours d'eau) lors de sécheresse, l'irrigation des terres agricoles, le développement économique local en termes d'activités de loisirs et de tourisme, l'alimentation en eau potable et l'alimentation des canaux de navigation [CFB21] [EDF21a] [KER08] [IFC15].

Un barrage a un impact environnemental sur la faune aquatique et des terres recouvertes par l'eau à l'achèvement du barrage et le risque de déplacement de population [CFB21] [GOUV21b]. Sa structure doit être vérifiée régulièrement [KER08] [GOUV21b] afin d'éviter la rupture de ce dernier et le déversement rapide de plusieurs millions de m³ d'eau en aval qui occasionne un fort risque de submersion de la population [GOUV21a]. Afin d'éviter les accidents lors de l'exploitation du barrage, le déplacement à proximité d'un barrage est réglementé [EDF21a].

5. Un classement selon la puissance installée

Les centrales hydrauliques sont classées selon cinq intervalles de puissance (classement de l'UNPEDE - Union internationale des producteurs et distributeurs d'énergie électrique retenue par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)) [ENC21] [EDF21a] [IFC15] :

- les grandes centrales pour des puissances de plus de 10 MVA,
- les petites centrales pour des puissances comprises entre 2 MVA < P < 10 MVA,
- les minicentrales pour des puissances comprises entre 500 kVA < P < 2 MVA,
- les microcentrales pour des puissances comprises entre 20 kVA < P < 500 kVA,
- les picocentrales pour des puissances inférieures à 20 kVA.

En France, les puissances varient de quelques kVA à 1800 MVA (STEP de Grand Maison). En 2020, la puissance installée (cumul des puissances des centrales) était de 25,731 GW (25 731 MW ou 25,731.10⁹ W) pour une production annuelle d'énergie électrique de 65 TWh (65.10¹² Wh) qui représentait environ 13% de l'énergie produite en France [RTE20].

6. Le mode de production d'énergie électrique

Il existe plusieurs types de centrales hydroélectriques [EDF21a] [CDE21] [WIK21] [ENC21] [UFE21] [SER12] [IFC15] :

- Les centrales au fil de l'eau ou de basse chute : elles sont placées sur des grands fleuves ou des grandes rivières. Elles se caractérisent par un débit élevé, une hauteur de chute faible (dénivelé de moins de 30 m) et ne

possèdent pas de réservoir. Les turbines sont du type Kaplan ou groupe bulbe pour les plus récentes. Elles produisent pratiquement sans interruption. Elles participent à la production d'énergie électrique de base d'un pays. La France compte plus de 2500 installations hydrauliques. Environ 85% sont des installations au fil de l'eau. Une majorité ont des puissances en dessous de 10 MW.

- Les centrales d'écluse (ou de chute moyenne) : elles sont placées sur des grands fleuves à fortes pentes ou sur un canal parallèle aux fleuves. Elles forment des barrages successifs qui permettent un dénivelé de l'eau. Elles se caractérisent par un débit élevé et une hauteur de chute comprise entre 30 m et 300 m. Les turbines sont du type Francis. Elles ont une réserve d'eau qui peut être vidangée sur de courtes périodes (entre 2 et 400 heures) mais renouvelée rapidement. Elles produisent au maximum pendant les périodes de fortes consommations. Elles permettent une régulation journalière ou hebdomadaire de leur production d'énergie électrique.
- Les centrales de lac (ou de haute chute) : elles sont placées dans des massifs montagneux et présentent une retenue d'eau. Cette retenue est remplie grâce à l'eau venant des ruisseaux, torrents alimentés par des précipitations et de neiges fondues d'une façon naturelle ou par des galeries. Elles se caractérisent par une forte hauteur de chute et un débit faible. Les turbines sont du type Pelton. L'eau est transmise aux turbines par l'intermédiaire de canaux, de galeries ou de conduites forcées. Elles peuvent fonctionner plus de 400 heures à pleine puissance pendant les heures de fortes consommations. Elles permettent une régulation saisonnière de leur production d'énergie électrique (car la réserve d'eau est plus longue à être renouvelée). Leur temps d'utilisation sur une année est d'environ de 1000 heures à 1500 heures.
- Les Stations de Transfert d'Energie par Pompage (STEP) **[PLA21]** **[EDF13]** : elles présentent un bassin supérieur et un bassin inférieur, à des altitudes différentes, reliés par une conduite forcée. Les groupes hydrauliques utilisés sont réversibles : ils peuvent fonctionner en turbine ou en pompe. Elles fonctionnent en circuit fermé. Ce type de centrale est un moyen de stockage de l'énergie électrique. L'eau est pompée du bassin inférieur vers le bassin supérieur pendant les heures creuses (coût faible de l'énergie électrique). On stocke de l'eau et par voie de conséquence de l'énergie. Pour produire de l'énergie électrique, l'eau est turbinée du bassin supérieur vers le bassin inférieur pendant les heures pleines (coût élevé de l'énergie électrique). Le choix de fonctionnement pendant les heures creuses ou heures pleines permet de rentabiliser en partie la centrale. Le rendement global du fonctionnement pompage – turbinage est d'environ 80%.

- Les centrales utilisant les marées : elles sont placées sur un barrage qui ferme un estuaire. Elles fonctionnent selon le rythme des marées montantes et descendantes. On utilise des groupes bulbes. Il est possible d’avoir une phase de fonctionnement de pompage de l’eau vers la retenue afin de stocker une petite quantité « d’énergie ». A ce jour, en France, seul un site est équipé, celui de la Rance (près de Saint Malo, département de l’Ille et Vilaine, Nord de la Bretagne). On y trouve l’usine marémotrice de la Rance, inaugurée en 1966, d’une puissance installée de 240 MW.

7. Facteur de charge ou nombre d’heures de fonctionnement équivalent à puissance nominale

Les centrales de production d’énergie électrique sont comparées à l’aide du facteur de charge sur une année [EIA15]. Il est égal au rapport entre l’énergie réellement produite sur une année et l’énergie qu’elle aurait pu produire en fonctionnant à sa puissance nominale sur une année [CDE16] [EIA21]. Ce facteur est exprimé en pourcentage et il ne peut pas dépasser les 100%. Il permet de calculer la disponibilité d’une centrale de production à produire de l’énergie électrique sur une année.

$$\text{facteur de charge} = \frac{\text{Energie réellement produite sur une année}}{\text{Puissance nominale} \cdot \text{Temps}} \cdot 100 \quad (3)$$

Les énergies sont exprimées en Wh, kWh (10^3 Wh), MWh (10^6 Wh), GWh (10^9 Wh) ou TWh (10^{12} Wh). La puissance nominale peut être exprimée en W, kW, MW, GW ou TW. Le temps est défini en heures sur une année.

Afin de connaître la disponibilité d’une centrale, il est également possible de calculer le nombre d’heures équivalent de fonctionnement à puissance nominale appelé Nh . Pour le calculer, on utilise l’énergie réellement produite sur une année et on détermine la durée de fonctionnement qu’il aurait fallu pour produire cette énergie en fonctionnant à puissance nominale. Cela peut s’expliquer par les Figures 1.2 et 1.3 où la surface (qui représente l’énergie produite) des deux figures doit être identique. Elles peuvent l’être mais avec un régime de puissance de fonctionnement et une durée différents. Pour construire la surface de la figure 1.3, la surface de la figure 1.2 a été utilisée avec un fonctionnement à puissance nominale et une durée équivalente de fonctionnement Nh .

$$Nh = \frac{\text{Energie réellement produite sur une année}}{\text{Puissance nominale}} \quad (4)$$

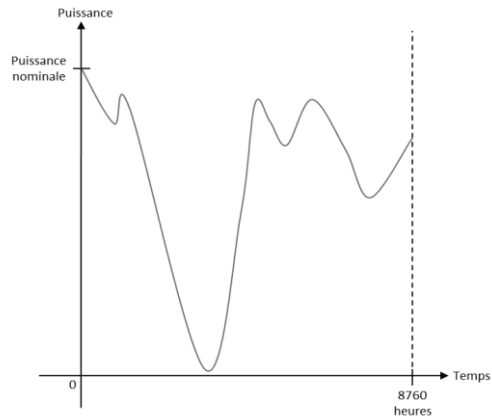


Figure 1.2 : Courbe réelle de l'énergie produite sur une année

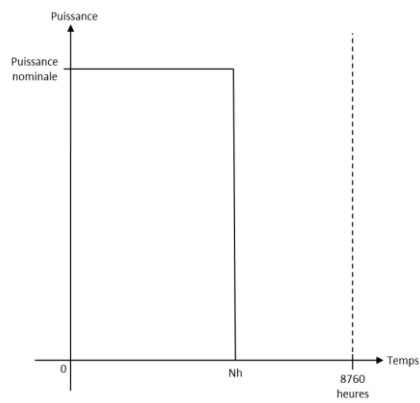


Figure 1.3 : Courbe de l'énergie produite sur une année à puissance nominale pour une durée Nh

Les valeurs de facteur de charge et du Nh en fonction du type d'unité de production pour la France en 2019 [RTE 19] sont les suivantes (Tableau 1.1) :

Type de centrale	Energie produite (TWh)	Puissance installée (MW)	Facteur de charge (%)	Nh (heures)
Nucléaire	379,5	63 130	68,6	6011
Thermique à combustible charbon	1,6	2 997	6,1	534
Thermique à combustible fioul	2,3	3 401	7,7	676
Thermique à combustible gaz	38,6	12 191	36,1	3166
Hydraulique	60	25 557	26,8	2348
Eolien	34,1	16 494	23,6	2067
Solaire	11,6	9 435	14	1230
Bioénergies	9,9	2 122	53,3	4665

Tableau 1.1 : Comparaison du facteur de charge et du Nh pour différents types de centrale

Ces valeurs diffèrent selon les pays en fonction du programme de fonctionnement des centrales, de la météorologie et de la situation géographique pour les énergies renouvelables [EIA15]. On constate dans le tableau 1.1 que les centrales nucléaires de production d'électricité ont les facteurs les plus élevés. Les installations nucléaires sont des installations à amortir, qui ne sont pas conçues pour des brusques changements de puissance et avec un coût du kWh produit annoncé le plus faible. Elles sont donc privilégiées pour la production de base, qui varie peu, d'un pays comme la France. Les centrales thermiques classiques au fioul et au charbon ont les plus faibles facteurs en raison des émissions de gaz à effet de serre émises lors de leur fonctionnement mais aussi en raison du coût élevé des combustibles fossiles. Elles sont utilisées lors de périodes de froid en hiver. Les centrales thermiques classiques au gaz et une partie de l'hydraulique servent à réguler les variations rapides de la demande en énergie. Pour le solaire et l'éolien, elles fonctionnent au gré du vent et de la source lumineuse. Pour les centrales à bioénergies, elles fonctionnent avec les deux facteurs, les plus importants, charge et Nh . Ce sont des centrales au biogaz, biomasse, déchets de papeteries, déchets ménagers non renouvelables, déchets ménagers renouvelables qui produisent tant que l'énergie primaire est présente, un peu comme les centrales éoliennes et solaires.

Pour les centrales hydrauliques, le tableau 1.2 donne une information sur les facteurs de charge et Nh en fonction du mode de production [HYD15].

Mode de production	Energie produite (TWh)	Puissance installée (MW)	Facteur de charge (%)	Nh (heures)
Centrales au fil de l'eau	32	8500	43	3765
Centrales d'éclusée	13,6	4200	37	3238
Centrales de lac	17	9200	21	1845
STEP	6,5	5000	15	1300
Usine Marémotrice de la Rance	0,55	240	26	2292

Tableau 1.2 : Comparaison du facteur de charge et du Nh pour différents modes de production hydraulique

On constate que les centrales au fil de l'eau et d'éclusée ont les facteurs les plus élevés. Cela s'explique par le fait qu'elles sont placées sur des rivières ou des fleuves et elles produisent en permanence avec une variabilité qui dépend du débit. Les centrales de lac et les STEP sont utilisées à des moments où il est nécessaire de produire à l'aide de ces outils. L'usine marémotrice fonctionne au gré des marées.

8. Importance des centrales hydrauliques pour le réseau électrique

La courbe de consommation de la France sur une journée est représentée à la figure 1.4. Elle varie en fonction de plusieurs facteurs : la configuration du pays, le jour de la semaine, les heures de la journée, la saison, etc.

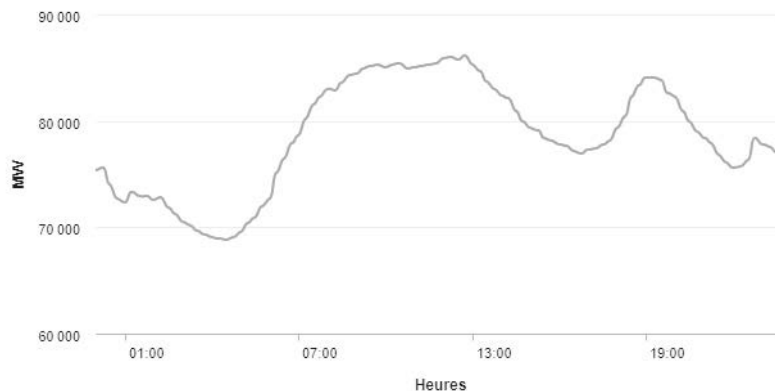


Figure 1.4 : Courbe de consommation de la France pour la journée du 12 février 2021 [RTE21].